

افزایش عدد ستان ترکیبات سوخت دیزل - بیودیزل با استفاده از کاتالیست هیبریدی دی اکسید سریم بر پایه نانوساختارهای کربنی

مهرداد میرزاجان زاده¹، مهدی ارجمند²، علی اکبر سیف کردی³، علیمراد رشیدی⁴، برات قبادیان⁵، عزت الله جودکی^{6*}
¹استاد مدعو گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
²عضو هیات علمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران
³عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
⁴عضو هیات علمی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
⁵عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
⁶عضو هیات علمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
 دریافت: 95/7/5 پذیرش: 96/6/1

چکیده

هدف از انجام این تحقیق افزایش عدد ستان ترکیبات سوخت دیزل - بیودیزل با افزودن نانوکاتالیست هیبریدی دی اکسید سریم بر پایه نانو لوله های کربنی بود. برای این منظور از دی اکسید سریم (CeO_2) به عنوان کاتالیست و از نانو لوله های کربنی چند دیواره (MWCNTs) به عنوان پایه کاتالیست در سه غلظت 30، 60 و 90ppm در ترکیبات سوخت دیزل - بیودیزل شامل سوخت دیزل (گازوئیل)، بیودیزل (B100)، ترکیب 5% بیودیزل (B5) و 20% بیودیزل (B20) استفاده شد. نتایج نشان داد نانوکاتالیست سنتز شده با داشتن پایه کربنی عامل دار شده و بدلیل توزیع پذیر بودن و پایداری مناسب، موجب افزایش قابل ملاحظه عدد ستان می گردد. همچنین نتایج آزمون نشان داد که با افزایش غلظت نانو کاتالیست در انواع سوخت، عدد ستان افزایش بیشتری را نشان می دهد؛ به طوری که بیشترین افزایش عدد ستان در غلظت 90ppm برای سوخت دیزل، بیودیزل، B5 و B20 به ترتیب 1/02%، 3/83%، 1/19% و 3/2% گزارش شد.

کلمات کلیدی: عدد ستان، نانو کاتالیست، دی اکسید سریم، نانو لوله کربنی، سوخت دیزل، بیودیزل

مقدمه

عدد ستان یک معیار اندازه گیری جهت نشان دادن زمان تاخیر در احتراق سوخت می باشد، به این معنی که قابلیت اشتعال خودبه خودی سوخت با عدد ستان بیان می شود. هر چه زمان تاخیر کمتر باشد احتراق یکنواخت تر خواهد بود [1].



در مورد بیودیزل (متیل یا اتیل استرها)، گزارش شده است که خواص آن مشابه سوخت دیزل است به علاوه اینکه بزرگ‌ترین اختلاف آن‌ها در محتوای اکسیژن بیودیزل است که منجر به احتراق کامل‌تر (عدد ستان بالاتر) می‌شود ولی انرژی کلی بیودیزل در نهایت کمتر از سوخت دیزل است. پروکسیدها و نیترات آلکیل‌ها به عنوان موثرترین عامل رایج در خود اشتعالی در موتورهای احتراق داخلی شناخته می‌شوند. برای مثال از 2 اتیل-هکسیل نیترات به عنوان افزودنی در کاهش تاخیر اشتعال در سوخت‌های دیزلی استفاده می‌شود. پیوندهای RO-NO₂ که به نیترات آلکیل متصل می‌شوند نسبتاً ضعیف هستند و بنابراین به سادگی شکسته می‌شوند. به این ترتیب یک الکترون جفت نشده یا یک رادیکال، آزاد می‌شود. وجود یک رادیکال آزاد موجب می‌شود که فرایند احتراق در دماهای پایین تری رخ دهد که در نتیجه موجب بهبود عدد ستان می‌شود. اگرچه استفاده از این ترکیبات موجب افزایش قابلیت اشتعال می‌شود، اما آن‌ها تنها مقادیر اندکی نرخ واکنش-های موجود در فرایند احتراق را افزایش می‌دهند [2-4]. از میان جایگزین‌هایی که می‌تواند منجر به دستیابی به عدد ستان بالاتر شود، می‌توان به استفاده از کاتالیست‌ها در سوخت اشاره کرد. یک کاتالیست می‌تواند نرخ واکنش‌ها را سرعت بخشد و همچنین در فرایند احتراق منجر به یک واکنش کامل‌تر و در نتیجه دستیابی به حداکثر انرژی آزاد شده توسط سوخت شود. ترکیبات نانو کاتالیستی مثل برخی فلزات (پلاتین، پالادیم، کبالت، مس، نیکل و ...)، اکسیدهای فلزی یگانه، اکسیدهای فلزی چندگانه و در نهایت فلزات پوشش داده شده با اکسیدهای فلزی را می‌توان به صورت خالص یا مخلوط، به سوخت (هیدروکربن‌های مایع مثل سوخت‌های مشتق شده از نفت نظیر بنزین و سوخت دیزل) اضافه کرد تا بدینوسیله ویژگی‌های احتراق سوخت را ارتقاء بخشید. متأسفانه استفاده از کاتالیست‌های جامد صنعتی موثر و عملی نیستند زیرا قرار دادن مداوم یک کاتالیست پشتیبانی کننده در معرض برخورد با محفظه احتراق بسیار داغ، به سرعت باعث غیر فعال شدن کاتالیست می‌شود. بیشتر نانو کاتالیست‌هایی که در حال حاضر به عنوان افزودنی به سوخت‌ها اضافه می‌شوند به صورت امولسیون هستند که معمولاً این امولسیون از چند ماده شیمیایی دیگر مانند آب یا مواد فعال سطحی تشکیل شده است. عمده مشکل این امولسیون‌ها عدم پایداری مناسب در سوخت می‌باشد. همچنین به دلیل استفاده از مواد فعال سطحی در ترکیب امولسیون، مشکلاتی را برای موتورهای احتراق داخلی به وجود می‌آورد [5]. یکی از روش‌ها برای حل این مشکل، حل کردن کاتالیست در سوخت می‌باشد تا بتوان به‌طور پیوسته آن را وارد مرحله احتراق کرد. در میان انواع مختلف، کاتالیست‌های همگن ترجیح داده می‌شوند زیرا می‌توان از آن‌ها در پلت فرم‌ها و پیکربندی‌های متفاوت استفاده کرد؛ مضاف بر اینکه ذرات کاتالیست‌های همگن در مرحله تزریق رسوب نمی‌کنند و دخالتی در عملکرد موتور ندارند [6].

کانان و همکارانش [7] از نانو سیال فریک کلراید (FeCl₃) به عنوان یک نانو کاتالیست افزودنی به بیودیزل تولید شده از روغن پسماند پالم استفاده نمودند. کاتالیست با غلظت 20 μmol/L استفاده شد. آن‌ها نتایج را برای یک موتور دیزل در دور موتور 1500 rpm بر روی پارامترهای عملکرد و آلاینده‌ها و مشخصه‌های احتراق گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاتالیست افزوده شده باعث کاهش 8/6% مصرف سوخت ویژه ترمزی شده است در حالی که بازده حرارتی ترمزی نیز 6/3% افزایش را نشان می‌داد. در مورد آلاینده‌ها نیز کاهش 52/6%، 26/6% و 6/9% را به ترتیب برای مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و دوده گزارش کردند. نتایج

آن‌ها همچنین نشان از نرخ حرارت آزاد شده بیشتر و زمان کمتر برای تاخیر در اشتعال برای وقتی که از افزودنی استفاده شده بود در مقایسه با بیودیزل خالص، داشت.

کارتیکیان و همکارانش [8] پارامترهای عملکرد، احتراق و آلاینده‌های یک موتور تک سیلندر در دور ثابت موتور 1500 rpm تحت شرایط حداکثر بار برای مخلوط‌های مختلفی از سوخت (80٪ گازوئیل + 20٪ بیودیزل کانولا، 80٪ گازوئیل + 20٪ بیودیزل کانولا+50 ppm از نانوکاتالیست اکسید روی و 80٪ گازوئیل + 20٪ بیودیزل کانولا+100 ppm نانوکاتالیست اکسید روی) مورد بررسی قرار دادند. همچنین خواص مشخصه سوخت مانند نقطه ابری شدن، نقطه اشتعال، گرانی، عدد ستان و ارزش حرارتی سوخت‌های حاوی نانوکاتالیست را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزودن نانوکاتالیست اکسیدروی باعث تسریع در نرخ واکنش و کوتاه‌تر شدن زمان تاخیر در اشتعال و افزایش NO_x شده است. همچنین گزارش کردند که چگالی مخلوط‌های سوختی در اثر استفاده از نانوکاتالیست بدون تغییر، گرانی، افزایش، نقطه اشتعال به مقدار جزئی افزایش، عدد ستان به مقدار بسیار کمی افزایش و ارزش حرارتی نیز بدون تغییر بوده است.

هدف از انجام این تحقیق افزایش عدد ستان و در نتیجه بهبود کیفیت احتراق و بهسوزی سوخت‌های دیزل (سوخت دیزل، بیودیزل و ترکیب سوخت دیزل-بیودیزل) با استفاده از سنتز و افزودن یک نانوکاتالیست می‌باشد که براحتی در این سوخت‌ها توزیع شده و مشکلات ناشی از رسوب افزودنی‌های جامد در مخزن ذخیره سوخت را نداشته باشد.

مواد و روش‌های آزمایشگاهی

مواد

نانو لوله کربنی تولید شده با خلوص 90-95٪ و قطر 7 تا 20 نانومتر به روش رسوب دهی بخار شیمیایی (CVD) با استفاده از کاتالیست Co-Mo/Mg و گاز متان از پژوهشگاه صنعت نفت ایران تهیه شد. پتاسیم هیدروکسید (KOH) با خلوص 99٪ محصول شرکت سیگما آلدريج¹ (آمریکا) و متانول از شرکت مرک² (آلمان) با خلوص 99/8٪ مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین سوخت دیزل مصرف شده در آزمایشات، از پالایشگاه تبریز فراهم شد.

تجهیزات و روش‌ها

تهیه سوخت

بیودیزل استفاده شده در این تحقیق از روغن پسماند خوراکی جمع آوری شده از رستوران‌ها با استفاده از روش ترانس استریفیکاسیون با 1٪ درصد وزنی کاتالیست KOH و نسبت مولی روغن به متانول 1:6 در دمای 60°C و مدت زمان 1 ساعت تهیه گردید. جهت تعیین کیفیت بیودیزل تولید شده و سوخت دیزل تهیه شده

¹ Sigma-Aldrich

² Merc



تست‌های خواص فیزیکی و شیمیایی دانسیته، گرانروی، نقطه اشتعال (برای B100) بر روی بیودیزل سنتز شده، سوخت دیزل، B5 و B20 بر اساس استاندارد ASTM D6751 و ASTM D975 انجام شد. پارامترهای دانسیته و گرانروی سینماتیکی (mm^2/s) و دینامیکی (mPa.s) با استفاده از دستگاه Stabinger Viscometer مدل SVM3000 ساخت شرکت آنتون پار³ (اتریش) اندازه گیری شدند. همچنین در این تحقیق برای اندازه گیری نقطه اشتعال از دستگاه FLPH mini flash ساخت شرکت گرابنر⁴ (اتریش) به روش پیاله بسته استفاده شد. همچنین عدد ستان ترکیبات سوخت با استاندارد ASTM D613 اندازه گیری گردید.

سنتز نانوکاتالیست

هیبرید نمودن اکسید سریم با نانو لوله های کربنی با استفاده از تکنیک استفاده از حلال و سپس تثبیت نمودن در دمای 460 درجه سانتیگراد به مدت 3 ساعت با نرخ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ انجام شد. برای نشان دادن عامل آمیدی بر روی هیبرید حاصل، 5 گرم از نانو لوله ها به مدت 4 ساعت در دمای اتاق و تحت شرایط اتمسفریک در معرض گاز ازن قرار گرفت که باعث ایجاد عاملهای کربوکسیل بر روی بدنه و بیشتر در نقاط انتهایی نانو لوله های کربنی شد. در مرحله بعدی نانو لوله های کربوکسیل دار شده به مدت 1 ساعت در دمای 60°C در محلول آبی 36% پراکسید هیدروژن تحت رفلکس قرار گرفت و پس از آن به مدت 20 ساعت در دمای اتاق توسط همزن مگنت دار با دور 200rpm همزده شد. نمونه تهیه شده از فیلترهای غشایی 0/2mm از جنس پلی کربنات عبور داده شده و پس از شستشو با مقدار فراوانی متانول در داخل آون در دمای 100°C خشک شد. نمونه خشک شده در حضور 800ml تیونیل کلراید و 40ml دی متیل فرامامید (DMF) به مدت 24 ساعت تحت رفلکس همزن دار قرار گرفت. بعد از واکنش آسیل کلریناسیون 5 نمونه با انیدروس تتراهیدروفوران (THF) 5 بار شسته شده و در دمای 40°C به مدت 30 دقیقه خشک شد. به نمونه خشک شده به مقدار 25 گرم اکتادسیل آمین (oda) افزوده شد و این مخلوط به مدت 2 ساعت در دستگاه التراسونیک حمامی با دمای 60°C و قدرت 40kHz قرار گرفت و سپس به مدت 2 روز تحت رفلکس قرار داده شد. برای خارج نمودن آمین های اضافی نمونه با اتانول شستشو داده شد و سپس در داخل آون خشک شد. نانوکاتالیست سنتز شده با استفاده از چند تکنیک مورد شناسایی قرار گرفت. برای شناسایی مورفولوژی از میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM) مدل زیس (ZEISS) (20.0 kV) ساخت کشور آلمان استفاده شد. همچنین برای تعیین کسر مولی سریم اکسید موجود در نانو کاتالیست سنتز شده از دستگاه (ICP MS) (NeXION 300) (model) ساخت شرکت پرکین المر⁶ (آمریکا) استفاده شد. دستگاه FT-IR مدل FTIR RAY LEIGH WQF-510A (چین) برای شناسایی گروه عاملی آمیدی نشانده شده بر روی نانو لوله های کربنی مورد استفاده قرار گرفت.

³ Anton Paar

⁴ Grabner

⁵ Acyl-Chlorination

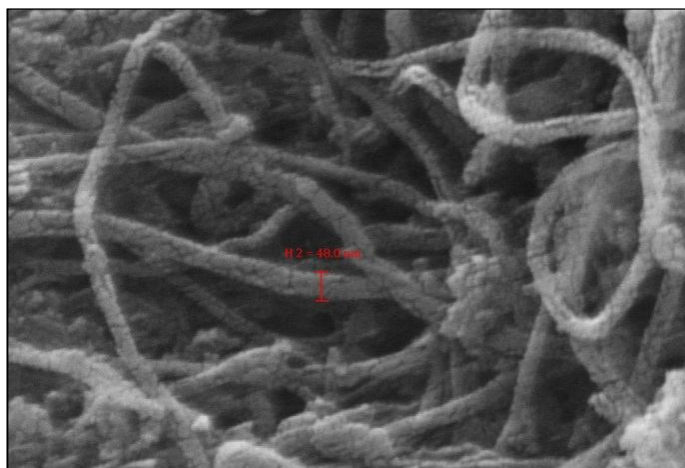
⁶ Perkin Elmer

اندازی گیری عدد ستان

برای اندازه گیری عدد ستان از دستگاه پرتابل *Portable octane and cetane analyzer* ساخت شرکت مترکس⁷ (روسیه) تحت استاندارد ASTM D 613 استفاده شد.

نتایج و بحث

شکل 1 تصویر مربوط به SEM نانو کاتالیست سنتز شده در این تحقیق را نشان می دهد. مشاهده می شود که در طی فرایند هیبریداسیون کربن- فلز و همچنین آمیداسیون، ساختار نانولوله های کربنی تخریب نشده است و قطر نانولوله ها افزایش یافته است (40 تا 50nm) که ناشی از هیبرید شدن سریم اکسید بر روی نانولوله های کربنی است. همچنین برای تعیین دقیق میزان دی اکسید سریم موجود در نانوکاتالیست سنتز شده از تست ICP-MS بهره گرفته شد که مقدار 61٪ را برای سریم اکسید گزارش نمود.



شکل 1. تصویر SEM نانولوله های کربنی عامل دار چند دیواره هیبرید شده با دی اکسید سریم

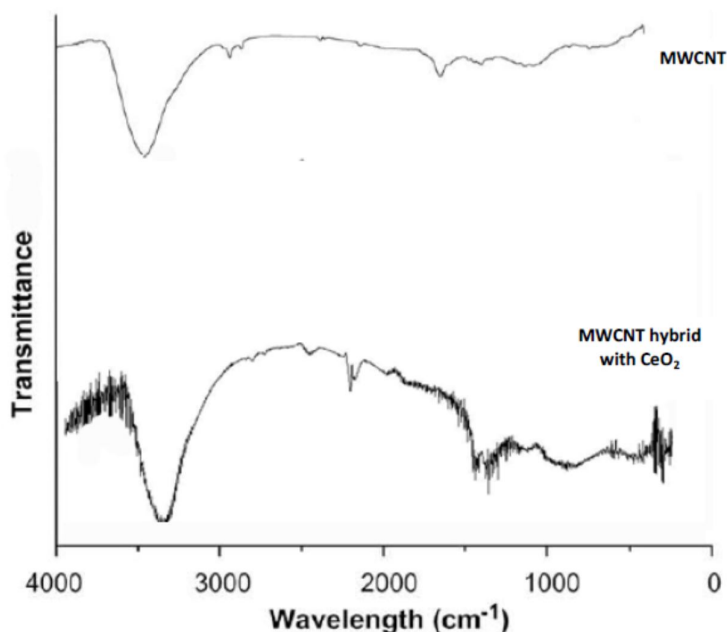
شکل 2 تصاویر FT-IR از نمونه نانوکاتالیست هیبریدی قبل و بعد از آمید دار شدن را نشان می دهند. مشاهده می شود که ارتعاش مربوط به عامل آمیدی در محدوده 1500 تشکیل شده است. ارتعاش 1541 مربوط به پیوند دوگانه $C = C$ در نانو لوله های کربنی می باشد. وجود ارتعاش مربوط به پیوندهای $Ce-O-C$ و $Ce-O$ بترتیب در محدوده های 1000cm و 445 نشان دهنده ایجاد هیبرید نانو لوله های کربنی و دی اکسید سریم می باشد.

جدول 1 مقادیر بدست آمده برای چگالی، گرانروی، نقطه اشتعال و عدد ستان برای بیودیزل، سوخت دیزل و ترکیب این دو سوخت (B5 و B20) استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد.

⁷ Metrex

جدول 1. خواص فیزیکی و شیمیایی اندازه گیری شده برای ترکیبات سوخت

واحد	حدود تعیین شده بر اساس استاندارد ASTM D975 برای سوخت دیزل	حدود تعیین شده بر اساس استاندارد ASTM D6751 برای بیودیزل	B100	B20	B5	سوخت دیزل	پارامتر
gr/cm ³	-	0/86-0/9	0/869	0/834	0/827	0/761	دانسیتته (40°C)
mm ² /s	4/1-1/9	1/9-6/0	5/541	3/716	3/361	3/1	گرانروی (40°C)
°C	52<	>130	171/1	71/3	68/3	69/3	نقطه اشتعال
-	>40	>47	54/84	41/52	38/78	38/12	عدد ستان



شکل 2. تصویر FT-IR از نانو لوله های کربنی قبل و بعد از هیبرید شدن با کاتالیست فلزی

نانوکاتالیست سنتز شده به مدت 10 دقیقه و در دمای 30°C در سه غلظت 30، 60 و 90ppm با استفاده از دستگاه اولتراسونیک حمامی با قدرت 40kHz در چهار سوخت سوخت دیزل، بیودیزل، B5 و B20 پراکنده شد تا نانو کاتالیست بخوبی در محیط مایع و پایداری مناسبی را داشته باشد. روش اولتراسونیک بدلیل تخریب کمتر نانولوله های کربنی به سایر روشهای توزیع ترجیح داده می شود. نمونه های تهیه شده به مدت 2 ماه (حدود 8 هفته) پایداری مناسبی از خود نشان دادند و سپس تست های اندازه گیری عدد ستان بر روی این سوخت ها انجام شد.

جدول 2 نتایج مربوط به اندازه گیری عدد ستان برای 4 نوع سوخت سوخت دیزل، بیودیزل، B5 و B20 با غلظت های 30، 60 و 90ppm از نانو کاتالیست را نشان می دهد. همچنین در این جدول میزان تغییرات عدد

ستان در سوخت‌های حاوی نانوکاتالیست در مقایسه با سوخت‌های پایه گزارش شده است. نتایج جدول 2 نشان می‌دهد که در تمامی انواع سوخت‌ها، با افزایش غلظت نانوکاتالیست عدد ستان افزایش می‌یابد. این افزایش به صورت خطی نبوده و با افزایش غلظت، عددستان درصد افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که برای بیودیزل خالص، افزایش در عدد ستان در تمامی غلظت‌ها بیشتر از دیگر ترکیبات سوخت می‌باشد. همچنین از نتایج این جدول می‌توان نتیجه گرفت که در غلظت‌های بالای 30ppm هرچه غلظت بیودیزل در ترکیب سوختی بیشتر است، میزان افزایش عدد ستان نیز بیشتر می‌باشد که این موضوع اثر هم‌افزایی غلظت بیودیزل و نانوکاتالیست بر روی هم، بر عدد ستان را نشان می‌دهد.

افزودن نانو ذرات دی‌اکسید سربیم به سوخت، به عنوان یک عامل تامین‌کننده اکسیژن در یک واکنش زنجیری عمل می‌کند و واکنش را به سمت احتراق کامل تر سوق می‌دهد و موجب احتراق هیدروکربن‌های نسوخته و مونوکسید کربن می‌شود. به طور کلی می‌توان اظهار نمود که افزایش اکسیژن در دسترس، باعث احتراق کامل تر و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها می‌شود. دی‌اکسید سربیم توانایی این را دارد که به عنوان یک در اختیار قراردهنده اکسیژن، مطابق فرمول زیر ملکول‌های اکسیژن را در اختیار ملکول‌های سوخت قرار دهد [9]:



جدول 2. مقادیر اندازه‌گیری شده برای عدد ستان برای انواع سوخت حاوی نانوکاتالیست به همراه درصد تغییرات عدد ستان در سوخت‌های حاوی کاتالیست در مقایسه با سوخت‌های پایه

درصد تغییرات به نسبت سوخت پایه	عدد ستان	غلظت نانو کاتالیست در سوخت (ppm)	نوع سوخت
+0/61	38/35	30	سوخت دیزل
+0/94	38/48	60	
+1/02	38/51	90	
+0/71	55/23	30	بیودیزل (B100)
+2/33	56/12	60	
+3/83	56/94	90	
-0/08	38/75	30	B5
+0/25	38/88	60	
+1/19	39/24	90	
+0/19	41/60	30	B20
+1/2	42/02	60	
+3/2	42/85	90	

کلید استفاده از دی‌اکسید سربیم به عنوان کاتالیست، به اختلاف پتانسیل (1/7V) بین یون‌های Ce^{3+} و Ce^{4+} مربوط می‌شود که اجازه می‌دهد واکنش 1 براحتی در محفظه احتراق رخ دهد. همچنین نانولوله



کربنی مورد استفاده در این نانوکاتالیست هم به عنوان پایه کاتالیست با تسریع نرخ انجام واکنش احتراق و تسریع سوختن، زمان تاخیر در اشتعال را کاهش می دهد و باعث انجام پیشرفت واکنش به سمت احتراق گردیده است. نانو ذرات کاتالیست در حین مرحله پاشش به سوخت کمک می کنند تا به میزان بیشتری در هوای فشرده نفوذ کند که این موضوع موجب احتراق بهتر سوخت می گردد [10].

نتیجه گیری

در این تحقیق از سه غلظت از نانو کاتالیست هیبریدی دی اکسید سریم بر پایه نانولوله های کربنی عامل دار شده با قابلیت توزیع پذیری بالا در چهار نوع سوخت دیزلی شامل سوخت دیزل، بیودیزل و ترکیبات این دو سوخت جهت بالابردن بهسوزی و در نتیجه افزایش عدد ستان استفاده شد. نتایج نشان داد که نانوذرات دی اکسید سریم در طی واکنش کاتالیستی زنجیری با بالابردن محتوای اکسیژن در دسترس سوخت در حین واکنش احتراق باعث افزایش عدد ستان می گردد. بالا بودن سطح فعال کاتالیست به دلیل نانو بودن آن و همچنین توزیع پذیری مناسب در سوخت به دلیل وجود عامل آمیدی بر روی پایه کاتالیست موجب بهبود عملکرد آن می گردد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوکاتالیست در تمامی انواع سوخت، عدد ستان افزایش داشته است، بطوری که بیشترین افزایش عدد ستان در غلظت 90ppm برای سوخت دیزل معادل 1 درصد و و برای بیودیزل در همان غلظت در حدود 4 درصد مشاهده گردید.

منابع

- [1] Freedman, B., and M. O. Bagby., "Predicting cetane numbers of n-alcohols and methyl esters from their physical properties" *Journal of the American Oil Chemists, Society*, Vol. 67, No. 9, 1990.
- [2] Abbaszaadeh, Ahmad, Barat Ghobadian, Mohammad Reza Omidkhah, and Gholamhassan Najafi, "Current biodiesel production technologies: a comparative review", *Energy Conversion and Management*, Vol. 63, 2012.
- [3] Knothe, Gerhard, Andrew C. Matheaus, and Thomas W. Ryan, "Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester", *Journal of Fuel*, Vol. 82, No. 8, 2003.
- [4] Sivaramakrishnan, K., and P. Ravikumar., "Determination of Cetane Number of Biodiesel and It's Influence On Physical Properties" *ARPN journal of engineering and applied sciences*, Vol. 7, No. 2, 2012.
- [5] Kannan, G. R., R. Karvembu, and R. Anand, "Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel", *Applied Energy*, Vol. 88, No. 11, 2011.
- [6] Sadhik Basha, J., and R. B. Anand, "Effects of nanoparticle additive in the water-diesel emulsion fuel on the performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine", *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 59, No. 2, 2012.
- [7] Kannan, G. R., R. Karvembu, and R. Anand. "Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel." *Applied Energy* Vol.88, No. 11, 2011.

- [8] Karthikeyan, S., A. Elango, and A. Prathima. "Diesel engine performance and emission analysis using canola oil methyl ester with the nano sized zinc oxide particles." *Indian journal of engineering and materials sciences*, Vol. 21, No. 1, 2014.
- [9] Lenin, M. A., M. R. Swaminathan, and G. Kumaresan, "Performance and emission characteristics of a DI diesel engine with a nanofuel additive", *Fuel*, Vol. 109, 2013.
- [10] Selvan, V. Arul Mozhi, R. B. Anand, and M. Udayakumar, "Effects of cerium oxide nanoparticle addition in diesel and diesel-biodiesel-ethanol blends on the performance and emission characteristics of a CI engine", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 7, 2009.