Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Școala Doctorală a Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică

TEZĂ DE DOCTORAT - REZUMAT

Cercetări privind posibilitățile de ameliorare a performanțelor, economicității și emisiilor poluante ale motoarelor cu aprindere prin comprimare prin utilizarea unor combustibili aditivați cu nanoparticule

Autor: Ing. Andrei-Laurențiu NICULAE

Coordonator: Prof. Dr. Ing. Radu CHIRIAC

Domeniul de doctorat: Inginerie Mecanică

București

2026

Cuprins

1. Utilizarea nanoparticulelor ca aditivi pentru combustibili 1

2. Studiul efectelor produse de aditivarea cu nanoparticule asupra proprietăților fizico-chimice ale unor combustibili și influențele induse de acestea asupra dezvoltării jetului 4

3. Metode de preparare, de determinare a unor proprietăți fizico-chimice și de evaluare a stabilității unor combustibililor aditivați cu nanoparticule de tip nanotuburi de carbon 6

4. Studiu experimental într-o celulă experimentală închisă privind determinarea caracteristicilor macroscopice ale jetului de combustibil 9

5. Determinarea prin simulare a caracteristicilor jetului și formării amestecului în cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule 11

6. Determinarea experimentală a performanței, economicității și emisiilor poluante ale unui motor Diesel alimentat cu combustibili alternativi aditivați cu nanoparticule de tip nanotuburi de carbon 13

7. Corelații posibile între regimul funcțional caracterizat de parametrii de performanță, economicitate, emisii poluante și dozajele de nanoparticule de tip nanotuburi de carbon utilizate în combustibilii aditivați 16

8. Concluzii, contribuții și recomandări pentru cercetări viitoare 18

9. Bibliografie 21

1. Utilizarea nanoparticulelor ca aditivi pentru combustibili

Capitolul 1 a debutat cu prezentarea aspectelor generale cu privire la nanoparticule și descrierea mecanismelor prin care acestea produc efecte atunci când sunt utilizate ca aditivi pentru combustibili destinați motoarelor cu aprindere prin comprimare.

Particulele ultrafine cu diametrul cuprins între 1-100 nm sunt considerate nanoparticule [1]. Acestea prezintă un raport ridicat între numărul de atomi concentrați la suprafața materialului și numărul de atomi din interior, valoarea crescând pe măsură ce dimensiunea nanoparticulelor scade. O valoare ridicată a acestui raport determină ca proprietățile nanoparticulelor să fie similare cu cele ale atomilor de suprafață. Astfel, reactivitatea și activitatea catalitică a acestora se intensifică [2].

Nanoparticulele pot fi clasificate în două categorii: energetice sau non-energetice [3]. Nanoparticulele energetice participă direct la reacțiile exoterme din camera de ardere, contribuind la creșterea cantității totale de energie eliberate. În această categorie se încadrează nanoparticulele pe bază de carbon, precum și unele structuri de tip core@shell, în care miezul metalic este învelit într-un strat organic ce permite participarea la reacțiile exoterme. Nanoparticulele non-energetice, reprezentate în principal de oxizi metalici, nu ard împreună cu combustibilul, dar influențează semnificativ procesul de ardere prin eliberarea oxigenului din structura lor, fiind promovate astfel reacțiile de oxidare, cu un efect pozitiv asupra valorilor emisiilor poluante [4].

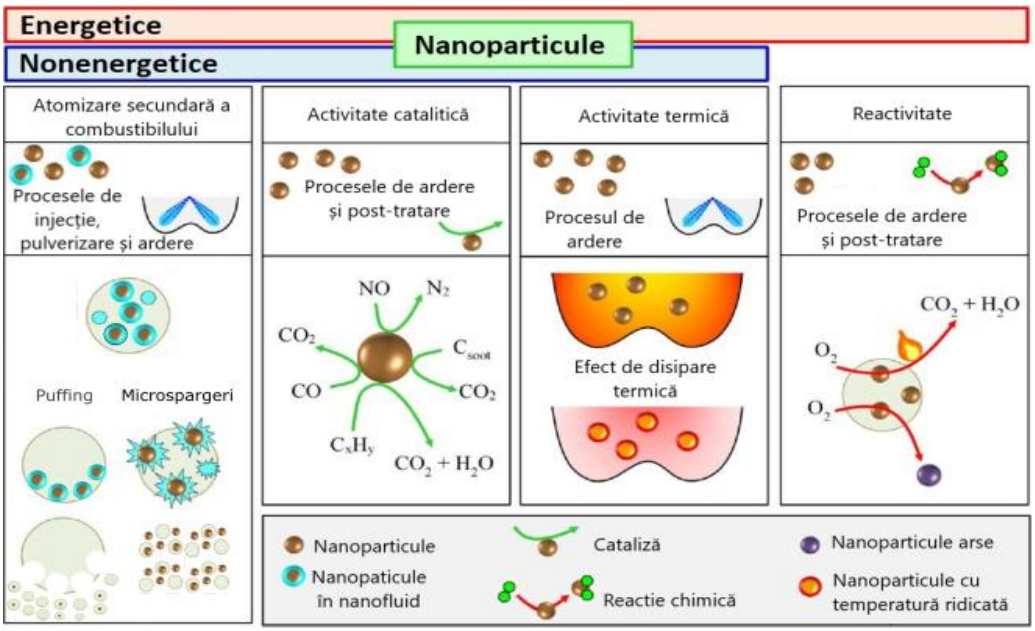


Figura 1. Influențele generate de utilizarea nanoparticulelor în motorul Diesel [3]

În Figura 1 sunt prezentate influențele generate de utilizarea nanoparticulelor în motorul Diesel. Atât nanoparticulele energetice, cât și cele non-energetice pot influența procesul de atomizare secundară a combustibilului (prin puffing și microspargeri), prezintă o activitate catalitică și determină apariția unui efect de disipare termică. În schimb, doar nanoparticulele energetice participă activ la procesul de ardere (la reacțiile exoterme). Toate acest mecanisme au fost descrise în prima parte a Capitolului 1.

Ulterior, pe baza informațiilor din literatura de specialitate s-au realizat diverse tabele de sinteză pentru nanoparticule de oxizi metalici, non-metalice, de tip core@shell, hibride și multiple cu privire la:

- **Procesul de aditivare** (tipuri de nanoparticule utilizate, mărimea și dozajul acestora; combustibilii de bază; metodele de sintetizare sau furnizorii de la care au fost procurate; metodele de preparare a amestecului; procedeele de caracterizare; solvenții și surfactanții utilizați și aspecte privind stabilitatea) – patru tabele de sinteză pe baza referințelor [4–31];
- **Variațiile anumitor proprietăți fizico-chimice ale combustibililor aditivați** (densitate, vâscozitate dinamică sau cinematică, putere calorifică inferioară, cifră cetanică sau indicele cetanic, punctul de aprindere și punctul de curgere) – nouă tabele de sinteză pe baza referințelor [4,6–12,14–16,19,21,23,24,29,31];
- **Efectele asupra valorilor emisiilor poluante, performanțelor și economicității motoarelor Diesel** – șase tabele de sinteză pe baza referințelor [4–7,9–11,13–17,19–26,28–31].

Pe baza datelor extrase din literatura de specialitate referitoare la **procesul de aditivare cu nanoparticule**, s-au formulat câteva observații generale. Nanoparticulele utilizate pot fi fie achiziționate de la furnizori specializați, fie sintetizate în laborator, fiind caracterizate printr-o varietate de metode care permit determinarea fazei cristaline, a compoziției chimice, a morfologiei, a comportamentului optic și a distribuției dimensiunilor. Acestea pot fi utilizate sub formă de pulbere sau nanofluid, prin dispersare într-un solvent. În studiile considerate s-au aditivat diverși combustibili de bază, însă cel mai utilizat a fost biodieselul, fie în stare pură, fie în amestec cu motorina. Dozajele adoptate au fost, în majoritatea studiilor, cuprinse între 10 ppm și 150 ppm, concentrațiile mai ridicate putând determina aglomerarea nanoparticulelor, cu efecte negative asupra emisiilor poluante, performanțelor și economicității motoarelor Diesel. Prepararea nanocombustibililor a implicat, de regulă, procedee de omogenizare mecanică, magnetică sau ultrasonică cu diverse durate de timp, stabilitatea acestora fiind variabilă și

dependentă de tipul nanoparticulelor, dozaj, metoda de aditivare și utilizarea solvenților sau surfactanților.

Analiza **variațiilor proprietăților fizico-chimice ale combustibililor aditivați** a evidențiat, în general, variații ușoare ale densității, de ordinul 0,1–0,4%. Vâscozitatea cinematică sau dinamică a prezentat variații mai pronunțate, fiind raportate atât creșteri semnificative, cât și moderate sau scăderi, influențate în principal de tipul și concentrația nanoparticulelor. Puterea calorifică inferioară a înregistrat, în cele mai multe cazuri, creșteri ușoare până la semnificative, posibil asociate unei influențe a nanoparticulelor asupra cantității de apă condensată din timpul desfășurării determinărilor experimentale. De asemenea, aditivarea cu nanoparticule a condus, în general, la îmbunătățirea calității de autoaprindere, reflectată prin creșteri ale cifrei și indicelui cetanic. Valorile punctului de aprindere și ale punctului de curgere pot suferi atât creșteri, cât și scăderi, aceste variații fiind puternic dependente de tipul nanoparticulelor și de prezența solvenților sau surfactanților.

În ceea ce privește **efectele asupra valorilor emisiilor poluante, performanțelor și economicității motoarelor Diesel**, majoritatea studiilor au indicat reduceri simultane ale emisiilor de oxizi de azot (NO_x), particule și monoxid de carbon (CO). Concomitent, au fost raportate creșteri ale randamentului termic, ale puterii sau cuplului efectiv (în lucrările unde nu s-au raportat valori ale randamentului termic), precum și reduceri ale consumului specific de combustibil sau energie. Tendințele observate au confirmat că utilizarea nanoparticulelor ca aditivi pentru combustibili destinați motoarelor Diesel are potențialul de a reduce valorile emisiilor poluante și de a îmbunătăți performanțele și economicitatea motoarelor Diesel.

În Capitolul 2, s-au considerat acele tipuri de nanoparticule din lucrările [7], [14] și [30] (MgO – oxid de magneziu, MWCNT – nanotuburi de carbon cu pereți multiplii, CeO_2 – dioxid de ceriu) care au condus la cele mai mari reduceri ale emisiilor poluante (NO_x, particule și CO) cu ameliorarea performanțelor și economicității motoarelor cu aprindere prin comprimare. Deși nanoparticulele hibride utilizate în [28] (CeO_2 + MWCNT) au determinat reduceri semnificative ale emisiilor poluante, acestea nu au fost luate în continuare datorită dificultății cu privire la sintetizarea sau procurarea acestora. În schimb, au fost luate în considerare și nanoparticulele de tip Al_2O_3 (alumină) deoarece sunt cele mai utilizate nanoparticule de oxizi metalici.

2. Studiul efectelor produse de aditivarea cu nanoparticule asupra proprietăților fizico-chimice ale unor combustibili și influențele induse de acestea asupra dezvoltării jetului

În prima parte a Capitolului 1, au fost prezentate efectele aditivării combustibilului cu nanoparticule. Dintre acestea o atenție deosebită o capătă influența pe care acestea o exercită asupra dezvoltării jetului de combustibil. Astfel, Capitolul 2 s-a adresat acestei tematici de cercetare.

Dezvoltarea jetului de combustibil în camera de ardere a unui motor Diesel poate fi evaluată prin determinarea caracteristicilor jetului de combustibil. Astfel, au fost definite principalele caracteristici ale jetului de combustibil și descrise fenomenele ce se desfășoară în timpul dezvoltări acestuia. Conform studiului [32] aceste caracteristici pot fi macroscopice, microscopice și de atomizare. Caracteristicile macroscopice ale jetului se referă la parametrii globali, precum unghiul conului de pulverizare și penetrația. Caracteristicile microscopice se referă la proprietățile picăturilor de combustibil, precum diametrul mediu, viteza și distribuția în funcție de dimensiunea acestora. Caracteristicile de atomizare includ lungimea și timpul de spargere a jetului de combustibil lichid în picături.

De asemenea, au fost definite acele proprietăți fizico-chimice relevante în dezvoltarea jetului de combustibil și a fost evidențiată legătura acestora cu parametri esențiali precum durata de spargere a jetului, penetrația, unghiul conului de pulverizare, diametrul mediu Sauter și momentul de început al injecției. Observațiile au arătat că variațiile proprietăților fizico-chimice considerate exercită o influență similară asupra dezvoltării jetului de combustibil. Creșterea densității, vâscozității, tensiunii superficiale și modulului de elasticitate volumic determină creșterea duratei de spargere a jetului, a penetrației și a diametrului mediu Sauter, respectiv scăderea unghiului conului de pulverizare și deplasarea în avans a momentului de început al injecției în cazul sistemelor de injecție mecanice.

Ulterior, a fost investigat impactul diametrului mediu Sauter, al penetrației și al unghiului conului de pulverizare asupra performanței, economicității și emisiilor poluante ale motoarelor cu aprindere prin comprimare. Observațiile trasate au sugerat că un jet de combustibil ideal se caracterizează prin picături cu un diametru mediu Sauter cât mai mic, respectiv o penetrație și un unghi al conului de pulverizare adecvate în raport cu dimensiunile camerei de ardere. Aceste caracteristici favorizează o ardere mai eficientă, ceea ce conduce la o îmbunătățire a performanțelor și economicității motorului, respectiv emisii reduse asociate neomogenității

amestecului aer-combustibil și arderii incomplete (hidrocarburi nearse - HC, CO, funingine și particule). Totuși, emisiile de NO_x vor crește.

În final, s-a realizat o cercetare bibliografică privind influența nanoparticulelor de tip MgO, CeO_2, MWCNT și Al_2O_3, precum și a surfactanților utilizați asupra proprietăților fizico-chimice ale combustibililor de bază, relevante pentru dezvoltarea jetului (**densitate, vâscozitate, tensiune superficială**). De asemenea, modulul de elasticitate volumic a fost identificat ca o altă proprietate fizico-chimică relevantă, însă nu au fost găsite studii care să ofere valori pentru acest parametru în cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule. Astfel, pe baza referințelor [8,33–68] au fost realizate cinci tabele de sinteză în care au fost centralizate valorile proprietăților fizico-chimice înainte și după aditivarea cu nanoparticulele considerate, împreună cu diferențele procentuale rezultate. Pe baza diferențelor procentuale calculate s-au realizat ulterior nouă figuri și s-au comentat tendințele observate.

Analiza datelor din literatura de specialitate a indicat faptul că impactul nanoparticulelor de tip MgO, Al_2O_3, MWCNT și CeO_2 asupra **densității** combustibilului este în general redus datorită dozajelor de ordinul ppm**.** În majoritatea cazurilor**,** variațiile densității fiind nesemnificative. Însă, au existat cazuri în care au fost raportate variații mai mari, acestea fiind atribuite unei posibile utilizări de surfactanți sau solvenți în concentrații mari.

În ceea ce privește **vâscozitatea cinematică**, aditivarea combustibilului cu nanoparticule de MgO, Al_2O_3, MWCNT și CeO_2 a produs efecte notabile, însă nu s-a putut stabili o tendință unică și predictibilă pentru toate situațiile. În majoritatea cazurilor, aditivarea a condus la o creștere a vâscozității, ceea ce sugerează că nanoparticulele, prin dispersie, creează interacțiuni care întăresc structura fluidului. Totuși, au fost raportate și cazuri de scăderi semnificative. Variabilitatea efectelor fiind influențată puternic de compoziția combustibilului utilizat, dozajul nanoparticulelor, tipul acestora și prezența surfactanților, care pot amplifica sau atenua impactul asupra vâscozității. De asemenea, au fost observate corelații între scăderile vâscozității și densității în contextul aditivării cu nanoparticule de oxizi metalici.

Aditivarea combustibililor cu nanoparticule de tip Al_2O_3, MWCNT și CeO_2 a influențat **tensiunea superficială,** ceea ce sugerează o tendință generală de modificare a proprietăților de suprafață ale combustibililor. În majoritatea cazurilor, aditivarea a condus la o creștere a acesteia. Cu toate acestea, a existat și o lucrare [50], în care tensiunea superficială a scăzut semnificativ la aditivarea B20 cu MWCNT în dozaje de 25, 50 și 100 ppm. Dimensiunea nanoparticulelor s-a dovedit a fi un factor important, nanoparticulele mai mari având un impact mai pronunțat asupra tensiunii superficiale. De asemenea, surfactanții, cum ar fi CTAB și acidul

oleic, au avut un efect variabil asupra tensiunii superficiale, influențând interacțiunea dintre nanoparticule și combustibil, însă fără a produce modificări semnificative.

3. Metode de preparare, de determinare a unor proprietăți fizico-chimice și de evaluare a stabilității unor combustibililor aditivați cu nanoparticule de tip nanotuburi de carbon

Variațiile obținute pentru densitatea și vâscozitatea combustibililor la aditivarea cu nanoparticule MgO, CeO_2, MWCNT și Al_2O_3 din Capitolul 2 nu au prezentat o tendință clară și uniformă, astfel s-a considerat necesară continuarea cercetării prin realizarea unor determinări experimentale proprii. Astfel, în cadrul Capitolului 3 s-au determinat și comparat valorile asociate acestor proprietăți fizico-chimice pentru combustibilii B7 (motorină comercială), B7S5 (95% B7 și 5% n-butanol), respectiv B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 (B7S5 + 25, 50, respectiv 100 ppm MWCNT nefuncționalizate), precum și B7S5C100-S (B7S5C100 + 1% masic Span 60, raportat la n-butanol).

S-a optat pentru utilizarea nanoparticulelor de tip MWCNT deoarece sunt structuri pe bază de carbon. MgO, CeO_2 și Al_2O_3 sunt nanoparticule de oxizi metalici, iar acestea se vor regăsi în gazele de evacuare ale motorului și prezintă riscuri semnificative atunci când sunt eliberate în mediul înconjurător. Nanoparticulele de tip MWCNT nefuncționalizate au fost achiziționate de la SkySpring Nanomaterials, Inc din Statele Unite ale Americii. Acestea au fost produse prin depunere chimică în fază de vapori catalitică și au o puritate mai mare de 95%, un diametru exterior mai mic de 8 nm, un diametru interior între 2 și 5 nm și o lungime de 5 – 20 μm.

N-butanolul ($C_4H_{10}O$) a fost utilizat drept solvent pentru a facilita dispersia nanoparticulelor și a asigura o omogenizare optimă a amestecului. Acesta prezintă avantaje semnificative în comparație cu alcoolii cu lanțuri de hidrocarburi mai scurte, precum metanolul (CH_3OH) și etanolul (C_2H_5OH), atunci când este amestecat cu motorina. Aceste avantaje includ o miscibilitate superioară, o tendință redusă de absorbție a apei (hidrofilicitate scăzută) și proprietăți fizico-chimice mai apropiate de cele ale motorinei [69].

Pentru prepararea combustibilului B7S5C100-S s-a optat pentru utilizarea surfactantului Span 60. În alegerea acestui surfactant s-a ținut cont de balanța hidrofil-lipofilă (HLB). HLB este un parametru folosit pentru a descrie echilibrul dintre componentele hidrofile (solubile în apă) și lipofile (solubile în ulei) ale unui surfactant. Valorile HLB se situează pe o scară de la 0 la 20. Surfactanții cu valori HLB sub 10 sunt predominant lipofili, având o afinitate pentru

substanțele uleioase, iar acest efect devine mai pronunțat pe măsură ce valoarea scade. Pe de altă parte, surfactanții cu valori HLB peste 10 sunt predominant hidrofili, având o afinitate mai mare pentru apă. În cazul Span 60, valoarea HLB este egală cu 4,3, ceea ce îl face potrivit pentru utilizarea în motorină [70].

Aditivarea cu nanoparticule a unui amestec motorină-biodiesel, utilizând n-butanolul pe post de solvent reprezintă un element de noutate deoarece dintre studiile bibliografice citate doar în [21] s-a aditivat combustibilul BB40 (60% biodiesel+40% n-butanol) cu nanoparticule de oxid de grafen (GO), nanoplăci de grafen (GN) și MWCNT, utilizând n-butanolul pe post de solvent.

De asemenea, s-a determinat indicele de refracție pentru toți combustibilii considerați și s-a evaluat stabilitatea combustibililor B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 prin teste de tip DLS (Dynamic Light Scattering – Împrăștierea Dinamică a Luminii).

Procedura de preparare a amestecurilor combustibile B7S5, B7S5C25, B7S5C50, B7S5C100 și B7S5C100-S a fost descrisă în detaliu în teza de doctorat. În cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule aceasta a inclus utilizarea unui omogenizator cu ultrasunete Sonics Vibra-Cell și a unui agitator mecanic Ultra Turrax.

Pentru determinarea densității combustibililor s-a utilizat un picnometru. Determinarea cu picnometrul este o metodă folosită frecvent pentru stabilirea densității produselor petroliere. Determinarea vâscozității s-a realizat cu un vâscozimetru Ostwald. Acesta este cunoscut și sub denumirea de vâscozimetru capilar și este utilizat pentru a determina vâscozitatea unui lichid cu densitatea cunoscută [71]. Indicele de refracție al combustibililor s-a determinat cu un refractometru Abbe Krüss AR-2. Analizele DLS s-au realizat cu echipamentul Beckman Coulter N4 Plus, capabil să determine dimensiuni de particule suspendate în lichid cuprinse între 3 nm și 3 μm. Acesta este echipat cu un sistem optic ce include șase fibre optice dispuse la unghiuri fixe pentru detecția împrăștierii luminii (14,9°; 20,6°; 30,4°; 40,2°; 50,4° și 90°). Acestea permit o analiză multi-unghiulară a particulelor, îmbunătățind precizia măsurătorilor [72].

Figura 2. A ilustrează valorile densității combustibililor la temperaturile de 15 °C și 40 °C, alături de diferențele relative calculate pentru combustibilii aditivați cu nanoparticule, luând ca referință combustibilul de bază (B7S5). Rezultatele experimentale obținute evidențiază faptul că toți combustibilii preparați prezintă densități la 15 °C situate în intervalul impus de standardul SR EN 590:2022 pentru motorină comercializată în perioada de tranziție (815 - 845 kg/m^3). Diferențele relative calculate confirmă observațiile raportate anterior, indicând un impact redus al nanoparticulelor asupra densității, explicabil prin dozajele foarte mici utilizate.

Figura 2. B prezintă valorile vâscozității cinematice a combustibililor la temperatura de 40 °C, valorile medii calculate și diferențele relative în cazul combustibilii aditivați cu nanoparticule luând ca referință combustibilul de bază (B7S5). Prezența n-butanolului în compoziția amestecului B7S5 conduce la o scădere a vâscozității cu 9,24% comparativ cu B7. Aditivarea cu 25 ppm MWCNT determină o reducere suplimentară a vâscozității cu 2,21%, în timp ce la concentrații mai ridicate se observă o ușoară creștere a acesteia, respectiv cu 2,77% pentru 50 ppm și cu 2,56% pentru 100 ppm. În cazul combustibilului B7S5C100-S, utilizarea surfactantului Span 60 conduce la o reducere a vâscozității cu 1,99%. Toți combustibilii analizați se încadrează în limitele de vâscozitate prevăzute de standardul SR EN 590:2022 (2 – 4,5 mm^2/s). Stabilitatea sporită a probelor este esențială pentru a asigura o curgere uniformă a combustibilului prin tubul capilar în timpul determinărilor, iar adaosul de Span 60 a condus la o dispersie mai redusă a valorilor vâscozității cinematice, indicând o stabilitate îmbunătățită a combustibilului B7S5C100-S comparativ cu B7S5C100.

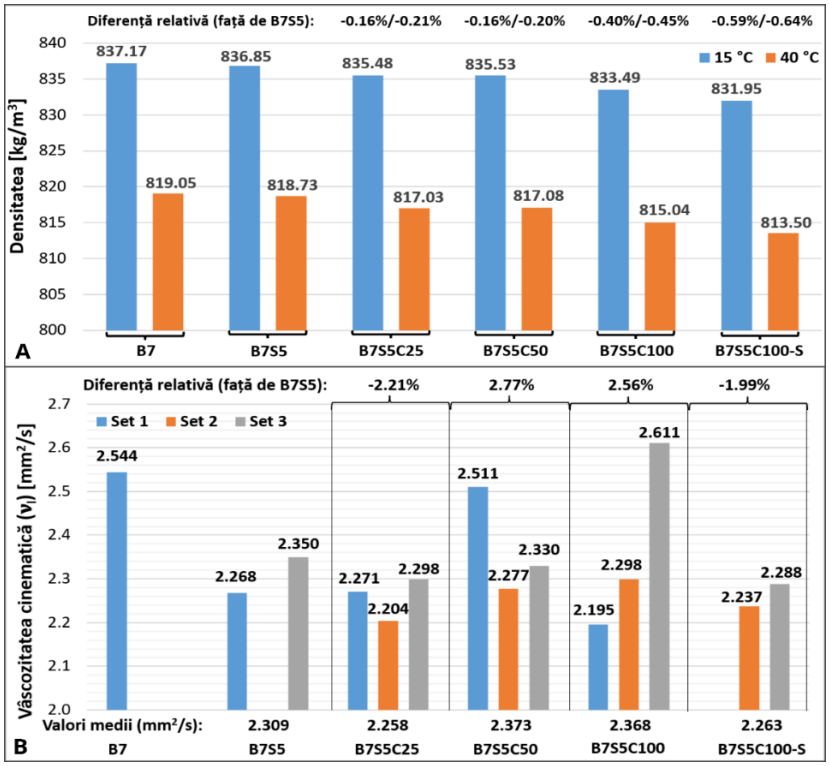


Figura 2. A. Densitatea combustibililor la temperaturile de 15, 40 °C. B. Vâscozitatea cinematică a combustibililor la temperatura de 40 °C

În ceea ce privește indicele de refracție, valorile determinate au fost foarte apropiate pentru toți combustibilii investigați, sugerând că atât aditivarea cu n-butanol, cât și prezența nanoparticulelor în concentrații reduse și utilizarea surfactantului Span 60 nu influențează semnificativ această proprietate optică.

Testele de tip DLS au indicat o stabilitate bună a combustibililor aditivați cu nanoparticule pentru concentrațiile de 25 și 50 ppm. La dozajul de 100 ppm, aceasta poate fi îmbunătățită fie prin utilizarea unor nanoparticule funcționalizate sau a surfactantului Span 60.

4. Studiu experimental într-o celulă experimentală închisă privind determinarea caracteristicilor macroscopice ale jetului de combustibil

Capitolul 4 a continuat cercetarea printr-un studiu experimental realizat într-o celulă experimentală închisă, destinat determinării unor caracteristici macroscopice, precum penetrația și unghiul conului de pulverizare în cazul unei injecții de combustibil B7, la o presiune de 260 bar, în azot (40 bar, 293 K), utilizând un injector Delphi cu 5 orificii, ce echipează motorul Diesel UTB 2404055.

În partea inițială, capitolul a inclus un studiu bibliografic realizat pe baza referințelor [73–81] în care s-a prezentat un stand experimental pentru analiza injecției, precum și considerațiile teoretice privind tehnica Schlieren, etapele esențiale ale prelucrării imaginilor brute și procesării ulterioare și câteva rezultate obținute de cercetători cu privire la această temă.

Ulterior, a fost prezentat standul propriu (Figura 3), distribuția unghiulară a celor cinci jeturi de combustibil și a fost identificat acel jet ce s-a dezvoltat pe un plan paralel cu planul de observare (jetul de interes). Au fost descriși parametrii de lucru și prezentate câteva cadrele brute obținute în urma experimentelor. A fost descris procedeul de prelucrare și procesare a cadrelor în vederea determinării variației penetrației și a unghiului conului de pulverizare pe durata injecției. În final, au fost comentate variațiile obținute.

Pentru analiza distribuției jeturilor de combustibil, a fost capturat un cadru prin orificiul de scurgere al celulei experimentale, care a fost ulterior procesat cu ajutorul unui script realizat în MATLAB. Deoarece pe cadrele obținute în urma determinărilor experimentale, în vecinătatea jetului de interes erau prezente alte două jeturi, a fost necesară definirea unei regiuni în interiorul căreia să se realizeze analiza printr-un alt script realizat în MATLAB. Ulterior, a fost dezvoltat un al treilea script MATLAB, destinat prelucrării și analizei acestor cadre, având ca obiectiv determinarea axei jetului de interes, a penetrației, precum și a ariei totale, respectiv până la jumătate din penetrație. Pentru conversia rezultatelor obținute, a fost realizat un alt script MATLAB prin care s-a determinat diametrului ferestrei celulei experimentale în pixeli, iar ulterior s-au calculat factori de conversie din pixeli în mm pentru penetrație, respectiv în mm^2 pentru arie.



Figura 3. Stand experimental pentru studiul dezvoltării jetului de combustibil

Analiza rezultatelor experimentale a evidențiat o distribuție asimetrică a jeturilor de combustibil. Evoluția temporală a penetrației (Figura 4. A) a indicat o creștere progresivă a acesteia până în apropierea peretelui celulei experimentale. Unghiul conului de pulverizare (Figura 4. B) a prezentat valori ridicate la începutul injecției, urmate de o reducere rapidă și o stabilizare ulterioară. Variațiile determinate pentru penetrație și unghiul conului de pulverizare în cazul combustibilului B7 sunt similare cu cele determinate în alte studii experimentale.

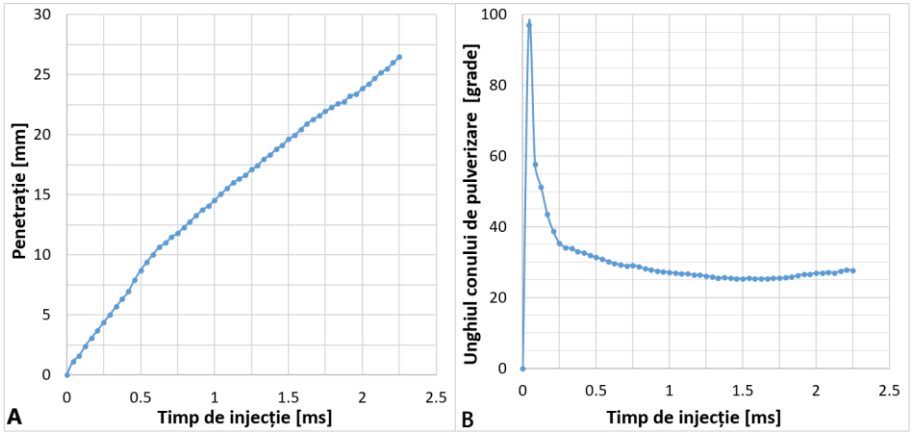


Figura 4. Variația penetrației (A) și a unghiului conului de pulverizare (B) cu timpul de injecție

Rezultatele obținute au fost utilizate în cadrul Capitolului 5 pentru calibrarea unui model de simulare CFD care a permis determinarea diametrului mediu Sauter pentru combustibilii B7, B7S5, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100, a căror proprietăți fizico-chimice au fost determinate în cadrul Capitolului 3.

5. Determinarea prin simulare a caracteristicilor jetului și formării amestecului în cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule

Capitolul 5 include două investigații prin simulări numerice menite să determine caracteristicile jetului în cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule.

Prima investigație a constat într-o simulare uni-dimensională realizată în AVL BOOST Hydsim, utilizată pentru a analiza dezvoltarea jetului în motorul Diesel de tractor UTB 2404055 pe perioada întârzierii la autoaprindere la regimul de putere maximă al motorului. Astfel, în model s-au luat în considerare pompa cu distribuitor rotativ și pistoane plonjoare DP200, precum și injectoarele Delphi care echipează acest motor.

S-au determinat variațiile penetrației, unghiului conului de pulverizare și diametrului mediu Sauter pentru două amestecuri combustibile: E20SF2 (78% motorină, 20% etanol și 2% surfactant 1-decanol) și MF15 (85% motorină și 15% 2-metil-furan), aditivate cu nanoparticule de tip CeO_2 și MWCNT în concentrații de 25, 50 și 100 ppm. Valorile proprietăților fizico-chimice ale acestor combustibili au fost preluat din studiile [8,55]. Calibrarea modelului de simulare a fost realizată pentru combustibilul E20SF2 pe baza legii de ridicare a acului injectorului și presiunii din rampa de injecție.

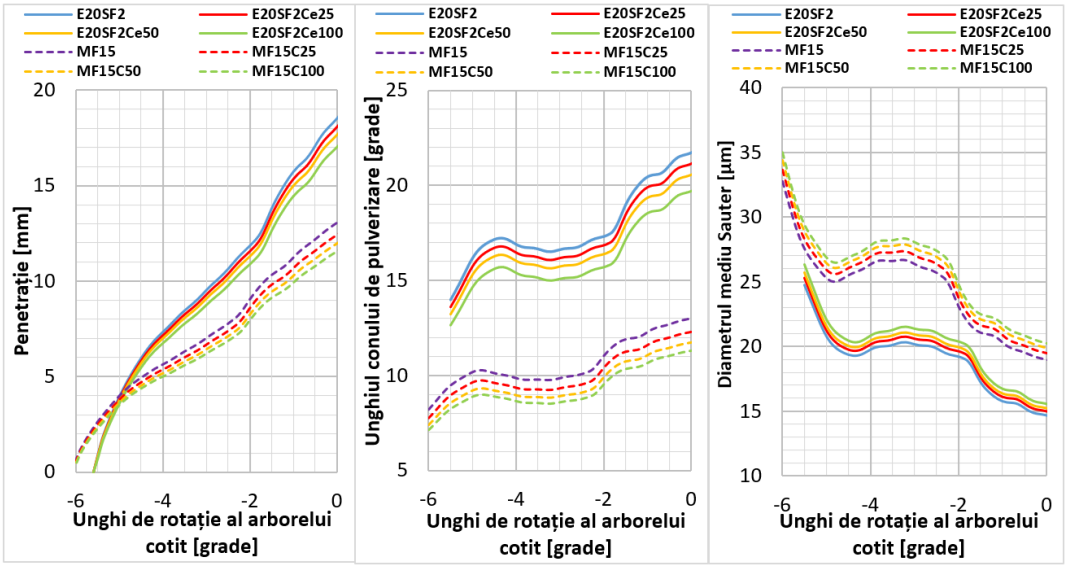


Figura 5. Variația penetrației, unghiului conului de pulverizare și diametrului mediu Sauter în funcție de poziția arborelui cotit

Variațiile penetrației, unghiului conului de pulverizare și diametrului mediu Sauter în funcție de poziția arborelui cotit (Figura 5) au prezentat tendințe similare, indiferent de combustibilii utilizați și de prezența nanoparticulelor. Aditivarea cu nanoparticule a determinat o reducere a penetrației și a unghiului conului de pulverizare, dar și o creștere a diametrului mediu Sauter

pentru ambii combustibili. Diametrul mediu Sauter, esențial pentru procesul de vaporizare, a avut valori descrescătoare cu o tendință cvasi-lineară, cele mai mari valori fiind înregistrate în cazul combustibililor aditivi cu cele mai mari dozaje de nanoparticule.

Deși în literatura de specialitate mai multe studii consideră aditivarea cu nanoparticule ca fiind o metodă prin care injecția este îmbunătățită, rezultatele obținute au arătat că nu este obținută o îmbunătățire a pulverizării în cazul combustibililor aditivați cu nanoparticule. De asemenea, valorile mai ridicate ale tensiunii superficiale și vâscozității în cazul combustibililor aditivați, ar fi trebuit să conducă la o penetrație mai mare comparativ cu combustibilii de bază. Astfel, necesitatea utilizării unui model de simulare multi-dimensională a fost considerată ca fiind esențială, având în vedere limitările modelului de simulare uni-dimensională.

Cea de-a doua investigație a presupus dezvoltarea unui model de simulare multi-dimensională, în cadrul programului ANSYS Fluent 2025 (versiunea student), pentru celula experimentală închisă cu scopul de a determina diametrul mediu Sauter în cazul unor injecții de B7, B7S5, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 într-un timp de 0,4 ms (aproximativ egal cu durata întârzierii la autoaprindere a motorului Diesel UTB 2404055 la regimul de putere maximă). Configurarea modelului s-a realizat pe baza datelor experimentale proprii din Capitolele 3 și 4, printre care densitatea și vâscozitatea combustibililor și unghiul conului de pulverizare determinat pentru B7. Totuși, valorile tensiunii superficiale pentru combustibilii neaditivați (B7 și B7S5) au fost preluate din lucrarea [82], iar ulterior au fost aplicate aceleași diferențe procentuale de variație ale tensiunii superficiale la aditivarea cu 25, 50 și 100 ppm MWNCT față de combustibilul de bază (B7S5) ca cele calculate în cazul lucrării [55]. Modelul a fost calibrat în funcție de variația penetrației, determinată experimental pentru B7, iar validarea rezultatelor s-a realizat analitic prin aplicarea formulei lui Elkotb.

Inițial, a fost efectuată o scurtă cercetare bibliografică privind modul de lucru, parametrii considerați și rezultatele raportate. Ulterior, au fost prezentate geometria și discretizarea modelului propriu, parametrii utilizați în configurare și rezultatele obținute.

Analiza rezultatelor obținute a indicat o bună stabilitate a modelului, toate iterațiile atingând convergența la fiecare pas de timp. Variația penetrației determinată prin simulare pentru combustibilul B7 s-a apropiat de cea obținută experimental, ceea ce a permis calibrarea modelului numeric pe baza datelor experimentale proprii.

Evoluția diametrului mediu Sauter în timpul injecției a evidențiat o scădere rapidă în faza inițială, urmată de o reducere progresivă cu o viteză mai mică, aceasta fiind în concordanță cu rezultatele raportate în literatura de specialitate.

Figura 6 prezintă valorile diametrului mediu Sauter, determinate atât prin simulare, cât și analitic, la 0,4 ms de la începutul injecției pentru combustibilii analizați în acest studiu. În partea superioară a graficului sunt indicate diferențele procentuale dintre valorile obținute prin simulare și cele calculate analitic. Validarea analitică realizată prin aplicarea formulei lui Elkotb a confirmat acuratețea estimării diametrului mediu Sauter, diferențele procentuale determinate fiind reduse pentru toți combustibilii investigați. Deși adaosul de nanoparticule a crescut tensiunea superficială la toate dozajele și vâscozitatea la concentrații de peste 50 ppm, avantajul utilizării butanolului ca solvent, care are o vâscozitate și o tensiune superficială mai mici în comparație cu cele ale combustibilului B7, nu a fost eliminat. Astfel, valorile diametrului mediu Sauter pentru toate amestecurile au rămas inferioare celor obținute pentru B7, ceea ce indică faptul că atomizarea combustibilului a rămas îmbunătățită.

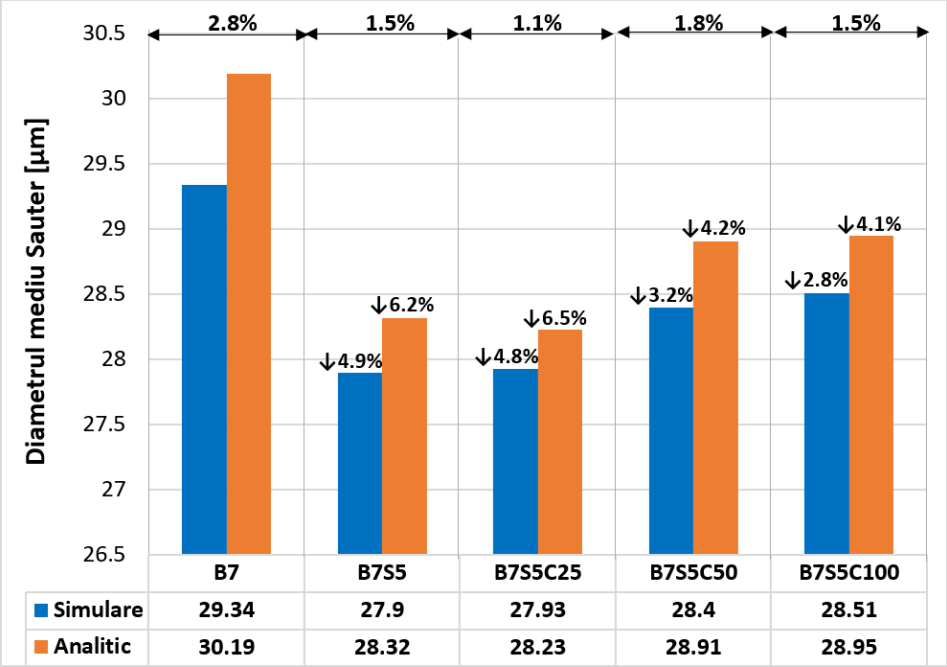


Figura 6. Diametrul mediu Sauter la 0,4 ms de la începutul injecției (simulare vs analitic) pentru combustibilii analizați

6. Determinarea experimentală a performanței, economicității și emisiilor poluante ale unui motor Diesel alimentat cu combustibili alternativi aditivați cu nanoparticule de tip nanotuburi de carbon

În acest capitol s-a determinat experimental în ce măsură combustibilii B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 pot conduce la îmbunătățirea performanțelor, economicității și la reducerea emisiilor poluante ale motorului Diesel de tractor UTB 2404055.

S-a realizat o descriere a standului, a modului de lucru și a regimurilor de funcționare investigate. S-au prezentat variațiile medii ale ***parametrilor cu variație rapidă*** (presiunea în rampa de injecție, legea de ridicare a acului injectorului, viteza de degajare a căldurii și presiunea din interiorul cilindrului). De asemenea, s-au prezentat valorile ***parametrilor cu variație lentă*** înregistrate pentru fiecare determinare în parte și s-au comentat valorile medii ale parametrilor de performanță, economicitate și emisii poluante obținute la alimentarea cu B7, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100.

Motorul este instalat într-o celulă de testare dotată cu echipamente specializate pentru efectuarea investigațiilor experimentale (Figura 7). Determinările au fost realizate considerând două regimuri de funcționare ale motorului: regimul de cuplu maxim (1400 rpm) și regimul de putere maximă (2400 rpm). S-au efectuat cel puțin cinci determinări pentru fiecare combustibil la ambele regimuri.

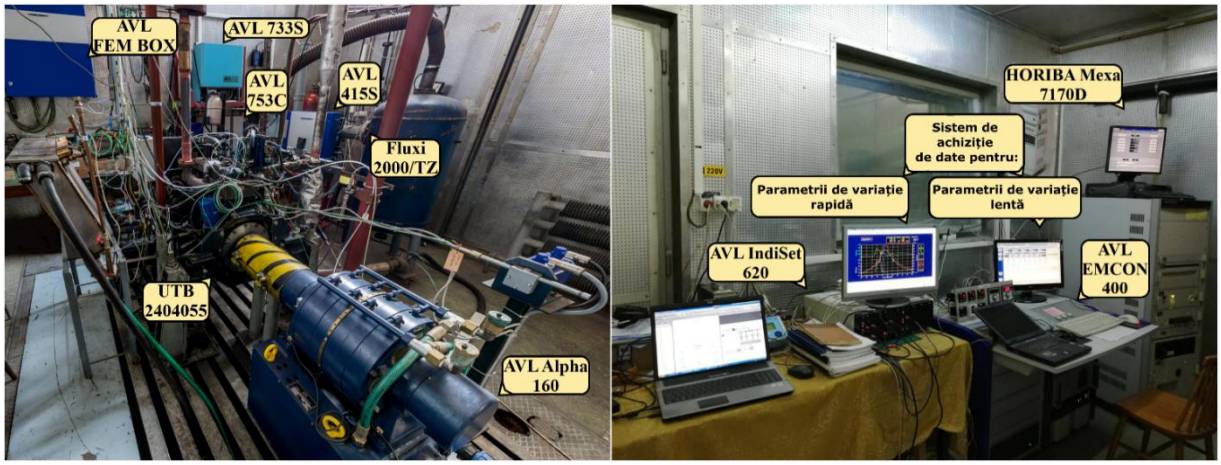


Figura 7. Celula de testare a motorului și camera de comandă

Aditivarea motorinei comerciale B7 cu 5% n-butanol și nanoparticule MWCNT nefuncționalizate nu a produs modificări semnificative ale evoluției presiunii în rampa de injecție la regimul de cuplu maxim, iar la regimul de putere maximă influențele observate au fost moderate. Diferențele minore identificate în legile de ridicare a acului injectorului au fost atribuite modificării proprietăților fizico-chimice ale combustibililor. Pentru ambele regimuri de funcționare, creșterea dozajului de nanoparticule de la 25 la 100 ppm a condus la majorarea întârzierii la autoaprindere și a valorii maxime a vitezei de degajare a căldurii, în timp ce presiunea maximă din cilindru a prezentat variații ușoare, fără a afecta forma generală a diagramei de presiune.

Figura 8 prezintă valorile randamentului efectiv, emisiilor de HC, CO, concentrației de particule, NO_x și opacitatea fumului înregistrate pentru combustibilii B7, B7S5C25, B7S5C50

și B7S5C100, la cele două regimuri de funcționare ale motorului Diesel, la sarcină plină. Dozajul de 50 ppm de nanoparticule MWCNT nefuncționalizate s-a evidențiat ca fiind optim, asigurând o eficiență maximă a funcționării motorului. Acesta a determinat creșteri notabile ale randamentului efectiv la ambele regimuri de funcționare considerate. La regimul de cuplu maxim, acesta a asigurat emisii de HC și CO minime, scăderea semnificativă a concentrației de particule și a reprezentat un compromis între tendințele de creștere a emisiilor de NO_x și de scădere a opacității fumului. La regimul de putere maximă a asigurat valori minime ale emisiilor de CO și opacității fumului, cu reduceri ale emisiilor de HC, concentrației de particule , însoțite de o ușoară creștere a emisiilor de NO_x.

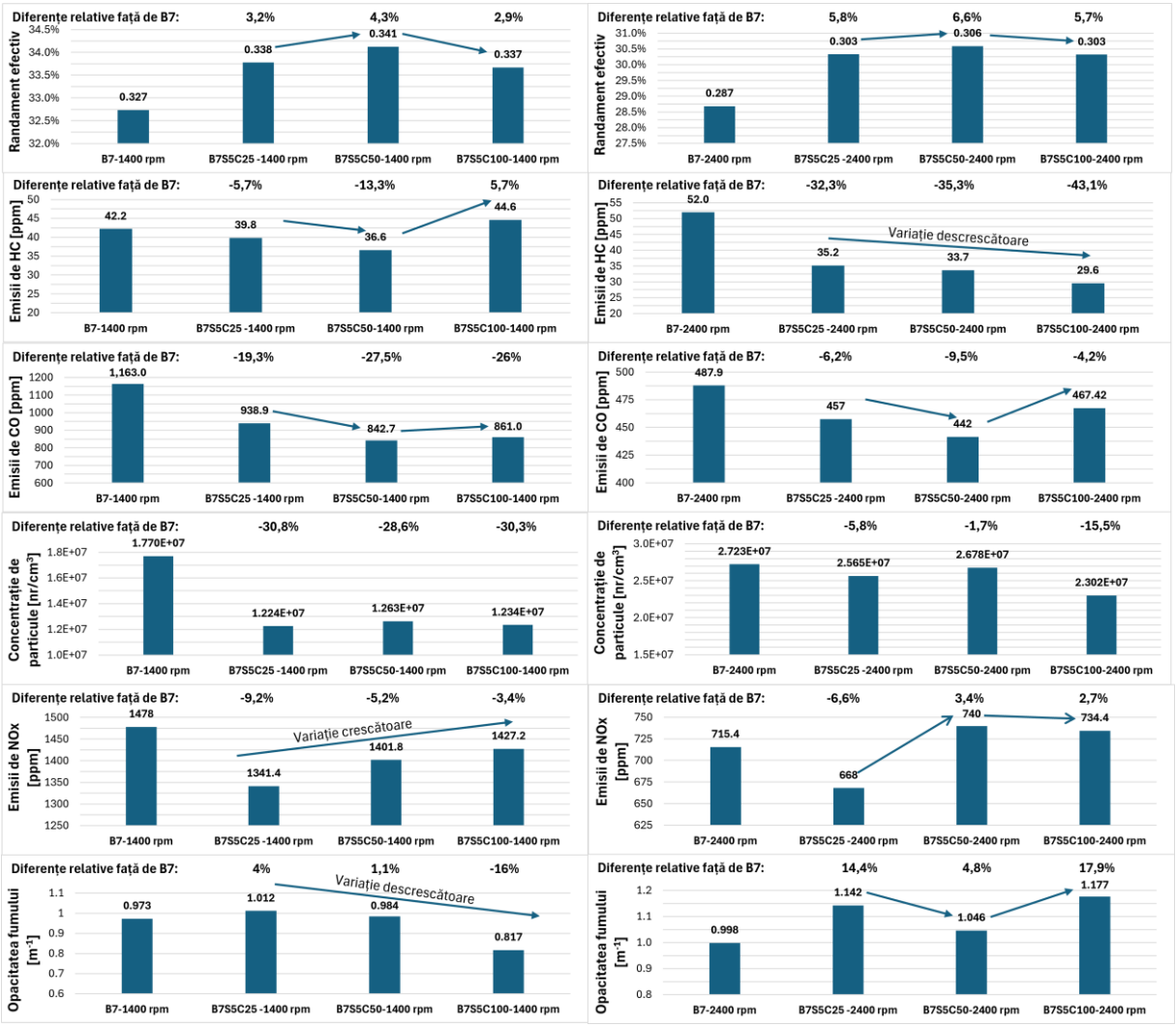


Figura 8. Valorile randamentului efectiv, emisiilor de HC, CO, concentrației de particule, NO_x și opacitatea fumului la alimentarea cu B7, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 pentru cele două regimuri de funcționare ale motorului: 1400 rpm – cuplu maxim; 2400 rpm – putere maximă

7. Corelații posibile între regimul funcțional caracterizat de parametrii de performanță, economicitate, emisii poluante și dozajele de nanoparticule de tip nanotuburi de carbon utilizate în combustibilii aditivați

Capitolul 7 a debutat cu o cercetare bibliografică având ca obiectiv evaluarea efectelor utilizării combustibililor aditivați cu nanoparticule MWCNT asupra economicității și emisiilor poluante ale motoarelor Diesel. În acest scop s-au realizat trei tabele de sinteză. Acestea au fost construite pe baza referințelor bibliografice [52,83–96] și includ informații privind combustibilul de bază, valorile randamentului efectiv, consumului specific efectiv de combustibil, emisiilor de NO_x, fum, HC și CO, atât înainte, cât și după aditivare. De asemenea, au fost menționate dozajul de nanoparticule, regimul de funcționare stabilizat la care au fost înregistrate valorile, denumirea comercială a motorului utilizat în fiecare studiu și diferențele relative calculate considerând ca referință valorile raportate pentru combustibilul de bază. Pe baza diferențelor procentuale calculate s-au realizat ulterior șase figuri și s-au comentat tendințele observate.

Datele au indicat existența unei tendințe de creștere a randamentului efectiv, de scădere a consumului specific efectiv de combustibil și de reducere a emisiilor de NO_x, fum, CO și HC după aditivarea cu nanoparticule MWCNT.

Ulterior, s-au stabilit corelații care să evidențieze influența dozajului de nanoparticule MWCNT nefuncționalizate asupra performanței (presiunea medie efectivă), economicității (consumul specific efectiv de combustibil și randamentul efectiv) și emisiilor poluante (NO_x, fum, HC și CO) ale motoarelor cu aprindere prin comprimare pe baza datelor din lucrările [52,83–96] cuprinse în cercetarea bibliografică realizată. De asemenea, s-a investigat în ce măsură valorile experimentale proprii din Capitolul 6, determinate la cele două regimuri de funcționare ale motorului Diesel UTB 2404055, la alimentarea cu combustibilii B7, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100 se apropie de corelațiile stabilite.

Pentru fiecare parametru menționat anterior au fost stabilite patru corelații liniare în funcție de dozaj. Prima corelație a fost determinată luând în considerare totalitatea valorilor corespunzătoare fiecărui dozaj individual. A doua corelație a fost realizată utilizând valorile medii aferente fiecărui dozaj. Celelalte două corelații au vizat efectele aditivării cu MWCNT: una a fost stabilită pe baza tuturor diferențelor procentuale calculate pentru fiecare dozaj în parte, iar cealaltă pe baza diferențelor procentuale medii corespunzătoare fiecărui dozaj analizat. Figura 9 prezintă ca exemplu corelațiile stabilite pentru randamentul efectiv.

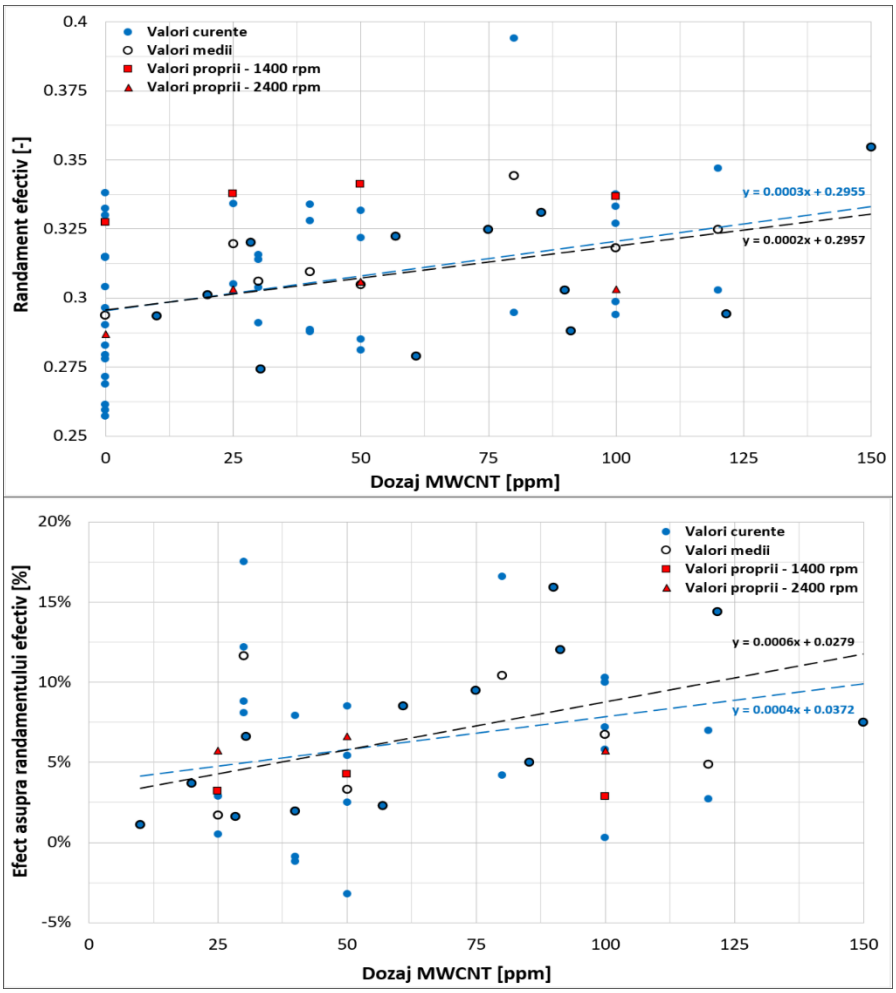


Figura 9. Corelații existente între valorile randamentului efectiv, efectul produs asupra acestuia și dozajul de nanoparticule MWCNT

Majoritatea determinărilor experimentale din studiile [52,83–96] au fost realizate la presiune medie efectivă constantă. Din acest motiv, au fost determinate valorile consumului orar de combustibil pentru combustibilii de bază (neadditivați) cunoscând valorile consumului specific efectiv, iar ulterior s-a considerat constant consumul orar de combustibil, pentru a putea permite variația presiunii medii efective la utilizarea combustibililor aditivați cu nanoparticule.

Deoarece emisiile de NO_x, HC și CO au fost raportate în literatura de specialitate [52,83–96] fie în ppm, fie în g/kWh, pentru stabilirea corelațiilor au fost luate în considerare exclusiv lucrările care au raportat valorile în ppm, acestea fiind majoritare. De asemenea, majoritatea studiilor au raportat valori ale opacității fumului, însă utilizând unități de măsură diferite (g/kWh, %, HSU sau m^{-1}). În consecință, pentru realizarea corelațiilor s-a realizat conversia tuturor valorilor raportate într-o unitate de măsură comună, respectiv m^{-1}.

Analiza corelațiilor stabilite a evidențiat, în ansamblu, o influență favorabilă a dozajului de nanoparticule MWCNT asupra performanței, economicității și emisiilor poluante ale

motoarelor cu aprindere prin comprimare. Presiunea medie efectivă a prezentat o tendință generală de creștere cu dozajul de MWCNT, însă valorile experimentale proprii nu au reflectat această creștere, ca urmare a faptului că consumul orar de combustibil nu a fost menținut constant. În schimb, randamentul efectiv a crescut odată cu dozajul, iar rezultatele experimentale proprii la regimul de putere maximă s-au aliniat bine corelațiilor stabilite până la dozajul de 50 ppm, identificat ca optim. Consumul specific efectiv de combustibil a prezentat o tendință descrescătoare cu dozajul de MWCNT, iar rezultatele experimentale proprii au confirmat această tendință, cu o concordanță mai bună în cazul regimului de putere maximă și până la dozajul de 50 ppm. În ceea ce privește emisiile poluante, corelațiile pentru NO_x au indicat tendințe diferite în funcție de abordarea utilizată, diferențele fiind atribuite variabilității ridicate a datelor experimentale din literatură. Totuși, valorile proprii s-au apropiat de corelațiile bazate pe valori medii, în special la regimul de putere maximă. Pentru opacitatea fumului, HC și CO, corelațiile au indicat o tendință de scădere a emisiilor odată cu creșterea dozajului de MWCNT. În cazul opacității fumului, valorile experimentale proprii au fost mai mici decât cele estimate, iar în ceea ce privește efectele, o corespondență bună cu estimările corelațiilor s-a observat doar la dozajul de 100 ppm, pentru regimul de cuplu maxim. Pentru emisiile de HC, valorile proprii s-au apropiat de tendința estimată de corelația în baza pe valorile individuale, iar diferențele procentuale până la 50 ppm, la regimul de cuplu maxim, au fost apropiate de regresiile liniare. În cazul emisiilor de CO, valorile proprii s-au aliniat cu corelațiile stabilite până la 50 ppm pentru ambele regimuri, iar la regimul de putere maximă diferențele procentuale pentru 25 și 50 ppm au fost cele mai apropiate de corelațiile liniare.

8. Concluzii, contribuții și recomandări pentru cercetări viitoare

Capitolul 8 a sintetizat principalele rezultate obținute în cadrul tezei de doctorat, evidențiind concluziile finale, contribuțiile personale și direcțiile de dezvoltare pentru cercetări viitoare privind utilizarea nanoparticulelor MWCNT ca aditivi pentru combustibili Diesel. Cercetarea a integrat studii experimentale, numerice și analize bibliografice, având ca obiectiv evaluarea influenței aditivării cu nanoparticule asupra proprietăților fizico-chimice ale combustibililor, caracteristicilor jetului de combustibil, performanței, economicității și emisiilor poluante ale motoarelor cu aprindere prin comprimare.

Determinările experimentale privind proprietățile fizico-chimice ale combustibililor au demonstrat că amestecurile investigate respectă cerințele standardului pentru motorina comercială, iar influența nanoparticulelor asupra densității este redusă, ca urmare a dozajelor

utilizate. Aditivarea cu n-butanol a condus la o scădere a vâscozității cinematice, în timp ce adaosul de nanoparticule MWCNT a determinat variații moderate, dependente de concentrație. Evaluarea stabilității prin teste de tip DLS a confirmat o stabilitate adecvată pentru concentrațiile de 25 și 50 ppm, iar pentru concentrații mai ridicate stabilitatea poate fi îmbunătățită prin utilizarea surfactantului Span 60 sau nanoparticulelor funcționalizate.

Analiza jetului de combustibil, realizată într-o celulă experimentală închisă, a evidențiat o distribuție asimetrică a jeturilor în cazul injectorului utilizat, precum și variații ale penetrației și ale unghiului conului de pulverizare comparabile cu cele raportate în literatura de specialitate. Aceste rezultate au constituit baza pentru dezvoltarea și calibrarea modelului de simulare multi-dimensională.

În cadrul tezei au fost dezvoltate două modele de simulare pentru analiza caracteristicilor jetului de combustibil. Modelul uni-dimensional a evidențiat limitările abordărilor simplificate în evaluarea efectelor aditivării cu nanoparticule asupra pulverizării, în timp ce modelul multi-dimensional, calibrat și validat pe baza datelor experimentale proprii a permis estimarea diametrului mediu Sauter, iar validarea analitică a confirmat acuratețea rezultatelor obținute. Rezultatele obținute au arătat că, deși aditivarea cu nanoparticule a condus la creșteri ale vâscozității și tensiunii superficiale la anumite dozaje, avantajele utilizării n-butanolului ca solvent nu au fost eliminate, iar calitatea atomizării a rămas îmbunătățită comparativ cu motorina de referință.

În urma investigațiilor experimentale realizate pe motorul Diesel UTB 2404055, alimentat cu motorină (B7) cu un conținut de 5% n-butanol și nanoparticule MWCNT nefuncționalizate în diverse dozaje, a fost identificat un dozaj optim de 50 ppm, care a asigurat un randament efectiv maxim la ambele regimuri de funcționare ale motorului și reduceri ale emisiilor poluante în aproape toate cazurile.

Cercetarea bibliografică a permis stabilirea unor corelații între dozajul de nanoparticule MWCNT și parametrii de performanță, economicitate și emisiile poluante ale motoarelor Diesel. Aceste corelații au indicat tendințe de creștere a presiunii medii efective, randamentului efectiv și de scădere a consumul specific efectiv de combustibil, precum și reduceri ale emisiilor de fum, HC și CO, în timp ce în cazul emisiilor de NO_x s-a remarcat o diferență între corelațiile bazate pe valori, care au sugerat o ușoară creștere cu dozajul, și cele bazate pe efecte, care au indicat o tendință descrescătoare. Această discrepanță a fost atribuită variabilității mari a datelor experimentale cauzate de diferențele între motoare, condițiile de testare și tipul combustibililor.

Contribuțiile personale ale tezei constau în prepararea combustibililor aditivați cu nanoparticule, determinarea unor proprietăți fizico-chimice și evaluarea stabilității acestora, precum și în dezvoltarea unui stand experimental care a permis obținerea de imagini cu dezvoltarea jetului de combustibil B7 injectat în azot, într-o celulă experimentală închisă, prin utilizarea tehnicii Schlieren, urmată de aplicarea unor procedee specifice de prelucrare a imaginilor obținute. Au fost dezvoltate două modele de simulare pentru analiza caracteristicilor jetului de combustibil aditivat cu nanoparticule în motor, respectiv în celula experimentală închisă. A fost realizat totodată un script de tip Journal pentru afișarea în consola ANSYS Fluent a valorilor diametrului mediu Sauter. Au fost realizate seturi de determinări experimentale pe motorul Diesel UTB 2404055, la două regimuri de funcționare, la alimentarea cu combustibilii B7, B7S5C25, B7S5C50 și B7S5C100, fiecare determinare fiind repetată de cel puțin cinci ori pentru a asigura o fiabilitate sporită a datelor, în vederea realizării unei analize comparative a parametrilor de performanță, economicitate și emisii poluante. Totodată, au fost formulate corelații care evidențiază influența dozajului de nanoparticule MWCNT nefuncționalizate asupra performanței, economicității și emisiilor poluante ale motoarelor Diesel, pe baza datelor raportate în literatura de specialitate, fiind analizată ulterior măsura în care valorile experimentale proprii se apropie de corelațiile stabilite.

În final, au fost propuse direcții de cercetare viitoare care vizează îmbunătățirea standului experimental pentru determinarea caracteristicilor jetului de combustibil prin controlul temperaturii azotului din interiorul celulei experimentale și prin implementarea unui sistem de injecție electronică. De asemenea, este avută în vedere îmbunătățirea modelului de simulare uni-dimensional prin adoptarea unor proprietăți fizico-chimice variabile cu presiunea. Optimizarea modelului de simulare multi-dimensional poate fi realizată prin creșterea temperaturii azotului din celula experimentală la valori cât mai apropiate de cele existente în cilindrii unui motor Diesel la începutul procesului de injecție, precum și definirea particulelor injectate ca fiind de tip „multicomponent”, pentru a permite o evaluare mai realistă a procesului complex de atomizare secundară, influențat de apariția microspargerilor și a fenomenului de „puffing”, ambele având un impact semnificativ asupra calității jetului de combustibil. În plus, este avută în vedere adoptarea unor dozaje intermediare de nanoparticule, cuprinse între 50 și 100 ppm, întrucât intervalul dintre aceste valori poate fi prea mare, iar dozajul optim ar putea fi situat între acestea. Totodată, utilizarea nanoparticulelor MWCNT funcționalizate cu grupări OH este luată în considerare, întrucât ar putea asigura o stabilitate îmbunătățită în amestecul cu n-butanol, cu potențial de creștere a eficienței motorului și de reducere a emisiilor poluante.

9. Bibliografie

[1] R. Tripathi, P. Negi, Y. Singh, P.S. Ranjit, A. Sharma, Role of nanoparticles as an additive to the biodiesel for the performance and emission analysis of diesel engine - A review, Materials Today: Proceedings 46 (2021) 11222–11225. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.513.

[2] S. Basu, A. Miglani, Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review, International Journal of Heat and Mass Transfer 96 (2016) 482–503. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.053.

[3] T. Kegl, A. Kovač Kralj, B. Kegl, M. Kegl, Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges, Progress in Energy and Combustion Science 83 (2021). https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100897.

[4] H. Venu, V.D. Raju, S. Lingesan, M. Elahi M Soudagar, Influence of Al2O3nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics, Energy 215 (2021) 119091. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119091.

[5] H. Venu, V. Madhavan, Effect of diethyl ether and Al2O3 nano additives in diesel-biodiesel-ethanol blends: Performance, combustion and emission characteristics, Journal of Mechanical Science and Technology 31 (2017) 409–420. https://doi.org/10.1007/s12206-016-1243-x.

[6] B. Dhinesh, M. Annamalai, A study on performance, combustion and emission behaviour of diesel engine powered by novel nano nerium oleander biofuel, Journal of Cleaner Production 196 (2018) 74–83. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.002.

[7] A.K. Hasannuddin, W.J. Yahya, S. Sarah, A.M. Ithnin, S. Syahrullail, N.A.C. Sidik, K.A. Abu Kassim, Y. Ahmad, N. Hirofumi, M.A. Ahmad, D.A. Sugeng, M.A. Zuber, N.A. Ramlan, Nano-additives incorporated water in diesel emulsion fuel: Fuel properties, performance and emission characteristics assessment, Energy Conversion and Management 169 (2018) 291–314. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.070.

[8] L. Bao, W. Fu, F. Li, Y. Liu, H. Bi, C. Jiang, Q. Lin, Experiments on macroscopic spray characteristics of diesel-ethanol with dispersed cerium nanoparticles, Journal of the Energy Institute 93 (2020) 2186–2196. https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.06.001.

[9] A. Prabu, Nanoparticles as additive in biodiesel on the working characteristics of a DI diesel engine, Ain Shams Engineering Journal 9 (2018) 2343–2349. https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.04.004.

[10] B. Ashok, K. Nanthagopal, R. Subbarao, A. Johny, A. Mohan, A. Tamilarasu, Experimental studies on the effect of metal oxide and antioxidant additives with Calophyllum Inophyllum Methyl ester in compression ignition engine, Journal of Cleaner Production 166 (2017) 474–484. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.050.

[11] A. Heidari-Maleni, T.M. Gundoshmian, B. Karimi, A. Jahanbakhshi, B. Ghobadian, A novel fuel based on biocompatible nanoparticles and ethanol-biodiesel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions, Fuel 276 (2020) 118079. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118079.

[12] M. Karagoz, C. Uysal, U. Agbulut, S. Saridemir, Exergetic and exergoeconomic analyses of a CI engine fueled with diesel-biodiesel blends containing various metal-oxide nanoparticles, Energy 214 (2021). https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118830.

[13] M.T. Chaichan, A.A.H. Kadhum, A.A. Al-Amiery, Novel technique for enhancement of diesel fuel: Impact of aqueous alumina nano-fluid on engine's performance and emissions, Case Studies in Thermal Engineering 10 (2017) 611–620. https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.11.006.

[14] V. Dhana Raju, P.S. Kishore, K. Nanthagopal, B.Ashok, An experimental study on the effect of nanoparticles with novel tamarind seed methyl ester for diesel engine applications, Energy Conversion and Management 164 (2018) 655–666. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.032.

[15] S. Dey, N. Moni Reang, M. Deb, P. Kumar Das, Experimental investigation on combustion-performance-emission characteristics of nanoparticles added biodiesel blends and tribological behavior of contaminated lubricant in a diesel engine, Energy Conversion and Management 244 (2021). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114508.

[16] A. Heidari-Maleni, T. Mesri-Gundoshmian, A. Jahanbakhshi, B. Karimi, B. Ghobadian, Novel environmentally friendly fuel: The effect of adding graphene quantum dot (GQD) nanoparticles with ethanol-biodiesel blends on the performance and emission characteristics of a diesel engine, NanoImpact 21 (2021). https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100294.
[17] M.E.M. Soudagar, A. Afzal, M.R. Safaei, A.M. Manokar, A.I. EL-Seesy, M.A. Mujtaba, O.D. Samuel, I.A. Badruddin, W. Ahmed, K. Shahpurkar, M. Goodarzi, Investigation on the effect of cottonseed oil blended with different percentages of octanol and suspended MWCNT nanoparticles on diesel engine characteristics, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2020). https://doi.org/10.1007/s10973-020-10293-x.
[18] S.A. Mirbagheri, S.M. Safieddin Ardebili, M. Kiani Deh Kiani, Modeling of the engine performance and exhaust emissions characteristics of a single-cylinder diesel using nano-biochar added into ethanol-biodiesel-diesel blends, Fuel 278 (2020). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118238.
[19] S. Debbarma, R.D. Misra, B. Das, Performance of graphene-added palm biodiesel in a diesel engine, Clean Technologies and Environmental Policy 22 (2020) 523–534. https://doi.org/10.1007/s10098-019-01800-2.
[20] D. Mei, L. Zuo, D. Adu-Mensah, X. Li, Y. Yuan, Combustion characteristics and emissions of a common rail diesel engine using nanoparticle-diesel blends with carbon nanotube and molybdenum trioxide, Applied Thermal Engineering 162 (2019). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114238.
[21] A.I. EL-Seesy, H. Hassan, Investigation of the effect of adding graphene oxide, graphene nanoplatelet, and multiwalled carbon nanotube additives with n-butanol-Jatropha methyl ester on a diesel engine performance, Renewable Energy 132 (2019) 558–574. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.026.
[22] E. Ettefaghi, B. Ghobadian, A. Rashidi, G. Najafi, M.H. Khoshtaghaza, M. Rashtchi, S. Sadeghian, A novel bio-nano emulsion fuel based on biodegradable nanoparticles to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions, Renewable Energy 125 (2018) 64–72. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.086.
[23] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, E. Khalife, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, M. Khanali, P. Mohammadi, T. Roodbar Shojaei, S. Soltanian, Effects of aqueous carbon nanoparticles as a novel nanoadditive in water-emulsified diesel/biodiesel blends on performance and emissions parameters of a diesel engine, Energy Conversion and Management 196 (2019) 1153–1166. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.077.
[24] M.E.M. Soudagar, M.A. Mujtaba, M.R. Safaei, A. Afzal, D.R. V, W. Ahmed, N.R. Banapurmath, N. Hossain, S. Bashir, I.A. Badruddin, M. Goodarzi, K. Shahapurkar, S.N. Taqui, Effect of Sr@ZnO nanoparticles and Ricinus communis biodiesel-diesel fuel blends on modified CRDI diesel engine characteristics, Energy 215 (2021). https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119094.
[25] Q. Wu, X. Xie, Y. Wang, T. Roskilly, Effect of carbon coated aluminum nanoparticles as additive to biodiesel-diesel blends on performance and emission characteristics of diesel engine, Applied Energy 221 (2018) 597–604. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.157.
[26] L. Jiang, Y.D. Wang, A.P. Roskilly, X.L. Xie, Z.C. Zhang, R.Z. Wang, Investigation on thermal properties of a novel fuel blend and its diesel engine performance, Energy Conversion and Management 171 (2018) 1540–1548. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.085.
[27] Q. Wu, X. Yu, H. Zhang, Y. Chen, L. Liu, X. Xie, K. Tang, Y. Lu, Y. Wang, A.P. Roskilly, Fabrication and thermal conductivity improvement of novel composite adsorbents adding with nanoparticles, Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition) 29 (2016) 1114–1119. https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0810.091.
[28] M. Mirzajanzadeh, M. Tabatabaei, M. Ardjmand, A. Rashidi, B. Ghobadian, M. Barkhi, M. Pazouki, A novel soluble nano-catalysts in diesel-biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions, Fuel 139 (2015) 374–382. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.008.
[29] S. Karthikeyan, A. Prathima, Environmental effect of CI engine using microalgae methyl ester with doped nano additives, Transportation Research Part D: Transport and Environment 50 (2017) 385–396. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.028.

[30] C.H. Sree Harsha, T. Suganthan, S. Srihari, Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine using Biodiesel-Diesel-Nanoparticle Blends-An Experimental Study, Materials Today: Proceedings 24 (2020) 1355–1364. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.453.
[31] O.A. Al-Hartomy, M.A. Mujtaba, A. Al-Ghamdi, J. Iqbal, S. Wageh, Combined effect of Phoenix dactylifera biodiesel and multiwalled carbon nanotube–titanium dioxide nanoparticles for modified diesel engines, International Journal of Environmental Science and Technology 19 (2022) 515–540. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03152-1.
[32] S.Y. No, Definition and Correlation for Spray Angle in Non-Reacting Diesel Fuel Sprays, Journal of ILASS-Korea 11 (2006).
[33] J. Arunprasad, A.N. Krishna, D. Radha, M. Singh, R. Surakasi, T.D. Gidebo, Nanometal-Based Magnesium Oxide Nanoparticle with C. vulgaris Algae Biodiesel in Diesel Engine, Journal of Nanomaterials 2022 (2022). https://doi.org/10.1155/2022/1688505.
[34] A.M. Abdallah, A.A. Abdel-Rahman, A.E. Elwardany, Analysis of the impact of different nanoparticle metal oxides as fuel additives in compression ignition engine performance, Energy Reports 6 (2020) 99–105. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.016.
[35] M. Vinayagam, S.S. Kumar, M.M. Ravikumar, S. Mahendiran, T. Raja, Feasibility and emission study on employing MgO nanoparticle as oxygenated additive in neat biodiesel, International Journal of Ambient Energy 42 (2021) 1629–1634. https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1611659.
[36] T. Özgür, E. Tosun, C. Özgür, G. Tüccar, K. Aydin, Effect of MgO nanoparticule additives on performance and exhaust emissions of diesel fuelled compression ignition engine, MATTER: International Journal of Science and Technology 3 (2017) 72–85. https://doi.org/10.20319/mijst.2017.33.7285.
[37] C. Vijayakumar, A. Murugesan, D. Subramaniam, N. Panneerselvam, An Experimental Investigation of Diesel Engine Fuelled with MgO Nano Additive Biodiesel - Diesel Blends, Bulletin of Scientific Research (2019) 28–34. https://doi.org/10.34256/bsr1924.
[38] J. Arunprasad, T. Elango, Performance and emission characteristics of engine using Naviculla Sp. Algae oil methyl ester with MgO nanoparticles, in: Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd, 2020: pp. 3164–3168. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.094.
[39] A. Ranjan, S.S. Dawn, J. Jayaprabakar, N. Nirmala, K. Saikiran, S. Sai Sriram, Experimental investigation on effect of MgO nanoparticles on cold flow properties, performance, emission and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel, Fuel 220 (2018) 780–791. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.057.
[40] N. Tamil Selvam, A. Devaraj, Emission study on MgO2 nano-additive doped biodiesel on immobile diesel engine, International Journal of Ambient Energy 42 (2021) 1595–1599. https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1611654.
[41] J. Arunprasad, A.S. Sener, R. Thirugnanasambantham, T. Elango, T. Bothichandar, Experimental Investigation of Spirulina Microalgae Biodiesel with Metal Nanoadditive on Single-Cylinder Diesel Engine, Journal of Nanomaterials 2022 (2022). https://doi.org/10.1155/2022/4701610.
[42] M. Channappagoudra, Influence of the aluminium oxide (Al2O3) nanoparticle additive with biodiesel on the modified diesel engine performance, International Journal of Ambient Energy 42 (2021) 1776–1784. https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1614992.
[43] J. Wei, Z. Yin, C. Wang, G. Lv, Y. Zhuang, X. Li, H. Wu, Impact of aluminium oxide nanoparticles as an additive in diesel-methanol blends on a modern DI diesel engine, Applied Thermal Engineering 185 (2021). https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116372.
[44] Y. Kaushik, V. Verma, K.K. Saxena, C. Prakash, L.R. Gupta, S. Dixit, Effect of Al2O3 Nanoparticles on Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Diesel–Neem Biodiesel Blends, Sustainability 14 (2022) 7913. https://doi.org/10.3390/su14137913.
[45] H.A. Dhahad, M.T. Chaichan, The impact of adding nano-Al2O3 and nano-ZnO to Iraqi diesel fuel in terms of compression ignition engines' performance and emitted pollutants, Thermal Science and Engineering Progress 18 (2020). https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100535.
[46] G.M. Lionus Leo, R. Jayabal, D. Srinivasan, M. Chrispin Das, M. Ganesh, T. Gavaskar, Predicting the performance and emissions of an HCCI-DI engine powered by waste cooking oil biodiesel with

Al2O3 and FeCl3 nano additives and gasoline injection – A random forest machine learning approach, Fuel 357 (2024). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129914.
[47] R.L. Krupakaran, G.J. Rani, P. Anchupogu, G.V. Reddy, D.R. Reddy, R.K. Petla, Comparative assessment of MWCNTs and alumina nanoparticles dispersion in biodiesel blend on the engine characteristics of an unmodified DI diesel engine, Materials Today: Proceedings 68 (2022) 1241–1251. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.045.
[48] A.A. Al-Kheraif, A. Syed, A.M. Elgorban, D.D. Divakar, R. Shanmuganathan, K. Brindhadevi, Experimental assessment of performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled by combined non-edible blends with nanoparticles, Fuel 295 (2021). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120590.
[49] H. Venu, V. Madhavan, Effect of Al2O3 nanoparticles in biodiesel-diesel-ethanol blends at various injection strategies: Performance, combustion and emission characteristics, Fuel 186 (2016) 176–189. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.046.
[50] J.B. Ooi, C.C. Kau, D.N. Manoharan, X. Wang, M.V. Tran, Y.M. Hung, Effects of multi-walled carbon nanotubes on the combustion, performance, and emission characteristics of a single-cylinder diesel engine fueled with palm-oil biodiesel-diesel blend, Energy 281 (2023). https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128350.
[51] S. Ramalingam, M. Naresh Babu, Y. Devarajan, M. Dinesh Babu, E.G. Varuvel, Environmental and energy valuation of waste-derived Cymbopogon Martinii Methyl Ester combined with multi-walled carbon (MWCNTs) additives in hydrogen-enriched dual fuel engine, International Journal of Hydrogen Energy 48 (2023) 39641–39657. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.006.
[52] T. Sathish, K. Muthukumar, A.K. Abdulwahab, M. Rajasimman, R. Saravanan, K. Balasankar, Enhanced waste cooking oil biodiesel with Al2O3 and MWCNT for CI engines, Fuel 333 (2023). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126429.
[53] E. Arslan, M. Raşit Atelge, N. Kahraman, S. Ünalan, B.A. Çeper, Examination of the effect on the engine of diesel-nanoparticle mixture with natural gas addition, Fuel 357 (2024). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129911.
[54] H. Solmaz, S.M.S. Ardebili, A. Calam, E. Yılmaz, D. İpci, Prediction of performance and exhaust emissions of a CI engine fueled with multi-wall carbon nanotube doped biodiesel-diesel blends using response surface method, Energy 227 (2021). https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120518.
[55] B. Ittoo, J.B. Ooi, M.V. Tran, F. Jaliliantabar, G. Hasan Najafi, V. Swamy, Effects of dispersed multiwalled carbon nanotubes on the micro-explosion and combustion characteristics of 2-methylfuran – diesel mixture droplets, Fuel 316 (2022). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123308.
[56] A.I. El-Seesy, A.K. Abdel-Rahman, M. Bady, S. Ookawara, Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives, Energy Conversion and Management 135 (2017) 373–393. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.090.
[57] N.M. Nachippan, M. Parthasarathy, P.V. Elumalai, A. Backiyaraj, D. Balasubramanian, A.T. Hoang, Experimental assessment on characteristics of premixed charge compression ignition engine fueled with multi-walled carbon nanotube-included Tamanu methyl ester, Fuel 323 (2022). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124415.
[58] K. Kalaimurugan, S. Karthikeyan, M. Periyasamy, G. Mahendran, Emission analysis of CI engine with CeO2 nanoparticles added neochloris oleoabundans biodiesel-diesel fuel blends, in: Materials Today: Proceedings, Elsevier Ltd, 2020: pp. 2877–2881. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.777.
[59] K. Simhadri, P.S. Rao, M.K. Paswan, Effect of changing injection pressure on Mahua oil and biodiesel combustion with CeO2 nanoparticle blend on CI engine performance and emission characteristics, International Journal of Hydrogen Energy 48 (2023) 26000–26015. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.267.
[60] R. Manimaran, T. Mohanraj, R. Ashwin, Green synthesized nano-additive dosed biodiesel-diesel-water emulsion blends for CI engine application: Performance, combustion, emission, and exergy analysis, Journal of Cleaner Production 413 (2023). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137497.

[61] P. Muruganantham, P. Pandiyan, R. Sathyamurthy, Analysis on performance and emission characteristics of corn oil methyl ester blended with diesel and cerium oxide nanoparticle, Case Studies in Thermal Engineering 26 (2021). https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101077.
[62] A.B. Arslan, M. Çelik, Investigation of the Effect of CeO2 Nanoparticle Addition in Diesel Fuel on Engine Performance and Emissions, Journal of Eta Maritime Science 10 (2022) 145–155. https://doi.org/10.4274/jems.2022.65882.
[63] A.S. Rajpoot, T. Choudhary, H.M. Chelladurai, G. Dwivedi, A novel comprehensive energy, exergy and sustainability analysis of a diesel engine powered by binary blends of juliflora biodiesel and nanoparticles, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 148 (2023) 11981–11997. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12473-x.
[64] S.K. Sharma, R.K. Das, A. Sharma, Improvement in the performance and emission characteristics of diesel engine fueled with jatropha methyl ester and tyre pyrolysis oil by addition of nano additives, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 38 (2016) 1907–1920. https://doi.org/10.1007/s40430-015-0454-x.
[65] D.S. Patil, D.A. Chopade, M.A. Kumbhalkar, Experimental investigation of effect of cerium oxide nanoparticles as a fuel additive in cottonseed biodiesel blends, MAYFEB Journal of Mechanical Engineering 1 (2018) 1–12. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12583.24489.
[66] D. Mei, Y. Fang, Z. Zhang, D. Guo, Z. Chen, C. Sun, Analysis of surface tension for nano-fuels containing disparate types of suspended nanoparticles, Powder Technology 388 (2021) 526–536. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.002.
[67] M. Tomar, N. Kumar, Impact of doping alumina nanoparticles on spray characteristics of diesel-biodiesel fuel blends, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899X/804/1/012007.
[68] D. Mei, Y. Fang, D. Adu-Mensah, W. Cai, Y. Yuan, Spray characteristics of fuel with cerium oxide nanoparticles, Chemical Engineering Science 266 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118298.
[69] E. Geacai, I. Nita, S. Osman, O. Iulian, EFFECT OF n-BUTANOL ADDITION ON DENSITY AND VISCOSITY OF BIODIESEL, U.P.B. Sci. Bull., Series B 79 (2017). https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full638_310332.pdf.
[70] A. Rahman, D. Kumara, W. Kusdiana, A. Nugroho, THE UTILIZATION OF FUEL DIESEL EMULSION AS A RESERVE SOURCE OF DIESEL FUEL FOR INDONESIAN WAR SHIPS, International Journal of ASRO 11 (2020) 44–53. https://doi.org/10.37875/asro.v11i04.357.
[71] J.I. Urete, M.O. Sule, J. Gordon, O.S. Kolade, R. Nze, S.A. Tsebam, O.B. Oyeleye, D.U. Robinson, I.A. Fetuga, Biodiesel Production Optimization from Waste Cooking Oil Using Animal Bone Catalyst, The Journal of Engineering and Exact Sciences 9 (2023). https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss8pp16634-01e.
[72] Beckman Coulter, Inc., Coulter N4 Plus Preliminary Manual, (n.d.).
[73] F. Li, W. Fu, B. Yi, L. Song, T. Liu, X. Wang, C. Wang, Y. Lei, Q. Lin, Comparison of macroscopic spray characteristics between biodiesel-pentanol blends and diesel, Experimental Thermal and Fluid Science 98 (2018) 523–533. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.07.003.
[74] R. Payri, F.J. Salvador, G. Bracho, A. Viera, Differences between single and double-pass schlieren imaging on diesel vapor spray characteristics, Applied Thermal Engineering 125 (2017) 220–231. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.140.
[75] H. Liu, Rail transit collaborative robot systems, in: Robot Systems for Rail Transit Applications, Elsevier, 2020: pp. 89–141. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822968-2.00003-6.
[76] E. Baccaglini, M. Gavelli, M. Morello, N. Raimondo, R. Scopigno, Image-processing assisted characterization of spray injection systems, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015: pp. 1706–1711. https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125343.
[77] J.D. Naber, D.L. Siebers, Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays, SAE Technical Paper 960034 (1996). https://doi.org/10.4271/960034.
[78] Y. Ma, S. Huang, R. Huang, Y. Zhang, S. Xu, Spray and evaporation characteristics of n-pentanol–diesel blends in a constant volume chamber, Energy Conversion and Management 130 (2016) 240–251. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.063.

[79] S. Liu, J. Zhang, J. Xue, M. Chen, L. Dai, Z. Yin, Y. Kang, Optical test devices and methods for internal combustion engines and optical studies on spray combustion characteristics for three different alternative fuels: A review, Journal of the Energy Institute 117 (2024). https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101845.
[80] T. Badawy, H. Xu, Y. Li, Macroscopic spray characteristics of iso-octane, ethanol, gasoline and methanol from a multi-hole injector under flash boiling conditions, Fuel 307 (2022). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121820.
[81] D. Li, Y. Gao, S. Liu, Z. Ma, Y. Wei, Effect of polyoxymethylene dimethyl ethers addition on spray and atomization characteristics using a common rail diesel injection system, Fuel 186 (2016) 235–247. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.082.
[82] P. Deng, R. Huang, Y.J. Ma, H. Dai, Prediction models developed for surface tension of alcohol + diesel blend fuels, in: SAE Technical Papers, SAE International, 2013. https://doi.org/10.4271/2013-01-2598.
[83] K. Indira, Y. Wu, A.S. Aloufi, T.T. Ng, A. Pugazhendhi, Slaughterhouse wastes as potential energy for the replacement for fossil fuel in diesel engine with the influence of hydrogen and nanoparticles ZrO2 and MWCNT, Fuel 361 (2024). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130614.
[84] B. Singh, A.K. Srivastava, O. Prakash, Effect on combustion performance and emission behavior of diesel engine fueled with hybrid biodiesel produced from a novel ternary oil mixture incorporated with nano additive, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 46 (2024) 6566–6585. https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2351149.
[85] G. Demirtaş, M.K. Balki, C. Sayin, Effects of a CRDI Engine Running on Biodiesel, n-Octanol and Nanoparticle Blended Nanofuel on Performance, Emissions and Combustion, Arabian Journal for Science and Engineering 49 (2024) 2565–2580. https://doi.org/10.1007/s13369-023-08266-x.
[86] T. Sathish, R. Saravanan, M. Balasubramanian, M. Meena, S. Vedanayaki, S. Sudagar, D. Ramya, D. Sakthivel, S. Shangdiar, K.T.T. Amesho, Investigating Artocarpus heterophyllus biodiesel performance using multi-walled carbon nanotubes as an additive, Fuel 381 (2025). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133266.
[87] H. Solmaz, A. Calam, E. Yılmaz, F. Şahin, S.M.S. Ardebili, F. Aksoy, Evaluation of MWCNT as fuel additive to diesel–biodiesel blend in a direct injection diesel engine, Biofuels 14 (2023) 147–156. https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2122154.
[88] A. Ahmad, A.K. Yadav, A.K. Dewangan, Synergistic effect of various nanoparticles infused biodiesel/diesel blends on combustion, performance, and environmental characteristics of a CI engine, Journal of the Energy Institute 120 (2025). https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102117.
[89] M. Tomar, N. Kumar, Effect of multi-walled carbon nanotubes and alumina nano-additives in a light duty diesel engine fuelled with schleichera oleosa biodiesel blends, Sustainable Energy Technologies and Assessments 42 (2020). https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100833.
[90] E. Elsharkawy, M.M. Abou Al-Sood, M.K. El-Fakharany, M. Ahmed, Comparative study of combustion, performance, and emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel blend with metallic and organic nano-particles, Int. J. Global Warming 22 (2020) 133–159. https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.110292.
[91] V. Manieniyan, R. Senthilkumar, V. Sukumar, S. Sivaprakasam, Analysis on DI Diesel Engine with Combined Multi-walled Carbon Nanotubes and Vegetable Oil Refinery Waste as Biodiesel, Arabian Journal for Science and Engineering 45 (2020) 9197–9211. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04708-y.
[92] A. Praveen, G.L.N. Rao, B. Balakrishna, The combined effect of multiwalled carbon nanotubes and exhaust gas recirculation on the performance and emission characteristics of a diesel engine, International Journal of Ambient Energy 40 (2019) 791–799. https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1421576.
[93] A. I. El-Seesy, H. Hassan, S. Ookawara, Influence of adding multiwalled carbon nanotubes to waste cooking oil biodiesel on the performance and emission characteristics of a diesel engine: an experimental investigation, International Journal of Green Energy 16 (2019) 901–916. https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1642895.

[94] E. Murugesan, R. Dhairiyasamy, S. Dixit, S. Singh, The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions, Case Studies in Thermal Engineering 69 (2025). https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106070.
[95] J. Li, J. Wei, H. Chen, Y. Xu, Y. Liu, Q. Dai, Study on the combustion and emission characteristics of a compression ignition engine using diesel/ethanol blend with carbon nanoadditives, Renewable Energy 246 (2025). https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122941.
[96] S. Agarwal, A. Yadav, A. Mudgal, S. Khan, Comparative evaluation of diesel engine performance and emission characteristics using carbon nanotubes & graphene oxide in ternary fuel (jojoba biodiesel-diesel-methanol) blends, Next Research 2 (2025) 100141. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100141.