

生質柴油和引擎負載對重型柴油引擎排放 PM_{2.5} 之影響葉永全¹、鄭曼婷^{2*}、盧昭暉³、蔡瀛逸⁴、楊禮豪⁵、楊錫賢⁶、王琳麒⁷、席煒翔¹¹國立中興大學環境工程學系 碩士生²國立中興大學環境工程學系 教授³國立中興大學環境工程學系 副教授⁴嘉南藥理科技大學環境工程與科學系 教授⁵中國醫藥大學職業安全與衛生學系 助理教授⁶朝陽科技大學環境工程與科學系 教授⁷正修科技大學化工與材料工程系 副教授

*通訊作者, Tel:04-2285-1984, E-mail: mtcheng@dragon.nchu.edu.tw

摘要

本研究旨在探討重型柴油引擎使用不同比例廢食用油生質柴油對PM_{2.5}與碳成分之影響，並針對引擎不同扭力操作，測試其PM_{2.5}之排放特性，受測油品分別為添加2%、10%與20%廢食用油的B2、B10與B20生質柴油，引擎使用歐洲穩態測試循環(ESC)於動力計上進行實驗，穩態測試條件包含怠速(0%、750 rpm)、低負載(25%、1800 rpm)、中負載(50%、1800 rpm)以及全負載(100%、1650 rpm)，並利用旋風分離採樣器採集PM_{2.5}樣本，分析其總碳(TC)、有機碳(OC)與元素碳(EC)之質量濃度。

研究結果顯示，生質柴油添加比例越高，PM_{2.5}質量濃度排放越低，B2、B10與B20油品之PM_{2.5}排放濃度依序為51.5 mg/m³、48.9 mg/m³、47.1 mg/m³，其中TC占PM_{2.5}百分比為68%~89%，OC/EC比值介於2.2~5.2，引擎負載愈高其PM_{2.5}排放愈多，全負載(100%、1650 rpm)排放PM_{2.5}濃度約為怠速(0%、750 rpm)排放之3倍，然因引擎於全負載操作時，排放尾氣溫度高，OC/EC比值降至0.5，油耗速率隨負載增加，EC排放亦隨之增加，其生質柴油添加比例、引擎負載、油耗速率及空燃比皆影響PM_{2.5}及碳成分的排放特性。

關鍵字：生質柴油、重型柴油引擎、PM_{2.5}、有機碳、元素碳

一、前言

柴油引擎具有較高能源使用效率，近年來國內外使用柴油引擎的數量呈現逐年成長趨勢，但柴油引擎排放之微粒對人體健康與環境衝擊有顯著的影響[1]，柴油車排放之微粒直徑大部分為小於1 μm的微粒，可滲透入呼吸道內部造成呼吸道的疾病[2]，另外因柴油車排放之微粒主要由元素碳以及有機碳成分所組成，其中元素碳具有高吸光性質，吸收太陽輻射使大氣溫度上升，有機碳具有散射太陽輻射之特性，因其吸光與散光特性影響大氣能見度[3]。

由於全球石油蘊藏量日漸枯竭與溫室氣體排放遽增的影響，尋求可再生與潔淨的生質能源(biomass energy)乃成為一項重要的課題，於傳統柴油中添加生質柴油可降低對石化燃料的依賴，也是目前國際間的趨勢，2005年全球375萬噸生質柴油的使用量中，歐盟佔了8成以上。其他則依序是美國、巴西與中國，美國的明尼蘇達州也於2005年強制添加2%生質柴油於石化柴油中，成為美國最早強制實施添加生質柴油的地區，德國目前使用的柴油中有6%為生質柴油(B6)，預計2020年石化柴油中生質柴油的比例將達20%。

國內環保署於 2007 年起，要求回收廢食用油 (Waste cooking oil, WCO)，WCO 除了用於工業或養豬飼料外，並可用於生產生質柴油，以達到減少化石能源的使用和降低二氧化碳排放的目標；台灣於 2008 年開始，車用柴油全面使用 B1 生質柴油，並於 2010 年環保署更進一步公布，全面提升至 B2 生質柴油。目前諸多研究結果指出，生質柴油可有效減少引擎尾氣懸浮微粒的排放[4,5,6]，未來國內勢必順應國際的環保趨勢，添加更多比例的生質柴油於傳統柴油中。

重型柴油引擎排放減量技術除仰賴油品的改良外，同時也要釐清引擎於不同操作狀態 PM_{2.5} 之排放特性，相關文獻指出，柴油引擎負載改變，對於尾氣微粒的排放影響甚大[6]，有鑑於此，本研究主要探討使用不同比例廢食用油生質柴油和不同引擎操作條件對 PM_{2.5} 排放的影響。

二、研究方法

本研究利用重型柴油引擎執行四項歐洲穩態測試循環條件(ESC)，分別為模式 1、2、3 及 9，其測試條件之負載、扭力、轉速及尾氣溫度如表 1 所示；本實驗所使用的採樣稀釋系統為連續式高流量的稀釋系統，稀釋比例為 1:20；稀釋比與採樣流量皆可以調整，稀釋系統將抽引 2.5 L/min 的引擎廢氣，並利用空氣壓縮機與 HEPA 等過濾設備，提供 47 L/min 的乾淨空氣，與引擎廢氣混合後，即可排除尾氣高濕、高溫的情形，重型柴油引擎採樣稀釋系統如圖 1 所示。

本研究所使用之測試油品分別為添加 2%、10% 與 20% 廢食用油之 B2、B10 和 B20 生質柴油，廢食用油生質柴油油品特性如表 2 所示。其引擎排放 PM_{2.5} 之碳成分分析，以 340 °C、0.5 lpm 純氧的條件下，燃燒 80 分鐘移除有機碳，燃燒完成後再利用元素分析儀 (EA)，分析樣本中元素碳(EC)及有機碳(OC)含量。

表 1. 引擎測試條件

負載 (%)	ESC 測試條件	扭力 (N-m)	轉速 (rpm)	排氣溫度 (°C)
0	1	-	750	76
25	3	98	1800	211
50	9	192	1800	324
100	2	355	1650	441

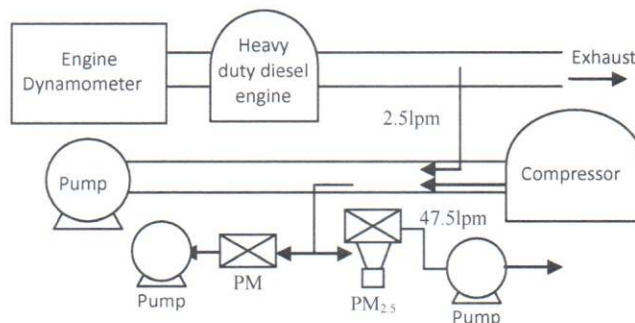


圖 1. 重型柴油引擎採樣稀釋系統

表 2. 廢食用油生質柴油油品特性

油品特性	B0	B20	B100
密度, 15°C (g ml ⁻¹)	0.8386	0.8520	0.8805
黏度, 40°C (cSt)	3.117	3.592	4.539
硫(ppmw)	34.5	15	2.1
硫(wt%)	84.95	82.39	75.87
氮(wt%)	13.46	14.11	12.17
總發熱值(cal g ⁻¹)	10259	9965	9516

三、結果與討論

3-1 廢食用油生質柴油對 PM_{2.5} 及其碳成分之影響

使用 B2、B10 與 B20 廢食用油生質柴油，利用歐洲穩態循環之模式 1、3、9 等三項操作條件，量測 PM_{2.5}、TC、EC 與 OC 加權平均質量濃度結果如圖 2 所示，由圖可知，生質柴油添加比例越高，PM_{2.5} 質量濃度排放越低，B2、B10、B20 生質柴油 PM_{2.5} 排放依序為 52、49、47 mg/m³，B10、B20 生質柴油與 B2 市售柴油相比，其 PM_{2.5} 質量濃度分別約下降 5% 與 9%。相關文獻與本研究結果相同，使用生質柴油可有效降低 PM_{2.5} 的排放。

生質柴油因具有高黏度、低揮發等特性，霧化後的油滴較易均勻分布於引擎汽缸中，空氣燃料混和效果較傳統柴油佳，可改善尾氣微粒排放的問題；而油品組成成分上，生質柴油的含氧量較石化柴油多，可使燃料氧化較完全，並可促使已生成之碳微粒氧化，另外芳香族化合物、硫酸鹽化合物的成分較傳統柴油少，其中硫酸鹽化合物為排放微粒中主要物種之一，而芳香族化合物為碳黑微粒的前驅物。

使用 B2、B10、B20 油品，TC 排放依序為 35、37、42 mg/m³，B10 與 B20 生質柴油與 B2 柴油相比，其 TC 質量濃度分別約增加 5% 與 20%，排放 OC 質量濃度依序為 24、31、32 mg/m³，EC 排放依序為 11、6、10 mg/m³，

OC/EC比值分別為2.2、5.2、3.2，生質柴油添加比例由2%至20%，有機碳成分排放增加，元素碳則稍有下降的現象；相關文獻表示生質柴油成分含有較高可溶性有機物質(SOF)成分[6]，故添加比例越高，引擎排放細微粒中OC所占比例越多，本研究與文獻結果一致，使用生質柴油在引擎中負載以下運轉，排放PM_{2.5}中碳成分主要為有機碳。

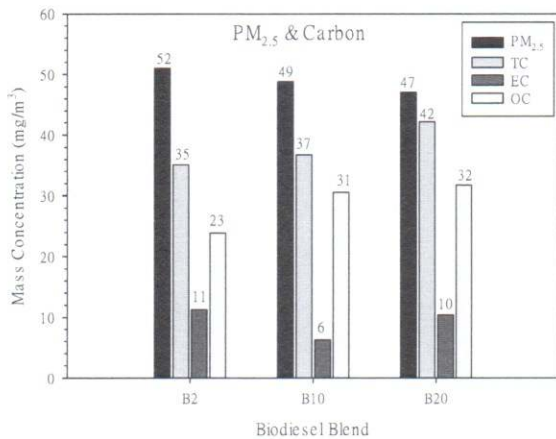


圖2. 不同比例生質柴油PM_{2.5}與碳成分組成變化

3-2 引擎負載對PM_{2.5}及其碳成分之影響

重型柴油引擎排放PM_{2.5}、TC、EC與OC質量濃度結果如圖3及表4所示，引擎負載由怠速(0%，750 rpm)、低負載(25%，1800 rpm)、中負載(50%，1800 rpm)、全負載(100%，1650 rpm)，PM_{2.5}排放依序為25、43、60、83 mg/m³，TC排放依序為18、29、42、69 mg/m³，TC占PM_{2.5}的比例約為67%~89%，總碳成分為PM_{2.5}中主要物種；怠速至全負載，PM_{2.5}與TC排放增加約3倍；由圖4可知，柴油引擎於全負載操作下，呈現空氣進氣量低、油耗量大的狀態，導致空燃比下降，增加粒狀污染物的排放。

引擎於0、25、50、100%負載，排放OC濃度分別為13、22、27、21 mg/m³，EC排放分別為4、8、15、47 mg/m³，研究結果指出，怠速至全負載，OC/EC比值由3.3降至0.5，空燃比從170降至23，燃燒室中空氣所佔比例大幅下降，燃料燃燒不完全的現象加劇，導致尾氣排放大多以焦黑碳粒形式排出，且全負載燃燒溫度達550℃，碳粒中有機碳成分在此高溫下易揮發，故尾氣中碳成分組成以元素碳為主。

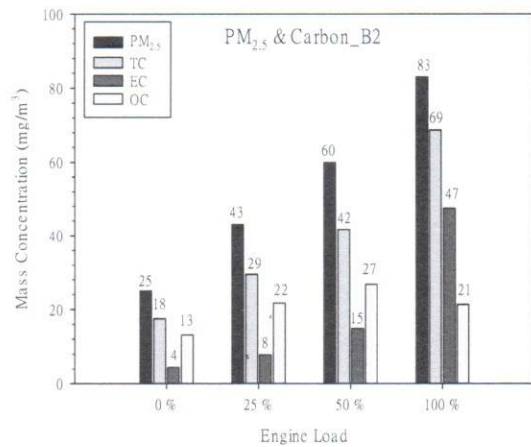


圖3. 不同負載排放PM_{2.5}與碳成分組成變化

表4. 使用B2油品在不同操作條件下PM_{2.5}及其碳成分的質量濃度

Fuel type	B2			
	Idle	Low	Medium	Full
Engine Load	Idle	Low	Medium	Full
Load Percent (%)	0	25	50	100
Exhaust Temp(°C)	70	210	310	550
Fuel Cons.(g/min)	26	82	148	203
Air/Fuel Ratio	170	66	45	23
PM _{2.5} (mg/m ³)	25	43	60	83
TC (mg/m ³)	17	30	42	68
OC (mg/m ³)	13	22	27	21
EC (mg/m ³)	4	8	15	47
OC/EC	3.3	2.8	1.8	0.5

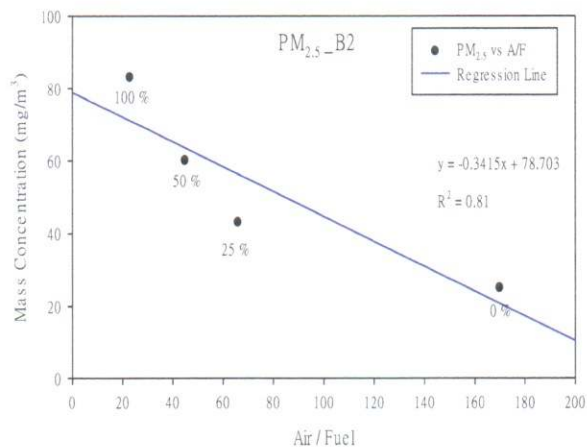


圖4. 不同比例生質柴油PM_{2.5}與碳成分組成變化

四、結論與建議

- (1) B2、B10、B20 生質柴油排放濃度依序為 52 mg/m³、49 mg/m³、47mg/m³，生質柴油添加比例越高，PM_{2.5} 質量濃度排放越低，B10、B20 生質柴油與 B2 市售柴油相比，其質量濃度分別約下降 5 % 與 9 %。生質柴油降低 PM 排放之原因，可歸納為油品成分與油品特性等兩項因素，生質柴油的含氧量較石化柴油多，可使燃料氧化較完全，在油品特性方面，生質柴油因具有高黏度、低揮發等特性，霧化後的油滴較易均勻分布於引擎汽缸中，使高溫燃燒排放的微粒較少。
- (2) 使用 B2、B10、B20 三種生質柴油，PM_{2.5} 中 TC 所占百分比約為 68 % ~ 89 %，引擎排放微粒中主要組成物種為總碳成分，其中碳成分之 OC/EC 比值介於 2.2 ~ 5.2，文獻指出，因生質柴油中含有較高 SOF 成分，故引擎排放尾氣微粒中，有機碳排放濃度高於元素碳。
- (3) 引擎負載增加，PM_{2.5} 微粒排放明顯上升，由怠速 (0 %、750 rpm)、低負載 (25 %、1800rpm)、中負載 (50%、1800 rpm) 至全負載 (100 %、1650 rpm)，PM_{2.5} 質量濃度排放依序為 25、43、60 與 83 mg/m³，引擎負載百分比由 0 % 增至 100 %，PM_{2.5} 排放約增加 3 倍，引擎於全負載操作時，燃燒室呈現進氣量少、進油量大的低空燃比狀態，導致尾氣微粒燃燒不完全，PM_{2.5} 與總碳等粒狀污染物排放增加。
- (4) 引擎負載百分比由 0、25、50 至 100 %，OC 排放依序為 13、22、27、21 mg/m³，EC 排放依序為 4、8、15、47 mg/m³，OC/EC 比值從 3.3 降至 0.5，影響 OC/EC 比值下降的因素，主因為燃燒溫度從怠速的 70 °C，增至全負載的 550 °C，有機碳成分因高溫而氧化揮發，而元素碳易於缺氧的情況下，油滴產生熱裂解反應而生成，故負載越大 OC/EC 比值越低。
- (5) 綜合研究成果，生質柴油添加比例、引擎操作條件、油耗速率及空燃比皆影響 PM_{2.5} 及其 OC/EC 比值。

五、致謝

作者感謝行政院國家科學委員會經費補助此研究計畫 (NSC 100-EPA-F-009-001)

六、參考文獻

1. Solomon, G. M. and J. R. Balmes, "Health Effects of Diesel Exhaust," *Clinics in occupational and environmental medicine*, 3, 61-80 (2003).
2. Muzyka, V., S. Veimer, and N. Schmidt, "On the Carcinogenic Risk Evaluation of Diesel Exhaust: Benzene in Airborne Particles and Alterations of Heme Metabolism in Lymphocytes as Markers of Exposure," *The Science of The Total Environment*, 217, 103-111 (1998).
3. Ålander, T. J. A., A. P. Leskinen, T. M. Raunemaa and L. Rantanen, "Characterization of Diesel Particles Effects of Fuel Reformulation, Exhaust Aftertreatment, and Engine Operation on Particle Carbon Composition and Volatility," *Environmental Science & Technology*, 38, 2707-2714 (2004).
4. Cheung, K. L., A. Polidori, L. Ntziachristos, T. Tzankiozis, Z. Samaras, F. R. Cassee, M. Gerlofs and C. Sioutas, "Chemical Characteristics and Oxidative Potential of Particulate Matter Emissions from Gasoline, Diesel, and Biodiesel Cars," *Environmental Science & Technology*, 43, 6334-6340 (2009).
5. Lin, Y.C., C.F. Lee and T. Fang, "Characterization of Particle Size Distribution from Diesel Engines Fueled with Palm-Biodiesel Blends and Paraffinic Fuel Blends," *Atmospheric Environment*, 42, 1133-1143 (2008).
6. Tsai, J. H., S. J. Chen, K. L. Huang, Y. C. Lin, W. J. Lee, C. C. Lin and W. Y. Lin, "PM, Carbon, and PAH Emissions from a Diesel Generator Fuelled with Soy-Biodiesel Blends," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 179, pp. 237-243 (2010).