

Efecto de la estrategia de inyección piloto-principal-posterior sobre los parámetros macroscópicos del chorro usando una mezcla biodiesel derivado de aceite de higuera-diésel con contenido ultrabajo de azufre

Effect of pilot-main-post injection strategy on the spray macroscopic parameters using a castor oil biodiesel-ultra low sulphur diesel blend

José A. Estala-Bravo^{a,b}, Breidy A. Martínez-Hernández^{a,b}, Oscar A. de la Garza^{a,b,*}, Miguel García-Yera^{a,b},
Joel González-Marroquín^a, Simón Martínez-Martínez^{a,b}

^aUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME),
Laboratory for Research and Innovation In Energy Technology (LIITE), Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria,
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P 66455, México.

^bLaboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustible (LaNDACBio),
Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P 66455, México

*oscar.delagarzadl@uanl.edu.mx

Resumen

El uso de biocombustibles y estrategias de inyección múltiple son vías para cumplir con regulaciones medioambientales. El objetivo de este estudio es analizar la influencia de la estrategia piloto-principal-posterior en los parámetros macroscópicos del chorro (i.e. penetración, área y ángulo del chorro) usando una mezcla BH10 (10 % de biodiésel de aceite de higuera y 90 % de diésel con contenido ultra bajo de azufre), y diésel con contenido ultra bajo de azufre (ULSD) como combustible de referencia. Los parámetros macroscópicos del chorro se determinaron en una cámara de volumen constante bajo condiciones no- evaporativas y no-reactivas usando una presión de inyección de 120 MPa, una contrapresión de 5MPa, y tiempos de energización de 0.4, 0.5 y 0.6 ms para las inyecciones piloto y posterior, y tiempos de energización de 0.7, 0.8, y 0.9 ms para la inyección principal. Entre los principales resultados obtenidos, se puede destacar un incremento en los valores de la penetración del chorro y área del chorro de la mezcla BH10 de 161% y 208%, respectivamente, durante la inyección posterior cuando un tiempo de energización de 0.9 ms se empleó en la inyección principal. Mientras que, los valores de penetración y área de chorro del diésel con contenido ultra bajo de azufre mostraron un aumento del 100 % y del 108 %, respectivamente. Finalmente, los valores del ángulo del chorro de la mezcla BH10 y ULSD mostraron una disminución del 12% y 21%, respectivamente.

Abstract

The usage of biofuels and multiple-injection strategies are ways to fulfil environmental regulations. The aim of this study is to analyse the influence of pilot-main-post injection strategy on the spray macroscopic parameters (i.e. spray penetration, spray area, and spray angle) using a BH10 blend (10 % of castor oil biodiesel and 90 % of ultra-low sulphur diesel), and ultra-low sulphur diesel (ULSD) as the fuel baseline. The spray macroscopic parameters were determined in a constant volume chamber under non-evaporative and non-reactive conditions using an injection pressure of 120 MPa, a backpressure of 5 MPa, energizing times of 0.4, 0.5, and 0.6 ms for pilot and post injections, and energizing times of 0.7, 0.8, and 0.9 ms for main injection. Among the main results obtained, it can be noted that an increase in the spray penetration and spray area values of BH10 blend of 161 % and 208 %, respectively, during post injection when an energizing time of 0.9 ms in the main injection was employed. Whilst, the spray penetration and spray area values of ultra-low sulphur diesel exhibited an increase of 100 % and 108 %, respectively. Finally, the spray angle values of BH10 blend and ULSD displayed a decrease of 12 % and 21 %, respectively.

Palabras clave:

Biodiesel de aceite de higuera, estrategia de inyección múltiple, parámetros macroscópicos del chorro

Keywords:

Castor oil biodiesel, multiple-injection strategy, spray macroscopic parameters

Introducción

El uso de motores Diesel para la generación de energía y para el sector del transporte está en constante aumento en la actualidad. Esta tendencia se debe a su eficiencia térmica y su bajo consumo de combustible, factores que lo han consolidado como una máquina indispensable en la industria contemporánea. Sin embargo, la operación de estos motores mediante el empleo de combustibles fósiles ha resultado en un impacto ambiental negativo, principalmente debido

a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Entre los gases se encuentran el Óxido de Nitrógeno (NOx), los Hidrocarburos no quemados (HC), el monóxido de carbono (CO), entre otros compuestos [1]. Para poder mitigar el daño medioambiental que ocurre debido a los GEI, se han establecido normativas, por ejemplo, la EURO 6, la NOM-044-SEMARNAT-2017, la NOM-016-CRE-2016, las

cuales regulan los lineamientos establecidos para mitigar los GEI [2,3]. De la misma manera, el aumento de demanda de los combustibles fósiles ha impulsado el estudio de alternativas para la mitigación de emisiones generados por los motores de combustión, el uso de biocombustibles es una de ellas. Los biocombustibles se pueden categorizar según la materia prima a partir de la cual son producidos; se consideran de primera generación aquellos que provienen de plantas vegetales y semillas utilizadas en el sector alimenticio, los biocombustibles de segunda generación son los provenientes de plantas vegetales, grasas animales o residuos que no son utilizados como recursos alimenticios, la biomasa de tercera generación se compone de algas, microalgas y bacterias [4]. El biodiesel es uno de los principales biocombustibles utilizados para el transporte, es por ello que muchos investigadores han estudiado diversas materias primas para la producción de este biocombustible, como lo son el aceite de coco, soja, aceite usado de cocina, aceite de microalgas, aceite de higuera, entre otros [5].

Resaltando que uno de los retos que enfrenta el uso de biocombustibles a partir de biomasa, es el aprovechamiento de recursos que no afecten en el sector alimenticio, el desarrollo de biodiesel a partir del aceite de higuera representa una ventaja frente a otras materias primas; de igual manera, el empleo de una menor cantidad de agua, pesticidas, y fertilizantes, además de la capacidad de adaptación de la planta de higuera en terrenos y climas de cultivo, lo hacen atractivo para su producción [6,7]. Por otra parte, aunque el desarrollo de los biocombustibles ha ido en aumento, uno de los inconvenientes que presentan son sus propiedades físico-químicas, las cuales dependen de la materia prima con la que se produce. El biodiesel producido a partir de aceite de higuera, presenta mayores valores de viscosidad y densidad en comparación con los del diésel fósil, lo cual impide la aplicación de este biocombustible en los motores Diesel en su estado puro [8].

La viscosidad y densidad del combustible afectan a los parámetros macroscópicos del chorro, tales como, la penetración, ángulo, y área del chorro. Se han empleado diferentes métodos para equiparar las propiedades físico-químicas del biodiesel a las del diésel convencional, uno de ellos es el aumento de la temperatura del biodiesel, lo cual provoca una disminución de los valores de viscosidad mejorando el proceso de inyección. Por ejemplo, Anis S. y Budiandono G.N [9], estudiaron el efecto de precalentar las mezclas de biodiesel-diésel, a través de una resistencia eléctrica, y obtuvieron una disminución de las propiedades de densidad y la viscosidad de los combustibles utilizados; Payri et al. [10], analizaron los efectos de la temperatura del combustible en el caudal másico utilizando diésel, y un inyector diésel piezoeléctrico montado en un soporte con una funda de enfriamiento, disminuyendo la densidad del combustible. Park et al. [11], investigaron la influencia de la temperatura del combustible pesado en los parámetros macroscópicos del chorro, a través de un intercambiador de calor antes de

ser inyectado. Mediante estos experimentos se puede observar, que el aumento de la temperatura del combustible puede disminuir los valores de densidad y viscosidad, mejorando el proceso de mezcla.

El uso de estrategias de inyección múltiple, tales como la inyección piloto, post-inyección e inyección dividida reducen las emisiones de GEI, las emisiones de CO, Hidrocarburos no quemados, y las emisiones de NOx. Por ejemplo, Chacko N. et al. [12], evaluaron el efecto de las estrategias de inyección piloto y post inyección en un motor Diesel, utilizando una mezcla B20 de aceite usado de cocina. Ellos, encontraron que el uso de la estrategia de inyección piloto, así como la estrategia de post inyección provocan una reducción de las emisiones contaminantes. Así mismo, Kumar M. et al. [13], midieron el impacto que tiene la presión de inyección, así como el tiempo de energización empleando una estrategia de inyección piloto sobre las emisiones contaminantes, para ello utilizaron un biodiesel derivado a partir de aceite *Jatropha*, así como una variación de la presión de inyección en un rango de 50 a 150 MPa, concluyendo que el uso de la inyección piloto, elevados niveles de presión y tiempos de energización largos reducen la producción de hollín, así como las emisiones de hidrocarburos no quemados. La estrategia de triple inyección consiste en dividir el suministro de combustible en tres pulsos: una inyección piloto, una inyección principal y una inyección posterior. La inyección piloto tiene la función de preparar la mezcla y reducir el retraso de la ignición, mejorando la estabilidad de la combustión. La inyección principal es responsable de la mayor parte de la energía liberada, mientras que la inyección posterior puede ser utilizada para mejorar la oxidación del material particulado o para controlar la temperatura de los gases de escape. Entre los estudios que hablan del efecto de las estrategias de inyección múltiple con tres o más inyecciones sobre los parámetros macroscópicos se encuentra el estudio de Park H. et al. [14], en donde investigaron el efecto de las estrategias de inyección múltiple sobre el proceso de combustión de un motor Diesel en condiciones de encendido en frío, encontrando que al utilizar estrategias de inyección múltiple (doble, triple y cuádruple), la penetración del chorro se redujo en comparación con una inyección única, debido a que los inyectores no alcanzaban una elevación máxima de la aguja, lo que reducía la velocidad del chorro y la penetración. También estudios como el de Wang Z. [15], donde se analizó el caso de la estrategia de inyección dividida, observó que la penetración y ángulo del chorro mejoraron en comparación con una inyección simple. Yin L. et al. [16], analizaron la eficiencia de la combustión parcialmente premezclada utilizando estrategias de inyección simple, doble y triple en un motor óptico. En la inyección triple, se aplicaron tres pulsos en distintos ángulos de cigüeñal para optimizar la mezcla y reducir pérdidas de calor. Mediante imágenes de alta velocidad, se evaluaron penetración, ángulo y área del chorro, observando que la tercera inyección ayudó a redistribuir el combustible hacia el centro del cilindro. Se comprobó que esta estrategia mejoró la eficiencia térmica del motor hasta

48.5%, minimizando emisiones y optimizando la combustión. La estrategia piloto-principal-posterior es una estrategia avanzada de inyección, la cual consiste en dividir la inyección de combustible en tres fases: una inyección piloto inicial, la inyección principal y una inyección posterior. Esta técnica es utilizada para la optimización de la combustión, la reducción de contaminantes, así como mejorar el rendimiento del motor [17]. Debido a la importancia de la estrategia piloto-principal-posterior, y a la poca información que se tiene sobre cómo afecta a los parámetros macroscópicos, en el presente estudio se presenta el análisis del efecto de la estrategia piloto-principal-posterior en los parámetros macroscópicos del chorro (i.e. penetración del chorro, área del chorro, y ángulo del chorro).

Herramientas experimentales

Instalación Experimental

El estudio del efecto de la triple inyección del combustible sobre los parámetros macroscópicos se realizó empleando una instalación experimental; la cual se compone por un sistema de inyección diésel common-rail, un sistema de visualización de los parámetros macroscópicos del chorro, y un sistema de control para la inyección de combustible, y la sincronización de la inyección con la cámara de alta velocidad, tal como se ilustra en la Fig. 1.

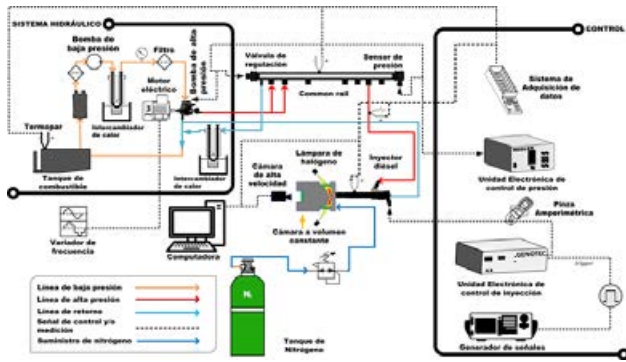


Figura 1: Esquema de la instalación experimental

Componentes de la instalación experimental

Así mismo, la cámara de visualización de volumen constante tiene un sistema de iluminación tal como se muestra en la Fig. 2, el cual utiliza dos lámparas de halógeno, para la adquisición de imágenes se cuenta con una cámara de alta velocidad (Motion Pro X4 CMOs), la cual tiene una resolución de 512x512 pixeles, y una frecuencia de adquisición de 7000 imágenes por segundo.

Sistema de refrigeración

Con el fin de mantener el control de la temperatura se instalaron dos intercambiadores de calor uno después de la bomba de baja presión, y otro en la línea de retorno del common-rail. Así mismo, se utilizaron dos baños térmicos de la marca PolyScience de 6 y 15 litros, teniendo ambos un rango de temperatura de -20 a 200 °C.

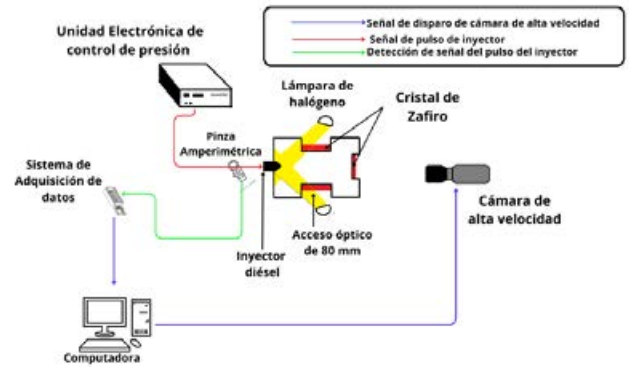


Figura 2: Esquema de la aplicación de la técnica de iluminación

Matriz experimental

Para la realización del estudio del efecto de la triple inyección fue utilizada una estrategia piloto-principal-posterior, así como una presión de inyección (P_{rail}) de 120 MPa, una contrapresión (P_{back}) de 5 MPa y tiempos de energización (T.E.) de 0.4, 0.5 y 0.6 ms para las inyecciones piloto y posterior, así como tiempos de 0.7, 0.8 y 0.9 ms para la inyección principal, utilizando un dwell time (DT) de 0.7 ms entre cada una de las inyecciones. La matriz experimental se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 – Matriz experimental

Combustible	P_{rail} [MPa]	P_{back} [MPa]	1er inj. [ms]	2da Inj. [ms]	3er Inj. [ms]	Inj. Simple [ms]			
Diésel	120	5				0.4			
			0.4	0.7	0.4	0.5			
			0.5	0.8	0.5	0.6			
			0.6	0.9	0.6	0.7			
						0.8			
						0.9			
			BH10	120	5	0.4	0.7	0.4	0.5
						0.5	0.8	0.5	0.6
						0.6	0.9	0.6	0.7
			0.8						
			0.9						

Para este estudio, se seleccionó una presión de inyección de 120 MPa con el objetivo de analizar el efecto de la triple inyección bajo condiciones de presión elevadas. La contrapresión se estableció en 5 MPa, con el fin de simular la presión generada por el pistón durante su ascenso en la cámara de combustión.

En cuanto a los tiempos de energización de la inyección piloto, se utilizaron valores de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, las cuales representan los tiempos mínimos de energización en los que el inyector es capaz de realizar una inyección efectiva. Asimismo, se definió un tiempo de separación (DT) de 0.7 ms, correspondiente al tiempo mínimo requerido para evitar el solapamiento entre inyecciones.

Para la inyección principal, se seleccionaron tiempos de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, dado que un aumento mayor en el tiempo de energización provoca el solapamiento de la segunda inyección con la tercera.

Con el fin de tener una referencia para evaluar el efecto de la triple inyección, se realizó una inyección simple utilizando los mismos tiempos de energización empleados en las inyecciones piloto-principal-posterior.

Procesamiento de las imágenes

Las imágenes adquiridas en la experimentación fueron analizadas, y procesadas mediante un código desarrollado en el software Matlab, mediante el cual se realiza la detección de los diferentes chorros, el centro de la tobera, y el contorno de los chorros. En la Fig. 3, se muestra un ejemplo del contorno del chorro diésel, a partir del cual se determina la penetración, el ángulo y el área del chorro. En el presente estudio se obtuvo una relación píxel/milímetro de 42.7, y una cantidad de 5130 imágenes, además el análisis se centró en uno de los ocho chorros, específicamente, el chorro señalado con la flecha de color blanco. Mas detalles del algoritmo para el procesamiento de las imágenes se describen en el trabajo de Rubio-Gómez *et al.* [18].

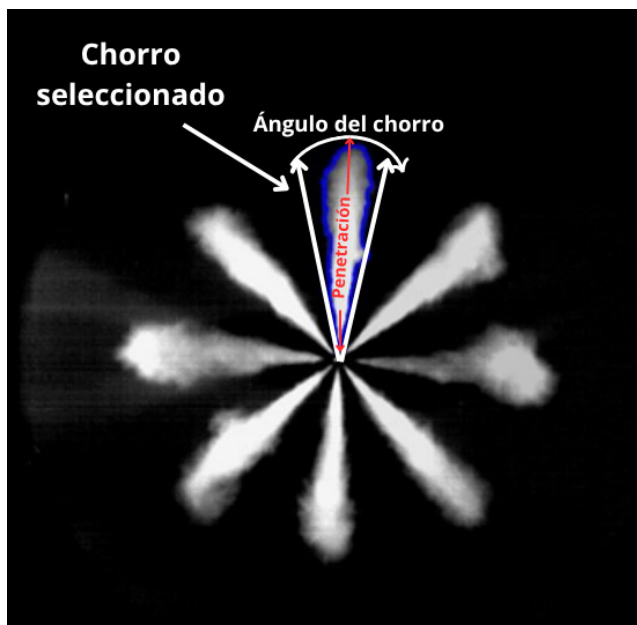


Figura 3: Imagen binarizada del chorro diésel procesada por el algoritmo, y obtenida a los 0.95 ms aSOI.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la experimentación con la inyección triple. Para ello, este apartado se dividirá en dos partes: en la primera, se analizará cómo afecta la inyección piloto a los parámetros macroscópicos de la mezcla BH10 y del diésel, durante la

inyección principal; en la segunda, se evaluará cómo se ve afectada la tercera inyección al estar precedida por dos inyecciones.

Para determinar si existe un efecto entre las inyecciones, se realizó también una inyección simple, con el fin de comparar el comportamiento de la inyección sin la influencia de inyecciones previas, con el observado al tener una o varias inyecciones previas.

Efecto de la duración del primer evento de inyección sobre el segundo

Penetración

En la Fig. 4a, 4b y 4c, se muestra la evolución temporal de la penetración del chorro de BH10, y del diésel. En este estudio se analiza tanto la inyección principal de ambos combustibles como la inyección simple, con el objetivo de analizar el efecto de la inyección piloto sobre la segunda inyección. Se presenta la penetración del chorro al variar los tiempos de energización del primer evento de inyección, correspondientes a: (a) 0.4, (b) 0.5 y (c) 0.6 ms. Para todos los casos, se utilizó una presión de inyección de 120 MPa, y un valor de dwell time (DT) de 0.7 ms.

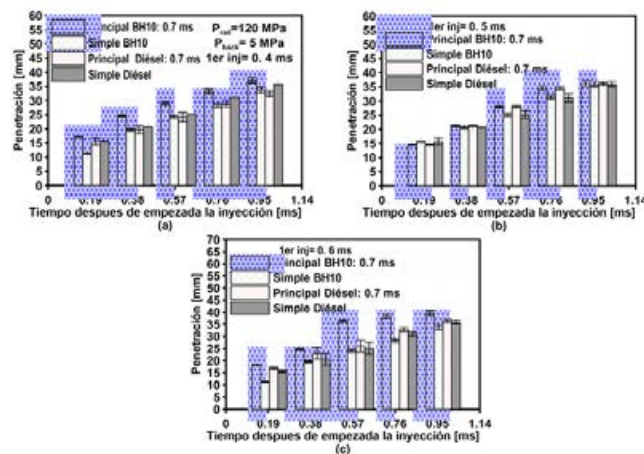


Figura 4: Evolución temporal de la penetración de la mezcla BH10 y el diésel, para los tiempos de energización de: (a) 0.4 ms, (b) 0.5 ms y (c) 0.6 ms.

En la Fig. 4a, 4b y 4c, se presenta un incremento en la penetración del chorro cuando se realiza una segunda inyección, alcanzando un aumento aproximado del 52 % en comparación con una inyección simple, para un tiempo de energización del primer evento de inyección de 0.4 ms, y a un tiempo de 0.19 ms aSOI, al utilizar la mezcla BH10. Asimismo, se presenta la misma tendencia para los casos con tiempos de 0.5 y 0.6 ms, con incrementos en la penetración del 29 % y 62 %, respectivamente. Este efecto se atribuye a la influencia de la primera inyección, dado que las condiciones transitorias entre el primer y segundo evento de inyección generan un movimiento del gas, lo que a su vez eleva la velocidad del chorro e incrementa su penetración. No obstante, dicho efecto disminuye conforme el chorro se desarrolla, reduciendo la diferencia entre la segunda inyección, y la inyección simple.

A los 0.95 ms aSOI, la penetración de la segunda inyección aún muestra un incremento del 10 % respecto a la inyección simple, para el tiempo de energización de 0.4 ms; mientras que para los tiempos de 0.5 y 0.6 ms los incrementos son del 7 % y 17 %, respectivamente. Este comportamiento ha sido reportado previamente por Xia *et al.* [19], quienes analizaron las características del chorro y su atomización bajo condiciones similares a las de un motor, encontrando que un aumento en la presión de inyección puede incrementar la penetración del chorro, aunque esta tiende a estabilizarse con el tiempo.

En el caso del diésel, se observa un comportamiento contrario al registrado con la mezcla BH10. A los 0.19 ms aSOI la penetración es similar entre la inyección simple, y la inyección principal para un tiempo de energización de 0.4 ms. Sin embargo, al incrementar el tiempo de energización, la penetración disminuye un 16 % y 8%, para los tiempos de 0.5 ms y 0.6 ms, respectivamente. No obstante, conforme avanza el tiempo, la inyección principal con un tiempo de energización de 0.4 ms muestra una menor penetración. A los 0.95 ms aSOI, la penetración se reduce aproximadamente un 10 % respecto a la inyección simple. A medida que se incrementa el tiempo de energización, la penetración tiende a aumentar en un 4% y 2% para los tiempos de 0.5 y 0.6 ms, respectivamente. Este comportamiento, opuesto al observado con la mezcla BH10, puede atribuirse a las diferencias en las propiedades físicas de los combustibles, como la viscosidad y la densidad. El diésel, al presentar una menor viscosidad cinemática, favorece una mejor distribución del combustible con el gas, lo cual reduce el efecto de la primera inyección y, en consecuencia, su influencia sobre la penetración del chorro.

Ángulo

En la Fig. 5a, 5b y 5c, se muestra la evolución temporal del ángulo del chorro de la mezcla BH10, y del diésel durante la inyección principal. Para ello, se emplearon los tiempos de energización para el primer evento de inyección de 0.4 ms, 0.5 ms y 0.6 ms, una presión de inyección de 120 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un valor de DT de 0.7 ms.

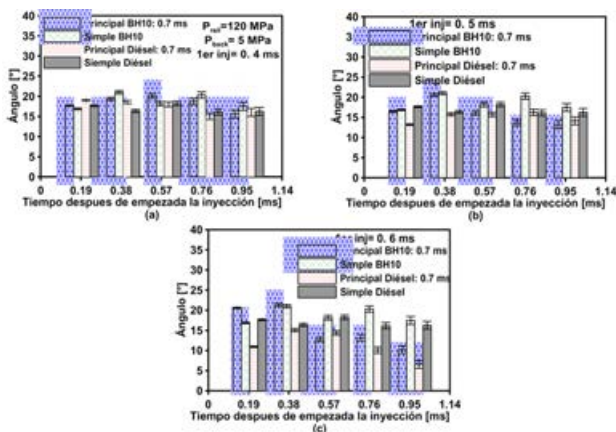


Figura 5: Evolución temporal del ángulo de la mezcla BH10 y del diésel, para los tiempos de energización de: (a) 0.4 ms, (b) 0.5 ms, y (c) 0.6 ms.

A partir de la Fig. 5a, 5b y 5c, se puede destacar que a los 0.19 ms aSOI, se presenta un incremento en el ángulo del chorro de la mezcla BH10 para los tiempos de energización de 0.4 y 0.6 ms, con aumentos aproximados del 5 % y 21 %, respectivamente, en comparación con la inyección simple. En contraste, para el tiempo de energización de 0.5 ms, el ángulo se reduce alrededor de un 2 %. Por otro lado, en el caso del diésel, el ángulo del chorro para un tiempo de energización de 0.4 ms es mayor en aproximadamente un 8 %. No obstante, al incrementar el tiempo de energización, el ángulo tiende a disminuir significativamente, con reducciones del 25 % y 38% para los tiempos de energización de 0.5 y 0.6 ms en comparación con la inyección simple.

A medida que el chorro se estabiliza, se observa una reducción progresiva del ángulo. A los 0.95 ms aSOI, tanto la mezcla BH10 como el diésel muestran un menor ángulo de chorro en la segunda inyección para los tres tiempos de energización analizados. En particular, se registra una disminución aproximada del 10 %, 24% y 41% para los tiempos de 0.4, 0.5 y 0.6 ms de la mezcla BH10, mientras que para el diésel se tiene una reducción de 2%, 12% y 59% para los tiempos de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente. Esta disminución en el ángulo de apertura se atribuye a la influencia de la primera inyección, la cual provoca un movimiento del gas, que favorece la formación de un chorro más largo y compacto. Como se ha demostrado previamente, un incremento en la presión de inyección se asocia con una reducción en el ángulo del chorro. En este contexto, Weclas *et al.* [20] estudiaron el comportamiento del chorro diésel al impactar contra pistones de distintos diámetros, bajo diversas presiones de inyección y distancias desde la tobera, concluyendo que un aumento en la presión de inyección genera una disminución del ángulo del chorro.

Área

En la Fig. 6a, 6b y 6c se observa la evolución temporal del área del chorro de la mezcla BH10 y del diésel durante la inyección principal. Para ello, se utilizaron tiempos de energización para el primer evento de inyección de 0.4 ms, 0.5 ms y 0.6 ms, una presión de inyección de 120 MPa y una contrapresión de 5 MPa, y un valor de DT de 0.7 ms.

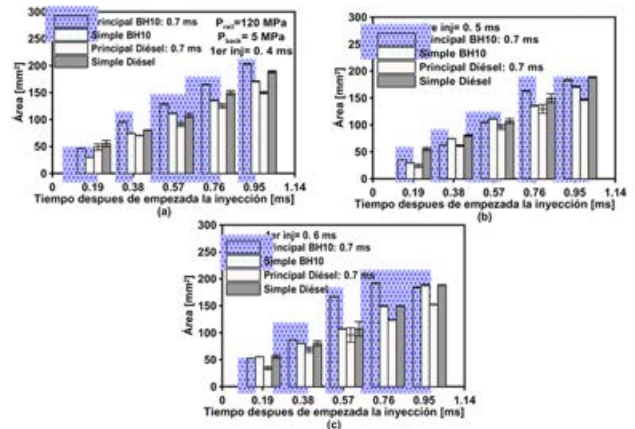


Figura 6: Evolución temporal del área de la mezcla BH10 y del diésel, para los tiempos de energización de: (a) 0.4 ms, (b) 0.5 ms, y (c) 0.6 ms.

A partir de la Fig. 6a, 6b, y 6c, se determina que el área del chorro presenta un comportamiento similar al de la penetración. A los 0.19 ms aSOI, el área correspondiente a la segunda inyección de la mezcla BH10 se incrementa debido al efecto de la inyección piloto, alcanzando un incremento aproximado del 59 % para un tiempo de energización de 0.4 ms en comparación con la inyección simple. Mientras que, para los tiempos de energización de 0.5 y 0.6 ms, el aumento del área es del 17 % y 79 %, respectivamente. Para el caso del diésel, se observa una reducción del área del chorro durante la segunda inyección, del 12%, 56% y 38%, para los tiempos de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente, en comparación con la inyección simple.

A medida que avanza el tiempo y el chorro se desarrolla completamente, se presenta una reducción en el área del chorro durante la inyección principal. Para la mezcla BH10, a los 0.95 ms aSOI, dicha reducción alcanza aproximadamente un 19 %, 7 % y 8 % respecto a la inyección simple, para los tiempos de energización de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente. En el caso del diésel, se presenta una reducción del área del 21 %, 22 % y 19 % para los tiempos de energización de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente. Este comportamiento fue también observado por Xie *et al.* [21], quienes investigaron los parámetros macroscópicos de una mezcla diésel-biodiésel bajo distintos niveles de presión de inyección. Ellos, encontraron que el aumento de la presión de inyección provocaba un incremento en el área del chorro. Asimismo, identificaron una relación directa entre la penetración del chorro y el incremento del área, de modo que, a mayor penetración, el área tendía a aumentar de manera proporcional.

Efecto de los primeros dos eventos de inyección sobre el tercero Penetración

En la Fig. 7a, 7b y 7c se observa la evolución temporal de la penetración del chorro de la mezcla BH10 y la del diésel durante la inyección posterior. Para ello, se emplearon tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, una presión de inyección de 120 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un valor de DT de 0.7 ms.

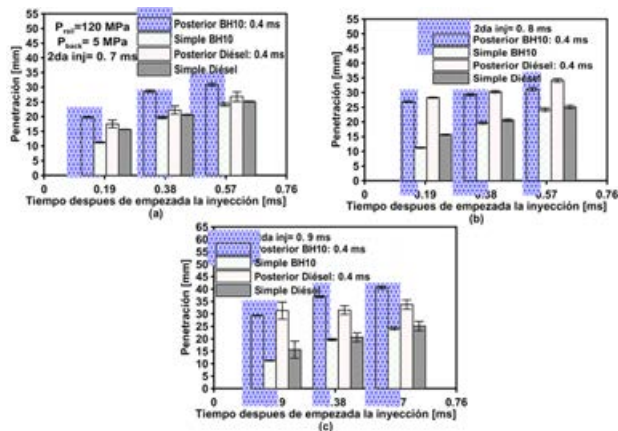


Figura 7: Evolución temporal de la penetración de la mezcla BH10 y del diésel, para los tiempos de energización de: (a) 0.7 ms, (b) 0.5 ms, y (c) 0.9 ms.

En la Fig. 7a, 7b y 7c se muestra que el efecto de las dos inyecciones previas influye en la penetración del chorro durante el tercer evento de inyección, evidenciado por una aceleración del chorro.

A los 0.19 ms después del inicio de la tercera inyección (aSOI), tanto la mezcla BH10 como el diésel presentan un aumento en la penetración en comparación con la inyección simple, para los tres tiempos de energización analizados. Para un tiempo de energización de 0.7 ms del segundo evento de inyección, se tiene un incremento en la penetración de aproximadamente 75 % para la mezcla BH10, y de 12 % para el diésel. Mientras que para un tiempo de energización de 0.8 ms, la penetración del chorro correspondiente a la tercera inyección se incrementa en un 139 % para la mezcla BH10, y 81 % para el diésel. Finalmente, para un tiempo de energización de 0.9 ms la penetración aumento alrededor de 162 % para la mezcla BH10 y 100 % para el diésel, en comparación con el caso de inyección simple.

Este aumento en la penetración puede atribuirse a la influencia de la segunda inyección, ya que un mayor tiempo de inyección implica una mayor masa inyectada, lo cual modifica la dinámica del chorro y las condiciones aguas abajo. Además, el uso de estrategias de inyección múltiple puede provocar aperturas y cierres de la aguja del inyector en intervalos en intervalos muy cortos y bruscos, lo cual puede afectar su funcionamiento. En particular, se ha reportado que la aguja no se detiene de manera instantánea, lo que puede provocar fenómenos como la ingestión de gases en el interior del inyector o un goteo residual. Estos factores alteran la presión y el flujo en el saco de la tobera, modificando la dinámica del siguiente chorro e incrementando su penetración. Estos efectos relacionados con el comportamiento de la aguja fueron observados por Battistoni *et al.* [22], quienes realizaron simulaciones del proceso de apertura y cierre de la aguja. Para ello, modelaron inyectores con 1 y 3 orificios utilizando un mallado de 2.5 μm , y observaron que durante el cierre de la aguja se produce una succión localizada que permite la entrada de aire, lo que genera goteo de combustible. Ellos concluyeron, que este fenómeno puede afectar la formación del siguiente chorro si aún queda gas presente en el saco de la tobera.

Cuando el chorro se estabiliza a los 0.57 ms aSOI, la penetración entre la inyección simple y la tercera inyección se reduce, siendo para la mezcla BH10 del 23%, 29% y 68%, y para el diésel de 6%, 36%, y 34%, para los tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, respectivamente.

Ángulo

En la Fig. 8a, 8b y 8c se observa la evolución temporal del ángulo del chorro de la mezcla BH10 y del diésel. Para ello, se emplearon los tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, una presión de inyección de 120 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un valor de DT de 0.7 ms.

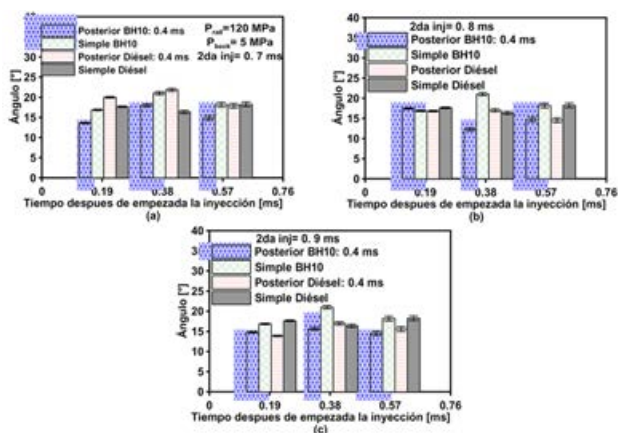


Figura 8: Evolución temporal del ángulo de la mezcla BH10 y el diésel, para los tiempos de energización de: (a) 0.7 ms, (b) 0.6 ms y (c) 0.9 ms.

En la Fig. 8a, 8b y 8c se muestra el efecto que tiene la inyección principal sobre la inyección posterior. Se observa que, a los 0.19 ms aSOI, el ángulo del chorro de la mezcla presenta una reducción al inicio de la inyección para los casos de 0.7 ms y 0.9 ms, con disminuciones aproximadas del 19% y 21%, respectivamente. En cambio, para el caso de 0.8 ms, al inicio de la inyección se observa un comportamiento similar entre la inyección simple y la posterior. Este comportamiento puede atribuirse al efecto que tiene la masa total inyectada en la estrategia de triple inyección sobre el funcionamiento del inyector y, en particular, sobre el cierre y apertura de la aguja. En los casos de 0.7 y 0.9 ms, podría haberse producido un cierre deficiente de la aguja, lo que provocaría la succión de aire al interior del inyector. Este fenómeno podría generar un aumento de presión en el saco de la tobera, afectando el chorro al hacerlo más compacto y, por tanto, reduciendo su ángulo. En contraste, para el tiempo de 0.8 ms es posible que se haya logrado un cierre adecuado de la aguja, lo que explicaría la ausencia de efectos significativos al inicio de la inyección. Este tipo de comportamiento fue observado por Órley *et al.* [23], quienes estudiaron el efecto del flujo turbulento en el interior del orificio de la tobera diésel. Mediante simulaciones que incorporaron el movimiento real de la aguja, observaron que, en ciertas condiciones durante la fase de cierre, pueden presentarse eventos de colapso de cavitación en los orificios, y en el saco de la tobera. Estos colapsos generan aumentos intensos de presión que pueden alterar el comportamiento de la siguiente inyección.

Asimismo, se observa que, para el caso del diésel a los 0.19 ms aSOI, la inyección con un tiempo de 0.7 ms presenta un aumento en el ángulo del chorro de aproximadamente 13% con respecto a la inyección simple. Este comportamiento podría deberse a que, al inicio de la inyección, el chorro se dispersa más, generando un ángulo mayor. Sin embargo, este comportamiento cambia conforme se incrementa el tiempo de energización; el ángulo tiende a reducirse, registrando disminuciones de aproximadamente 5% y 21% para los tiempos de 0.8 ms y 0.9 ms, respectivamente, en comparación con la inyección principal. Esta reducción puede atribuirse al aumento de la masa inyectada durante la inyección principal.

buirse al aumento de la masa inyectada durante la inyección principal.

Conforme avanza el proceso de inyección, a los 0.57 ms aSOI se observa una estabilización del chorro, lo que se refleja en una reducción general del ángulo. A este tiempo, la mezcla BH10 muestra disminuciones del 18%, 19% y 20% para los tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, respectivamente. Por su parte, el diésel presenta reducciones del 2%, 20% y 15% para los mismos tiempos. Esta tendencia puede explicarse por la interacción del chorro con el entorno, que favorece su mezcla con el ambiente y, por consiguiente, una disminución del ángulo.

Área

En la Fig. 9a, 9b y 9c se observa la evolución temporal del área del chorro de la mezcla BH10 y del diésel durante la inyección posterior. Para ello, se realizó una variación de tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, una presión de inyección de 120 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un valor de DT de 0.7 ms.

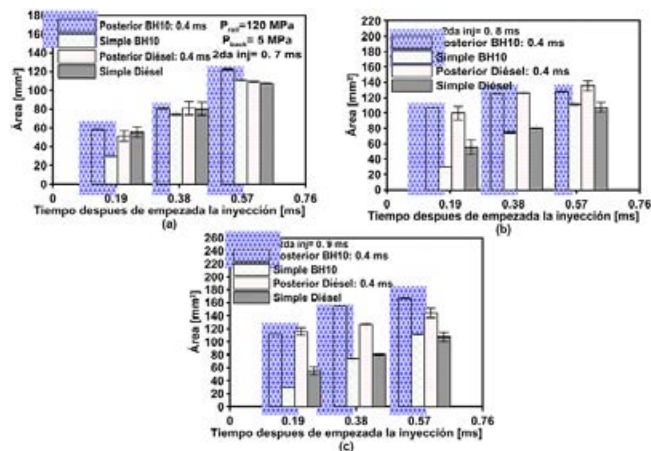


Figura 9: Evolución temporal del área de la mezcla BH10 y el diésel para los tiempos de energización de: (a) 0.7 ms, (b) 0.6 ms, y (c) 0.9 ms

En la Fig. 9a, 9b y 9c se muestra el incremento del área del chorro correspondiente a la tercera inyección, como consecuencia del efecto inducido por la segunda inyección, tanto para la mezcla BH10 como para el diésel. A los 0.19 ms aSOI, se observa un incremento del área en los tres tiempos de energización analizados. En el caso de la mezcla BH10, el área del chorro aumentó en comparación con la inyección simple en aproximadamente un 99%, 264% y 280% para los tiempos de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, respectivamente. Para el diésel, la diferencia es de un 7% menos en el tiempo de 0.7 ms, mientras que se incrementó en un 80% y 108% para los tiempos de 0.8 y 0.9 ms, respectivamente. Este comportamiento se atribuye al movimiento del gas generado por la mayor masa inyectada durante la segunda inyección. Como se observó previamente en el análisis de la penetración, existe una estrecha relación entre el aumento de la penetración y el incremento del área del chorro, lo que sugiere una

correlación directa entre ambos parámetros macroscópicos.

A los 0.57 ms aSOI, los efectos inducidos por el movimiento del gas tienden a disminuir, lo cual se refleja en una reducción del área en comparación con el valor registrado inmediatamente después del inicio de la inyección. No obstante, el área sigue siendo mayor que en el caso de una inyección simple. Para la mezcla BH10, el área es superior en aproximadamente un 10 %, 15 % y 49 % para los tiempos de 0.7 ms, 0.8 ms y 0.9 ms, respectivamente. En el caso del diésel, las diferencias se encuentran en torno al 2 %, 26 % y 35 %, para los mismos tiempos de inyección.

Conclusiones

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de la mezcla BH10 empleando una estrategia de inyección piloto-principal-posterior; y utilizando el diésel como combustible de referencia. Seguidamente se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas en el presente trabajo:

1. El primer evento de inyección tuvo un efecto en los parámetros macroscópicos tanto de la mezcla BH10 como del diésel durante el segundo evento de inyección; incrementando la penetración de la mezcla BH10 en un 52%, 29% y 62% para los tiempos de energización del primer evento de 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente; mientras que hubo una reducción en los valores de penetración del diésel del 1% y 16% para los tiempos de energización de 0.4 y 0.5 ms, respectivamente. Una mayor penetración del chorro del orden de 7% fue observada, cuando un tiempo de energización de 0.6 ms fue empleado. Asimismo, se evidenció que el primer evento de inyección también impactó significativamente el área del chorro. En el caso de la mezcla BH10, se presentó un incremento del área en un 4% y 26% para los tiempos de energización de 0.4 y 0.6 ms, respectivamente, mientras que a 0.5 ms se observó una reducción del 2%. Para el diésel, el área se redujo con el aumento del tiempo de energización, específicamente en un 11%, 53% y 33% para 0.4, 0.5 y 0.6 ms, respectivamente. Por otro lado, el primer evento de inyección provocó una reducción en el ángulo del chorro, en un 7%, 12% y 37%, mientras que en la mezcla BH10 se presentó un incremento del ángulo en un 4%, 2% y 21%, respectivamente para los mismos tiempos.
2. La combinación de inyecciones piloto y principal generó un aumento en la penetración de ambos combustibles. Para la mezcla BH10, los incrementos fueron del 75%, 139% y 161% para los tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, respectivamente, correspondientes al segundo evento de inyección; mientras que para el diésel los valores de la penetración aumentaron en un 75%, 80% y 100%. Mientras que, los valores del área del chorro incrementaron 98%, 204% y 208% para BH10, y del 98%, 79% y 108% para el diésel, para los mismos

tiempos de energización. No obstante, el ángulo del chorro se redujo como consecuencia del efecto combinado de los dos eventos de inyección previos. Esta reducción fue del 19%, 3% y 12% para la mezcla BH10, y del 19%, 4% y 21% para el diésel, para los tiempos de energización de 0.7, 0.8 y 0.9 ms, respectivamente. Por consiguiente, el uso de la estrategia piloto-principal-posterior bajo condiciones reactivas, se espera que conduzca a un mejor proceso de combustión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del Gobierno de México por apoyar el presente trabajo a través de los estudios de Maestría en Ciencias de José Alberto Estala Bravo (1316192) y de Breidy Alejandra Martínez Hernández (1346529), y de los proyectos (CBF-2025-G-1020) y (Apoyo LN-2025-I-4). Así mismo, se agradece al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación UANL-ProACTI (114-IDT-2024), y al LaNDACBio por apoyar la presente investigación.

Referencias

- [1] Wladimir, R. I. C. (2022). *Diagnóstico de motores diesel mediante análisis de emisiones de gases*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23656> [2] W. Strunk Jr., E. B. White, *The elements of style* (3rd ed.). New York: MacMillan (1979).
- [2] *Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016 Especificaciones de calidad de los petrolíferos*. (2016). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29%2F08%2F2016#gsc.tab=0
- [3] *NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017*. (2017). Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513626&fecha=19/02/2018#gsc.tab=0
- [4] Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Mehlmer, N., Lercher, J., Awad, D., & Brück, T. (2023). *The potential of biofuels from first to fourth generation*. *PLoS Biology*, 21(3), e3002063. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002063>.
- [5] Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). *Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus*. *Energy Nexus*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036>.
- [6] Akhabue, C. E., Iworah, J. C., & Aisien, F. A. (2014). *Effect of Selected Metal Contaminants on the Stability of Castor Oil Methyl Ester*. *Journal Of Fuels*, 2014,1-6. <https://doi.org/10.1155/2014/641849>.

- [7] Angassa, K., Tesfay, E., Weldmichael, T. G., & Kebede, S. (2023). *Response Surface Methodology Process Optimization of Biodiesel Production from Castor Seed Oil*. Journal Of Chemistry, 2023, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2023/6657732>.
- [8] Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Jiménez-Romero, F., De Castro, M. L., Priego-Capote, F., & Dorado, M. (2015). *Synthesis of biodiesel from castor oil: Silent versus sonicated methylation and energy studies*. Energy Conversion And Management, 96, 561-567. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.019>
- [9] Anis, S., & Budiandono, G. N. (2019). *Investigation of the effects of preheating temperature of biodiesel-diesel fuel blends on spray characteristics and injection pump performances*. Renewable Energy, 140, 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.062>
- [10] Payri R., Gimeno J., Mata C. & Viera A. (2017). *Rate of injection measurement of a direct-acting piezoelectric injector for different operating temperatures*. Energy Conversion and Management, 154:387-393, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.029>.
- [11] Park J., Jang J. H., & Park S. (2015). *Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system for marine engine*. Ocean Engineering, 104:580-589, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.002>.
- [12] Chacko, N., & J, T. (2020). *Effect of pilot and post fueling on the combustion and emission characteristics of a light-duty diesel engine powered with diesel and waste cooking biodiesel blend*. Energy Sources. Part A, Recovery, Utilization, And Environmental Effects, 24. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1791285>.
- [13] Kumar, M., Bhowmik, S., & Paul, A. (2022). *Effect of pilot fuel injection pressure and injection timing on combustion, performance, and emission of hydrogen-biodiesel dual fuel, engine*. International Journal Of Hydrogen Energy, 47(68), 29554-29567. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.260>.
- [14] Park, H., Bae, C., & Ha, C. (2019). *A comprehensive analysis of multiple injection strategies for improving diesel combustion process under cold-start conditions*. Fuel, 255, 115762. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115762>.
- [15] WANG, Z. (s. f.). *Experimental study on diesel spray with single and multiple injection under room temperature and low temperature* [Tesis de doctorado]. School of Mechanical Engineering College of Engineering and Physical Sciences The University of Birmingham.
- [16] Yin, L., Lundgren, M., Wang, Z., Stamatoglou, P., Richter, M., Andersson, Ö., & Tunestål, P. (2018). *High efficient internal combustion engine using partially pre-mixed combustion with multiple injections*. Applied Energy, 233-234, 516- 523. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.011>.
- [17] Payri, R., Salvador, F. J., Abboud, R., & Viera, A. (2020). *Study of evaporative diesel spray interaction in multiple injections using optical diagnostics*. Applied Thermal Engineering, 176, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115402> 315-322. <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/450554>.
- [18] Rubio-Gómez, G., Martínez-Martínez, S., Rúa-Mojica, L. F., Gómez-Gordo, P., & de la Garza, O. A. (2018). *Automatic macroscopic characterization of diesel sprays by means of a new image processing algorithm*. Measurement Science & Technology, 29(5), 055406. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aab121>
- [19] Xia, J., Huang, Z., Xu, L., Ju, D., & Lu, X. (2019). *Experimental study on spray and atomization characteristics under subcritical, transcritical and supercritical conditions of marine diesel engine*. Energy Conversion And Management, 195, 958-971. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.080>.
- [20] Weclas, M., & Faltermeier, R. (2007). *Diesel jet impingement on small cylindrical obstacles for mixture homogenization by late injection strategy*. International Journal Of Engine Research, 8(5), 399-413. <https://doi.org/10.1243/14680874jer01107>.
- [21] Xie, H., Song, L., Xie, Y., Pi, D., Shao, C., & Lin, Q. (2015). *An Experimental Study on the Macroscopic Spray Characteristics of Biodiesel and Diesel in a Constant Volume Chamber*. Energies, 8(6), 5952-5972. <https://doi.org/10.3390/en8065952>.
- [22] Battistoni, M., Som, S., & Powell, C. F. (2019). *Highly resolved Eulerian simulations of fuel spray transients in single and multi-hole injectors: Nozzle flow and near-exit dynamics*. Fuel, 251, 709- 729. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.076>.
- [23] Örley, F., Hickel, S., Schmidt, S. J., & Adams, N. A. (2016). *Large-Eddy Simulation of turbulent, cavitating fuel flow inside a 9-hole Diesel injector including needle movement*. International Journal Of Engine Research, 18(3), 195-211. <https://doi.org/10.1177/1468087416643901>.