

## 中國造船暨輪機工程研討會——不同噴油參數時柴油混摻綠色柴油及進氣處添加丁醇對密閉式循環柴油引擎之性能效應研究(III)

吳鴻文\*<sup>1</sup> 何靖華\*

\*國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

關鍵詞：噴油參數、進氣處加丁醇、密閉式循環柴油引擎、KIVA-3V、柴油混合綠色柴油、廢氣再循環

國科會計畫編號：MOST 111-2221-E-006-087

### 摘要

本計畫基於前兩年的研究計畫成果，將共軌噴射系統、電子控制噴射丁醇和廢氣再循環(EGR)系統安裝在密閉式循環柴油引擎(CCDE)上。在不同噴油參數下使用柴油混摻綠色柴油、進氣處添加丁醇和進行EGR來探討引擎的運轉性能，進而改善CCDE的運行效能。在引擎進氣處加裝溫度及濕度感測器，以電腦監控進氣溫度和相對濕度。在固定丁醇的噴射時機下，改變綠色柴油混合率、噴射參數、丁醇質量分率和EGR比率進行CCDE實驗。修改KIVA-3V並結合詳細化學動力模式，以模擬CCDE進氣處噴丁醇、柴油/綠色柴油混合下的燃燒和污染，並進行數值模擬與實驗結果的比較。實驗結果顯示使用密閉式循環系統能夠有效降低各種污染物(CO、HC、NO<sub>x</sub>、Smoke及PM<sub>2.5</sub>)。綠色柴油混摻柴油比率越高，具有降低CO、HC、NO<sub>x</sub>、Smoke及PM<sub>2.5</sub>的趨勢。提前噴射正時與增加噴射壓力皆能有效抑制某些排放污染物的產生。數值模擬結果與實驗數據呈現相同的趨勢，誤差值大約為4.7%，可驗證模擬結果的準確性。

<sup>1</sup> 聯絡作者 名字(author@sample.com.tw)

## 前言

由於能源的需求逐年增加，而全球環保的意識逐步增長。從巴黎協議[1]公約中還是努力想把氣溫升幅控制在工業化前水平的 $1.5^{\circ}\text{C}$ ~ $2^{\circ}\text{C}$ ，與先前京都協議不同的是巴黎協議減排義務擴及亞洲國家，此亦代表著空氣污染的責任更是全世界要一起正視的議題。全球主要能源日趨衰竭，要更有效率的運用所擁有的能源是眼前要克服的議題。

化石燃料是全球主要消耗的能源，廣泛應用在陸上及海上動力的主要來源。大量的使用化石燃料雖然帶動了經濟文明的快速成長，卻也伴隨著石化燃料蘊藏量急速減少，燃燒後的產物HC、CO及NO<sub>x</sub>等排放嚴重影響空氣品質、大氣層破壞及人體健康影響等。可從我國法規與政策裡看到政府和人民都很注重空污這個問題[2]，並且積極的規範排放的標準來達到更好的生活環境。因此，找到替代化石燃料並且減少排放的汙染物是最好的方法，而來自生物基產品的生質燃料是可作為交通工具所使用的燃料替代品。Sonthalia等[3]指出生物性油脂作為原料的「氫化植物油(Hydrotreated Vegetable Oil, HVO)」，又稱「綠色柴油」。綠色柴油則具有高的十六烷值、密度低及優異的冷流特性；燃燒後排放氣體與柴油相比，有較低的NO<sub>x</sub>、PM、HC、CO及溫室氣體的排放。因為綠色柴油對環境汙染的負荷比較輕微，在國內外常常是被人討論的一種能源，對於綠色柴油運用於引擎方面也有相關的研究投入。

## 研究目的

有鑑於發展清淨之替代燃料運用綠色柴油對引擎性能及汙染排放的改善，這項計畫旨在將柴油共軌噴射系統、柴油混摻綠色柴油和EGR安裝於CCDE系統中，具體設備配置如圖1所示。以探討CCDE系統的性能改善效果，並將其與柴油引擎運轉性能進行比較。建立CCDE濕度監測系統，隨時監控進氣相對濕度，並搭配虛擬儀表(LabVIEW)進行電腦診斷工作，對於相對濕度異常現象提出警報，如圖2所示。另外國內外研究較偏重於實驗測試，因此本研究將同時使用開放原始程式碼之引擎模擬程式KIVA-3V [4]，對實驗條件進行數值模擬計算，結合詳盡化學反應動力模式 [5, 6]，以模擬進氣處加丁醇柴油引擎及CCDE進行性能分析，預測柴油引擎氣缸內之壓力、溫度、熱釋放率與氮氧化物及黑煙等汙染物，並與實驗相互驗證。

## 文獻探討

蘇脩聖等[7]透過實驗方式，顯示綠色柴油添加比例為5%時，可降低粒狀汙染物排放，添加量為5%時具有最低至動燃油消耗和最佳的熱效率。Kroyan等[8]探討生質柴油、HVO 和乙醇混合物於柴油引擎及HVO 和乙醇混合物於汽油引擎的二氧化碳排放量，指出較高濃度的生質柴油對柴油引擎的二氧化碳排放沒有明顯效應。觀察到 HVO 和乙醇混合在所有情況下CO<sub>2</sub>的排放量是較低，相較純柴油的CO<sub>2</sub>減少10%以上。Hunicz等[9]以部分預混壓縮點火燃燒模式下與增壓廢氣再循環 (EGR)及傳統燃燒模式下研究

HVO 的效應。與柴油相比，空氣路徑優化的 HVO 燃燒有利於更高的 EGR 率(25 % 對 20 %)和更低的增壓壓力(130 kPa 對 165 kPa)。在這種情況下，HVO 的指示熱效率 (43.5%) 比柴油高 1.5 個百分比。同時，HVO 產生超低的顆粒排放 (0.055 g/kWh)，引擎輸出的 NO<sub>x</sub> 排放比優化的柴油燃燒高出 46%。Bortel 等[10]提出標準柴油燃料、加純氫處理植物油和由 30% HVO 和 70%標準柴油燃料組成混合油的實驗比較結果；純加氫處理植物油與常規柴油燃料相比，燃燒的排放物 CO 和 HC 有顯著下降，分別為 61.8% 和 64.3%；並且 NO<sub>x</sub> 排放量略下降約 4.2%。

陳榮洪等[11]比較100%純柴油、80%純柴油混合20%廢食用油生質柴油和80%純柴油混合20%綠色柴油對渦輪增壓引擎之黑煙與廢氣排放效應，含綠色柴油具有高熱值來抑制opacity (%-m<sup>3</sup>/kWh)排放更為明顯。Millo 等[12]使用超低硫柴油 (ULSD) 和高百分比混合 (B30 - 30% vol.) 的 ULSD 和生質燃料(油菜籽甲酯(RME)和HVO)的 Euro 5 1.3L 乘用車柴油引擎考慮了HVO與柴油相比，RME (B30) 和 HVO (B30) 在中、高負載下顯著降低了 PM 特定排放量(平均分別為 34% 和 14%)。相反地，在低負載下，與柴油相比，RME (B30) 的特定 PM 排放量增加了 32%，而 HVO (B30) 仍然減少 32%。Suarez-Bertoa 等[13]應用五種不同的燃料混合物，評估純HVO燃料和HVO混合物對兩輛現代柴油用車的排放汙染的影響。結果顯示HVO-100比其他燃料混合物(包括B7和柴油)的二氧化碳排放量低約4%。Cheng 等[14]將不同環境空氣條件下的HVO和歐洲標準柴油的噴霧特性進行比較，噴霧幾何形狀則沒有顯著差異，顯示HVO似乎具有與傳統的石油柴油相似的空氣與燃料預混合過程。Marasri 等[15]在恆定體積燃燒室中，加氫處理的植物油-柴油混合物對燃燒特性的影響，並且用不同的氧氣濃度來模擬引擎不同情況下的 EGR。降低環境溫度導致點火延遲更長，峰值放熱速率更高。HVO 的密度、黏度和蒸餾溫度在 T90 時較低，噴射後的 HVO 蒸發效果更好。Ushakov [16]對加氫處理的植物油與常規船用瓦斯油的燃燒和排放特性進行比較，其結果顯示氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放量平均減少 10-15%，而總未燃燒碳氫化合物(THC)排放量減少 50-55%。

氣缸內混合氣的形成影響著柴油引擎的燃燒過程和排放汙染，可燃混合物形成和燃燒過程的一個重要因素就是燃油的噴霧特性，而噴油參數對燃油的噴霧特性則有重要的影響，所以噴油參數的研究對燃燒過程和排放特性的影響有重要意義。吳鴻文等[17]以不同預燃式柴油引擎的噴油參數配合不同轉速和負荷進行實驗量測，蒐集多個噴油壓力、燃氣壓力、噴嘴針閥升程和曲柄角資料，經電腦系統分析點火延遲及熱釋放率。噴射正時提前角度、提高噴油壓力及較大噴油率皆會有效降低 Smoke、CO 及 HC 濃度，但 NO<sub>x</sub> 濃度會提高。過大的噴射正時提前角度及提高噴油壓力都會導致 NO<sub>x</sub>、Smoke、CO 及 HC 濃度增加。陳宇元[18]使用二甲醚與 B1 超級柴油之混合燃料進行引擎試驗，研究不同混合比例下，改變噴射正時與噴油參數，對柴油機性能與廢氣排放之影響。結果顯示混合燃料使用原廠噴油設定對引擎性能與廢氣

排放皆較柴油差。吳鴻文等[19]研究方法針對現有之柴油引擎，在不變更引擎結構的原則下，建立排放污染取樣的量測系統。在柴油中添加甲酯後，Smoke的濃度在高轉速及高負荷時會較柴油低，且隨著甲酯比例的增加而降低。適當的增大噴油定時將有助於降低Smoke、CO和HC；但在高噴射壓力下，過大的噴油定時提前角將導致NO<sub>x</sub>、CO和HC的濃度均增加。Karikalan等[20]實驗結果顯示柴油引擎的性能和污染物主要依賴於燃料噴射壓力、噴射次數、噴射的燃料量、噴射狀態、燃燒室設計和噴嘴噴射模式等因素。Xia等[21]在超臨界條件下進行共72個實驗案例，改變噴射壓力從60 MPa到180 MPa不等。結果顯示不同的臨界條件支配著噴霧的撞擊特性。當雙噴霧穿透和碰撞時，液滴往往會聚結、反彈及分離，然後形成噴霧扇。超臨界條件降低了環境壓力對180 MPa噴射壓力下碰撞後發展的影響。雙噴射撞擊與單次自由噴射相比，顯示出更短的燃氣混合持續時間，降低了对超高噴射壓力的要求。Wang等[22]在1335 r/min的恆定轉速下，探討引燃柴油噴射正時對引燃柴油和天然氣燃燒階段的效應。結果顯示引燃柴油和天然氣的燃燒階段有明顯的燃燒持續時間或燃燒重疊期均呈縮短趨勢，但隨著柴油預噴射的提前，燃燒重疊期與燃燒持續時間的比值增加，最短的燃燒持續時間對應於較低的制動比能量消耗和排污。

Du等[23]研究恆定的噴射質量，在較高的噴射壓力下，撞擊噴射火焰的點火延遲較長，在較高的噴射壓力下燃料霧化效果更好，這有利於縮短燃燒持續時間，改善經濟性能並減少排放。林九洲[24]以六缸共軌噴射柴油引擎，探討噴射正時、噴油壓力及噴油對燃燒特性及污染物排放的影響。結果顯示提前噴射正時與提高噴油壓力會使最大氣缸壓力、最大氣缸壓力上升率及氮氧化物濃度增加，而一氧化碳和不透光率則是會下降，並且較高的噴油壓力也能縮短點火延遲。林英瑋[25]透過氣缸壓力的量測及燃燒釋放率之計算，得知提前噴射正時角度，使熱釋放增加、氣缸壓力峰值上升及提升引擎性能，相對的燃燒最高溫度上升會使NO<sub>x</sub>排放量會增加，必須用EGR系統抑制NO<sub>x</sub>的生成。蔡銘晉[26]研究電噴控制系統在引擎低轉速低負載時，扭力輸出比傳統引擎上升約52%、NO<sub>x</sub>排放濃度下降8%、Smoke排放濃度下降35%。陳嘉原[27]使用共軌噴射系統提前噴柴油時，扭力平均上升了17.5%、smoke的排放量上則平均下降了32.8%，NO<sub>x</sub>則平均上升了70.6%不等，在CO、HC的改善方面，分別平均下降了約53.8%、41.5%。周志正[28]研發和共軌柴油引擎可配合引擎管理系統，分析燃燒熱釋放的過程，探討不同油品與不同噴油參數控制，對於引擎輸出功率及NO<sub>x</sub>污染排放的影響。

丁醇是正丁醇的簡稱，以下丁醇或正丁醇的稱呼係使用原文獻的稱呼。Rajesh Kumar等[29]以甲醇、乙醇、丙醇及丁醇相比，丁醇有較高的熱值、十六烷值、閃燃點與沸點。Feng等[30]評估正丁醇直接缸內噴射和汽油口燃料噴射的雙噴射的燃燒性能，正丁醇DI的增加導致更高的最大燃燒壓力；這主要是由於正丁醇的燃燒速度更快和燃燒持續時間相對較短。Li等[31]研究丁醇對用低壓迴路EGR操作的SIDI引擎的影

響，丁醇與EGR結合顯示出減少排放的潛力，同時改善燃料經濟性。與汽油相比，所有混合物產生較低的汽油當量比燃料消耗及較低的CO、未燃燒的HC和PM排放。Vojtisek-Lom等[32]在共軌噴射的渦輪增壓柴油引擎上實驗檢驗正丁醇和異丁醇作為氫化植物油(HVO)的含氧化合物增量劑的潛力。丁醇混摻柴油燃料會增加點火延遲和多環芳香烴的產生，將正丁醇或異丁醇以30%的濃度混合到HVO中可降低總顆粒質量、元素碳和多環芳香烴的排放量。Mohebbi等[33]實驗研究正丁醇的添加於柴油對柴油引擎燃燒特性和排放的影響，丁醇的導入會延遲燃燒的開始，因此應延遲直接噴射正時以保持恆定的燃燒相位；丁醇的添加減少了CO排放。Wei等[34]發現生物柴油-乙醇摻混合物在減少顆粒物和NO<sub>x</sub>排放方面更有效，則生物柴油-丁醇混合物減少CO和HC排放量的增加。Yusri等[35]以柴油機在丁醇與柴油混合的丁醇/柴油百分比體積比分別為5%、10%和15%下進行了測試。實驗結果顯示丁醇/柴油共混物的缸內壓力，升壓速率和放熱速率較低；燃燒分析結果顯示有更長的點火延遲和燃燒持續時間。15%丁醇/柴油共混具有較高的引擎循環變化，引擎排放出的氮氧化物、一氧化碳和未燃碳氫化合物皆減少。Xiao等[36]以正丁醇和生物柴油的0%、10%、20%或30%混合燃料，在0.13-1.13 MPa制動平均有效壓力的負載下，進行柴油機的燃燒和排放特性實驗。結果顯示添加丁醇可改善燃燒性能，並且減少煙塵的形成。

本研究計劃將延續計劃主持人於內燃機領域研究所累積之經驗[37, 38]，輔助燃料於25°C時，有較好運轉性能；將在進氣處於25°C噴入丁醇之方式。為了發展替代燃料運用於引擎生質柴油一直是國內外研究探討的項目之一，選用綠色柴油來混摻柴油是因為它的性質與柴油相似、對於環境的負擔較小，並無學者發表有關共軌噴射柴油引擎燃料混摻綠色柴油，於進氣處噴射丁醇與加裝廢氣再循環系統之性能與排氣汙染研發論文。本研究計劃將於柴油混摻綠色柴油代替燃料之方式，對進氣處加丁醇，探討柴油引擎做進一步的研究發展。研究計劃使用一具單缸直噴式柴油引擎(規格如表1)改裝成共軌噴射系統，以進行引擎性能之研究。丁醇將由流量控制調節後，導入進氣處和新鮮進氣混合進入柴油引擎與燃油混合進行燃燒，並利用共軌噴射系統改變噴油參數，探討柴油引擎缸內燃燒性能及排氣汙染。最後，將於明年進行整體系統結合CCDE的研究計畫，改善CCDE之運轉性能及系統運轉週期，擴大CCDE相關研究之成果。另外國內外研究較偏重於實驗測試，因此本研究將同時使用開放原始程式碼之引擎模擬程式KIVA-3V對實驗條件進行數值模擬計算，以其擴大研究的成果。

## 研究方法

本研究計劃將延續前兩年研究計畫的成果，將柴油共軌噴射系統、柴油混摻綠色柴油及EGR系統安裝於密閉式循環，並在不同噴油參數下柴油混摻綠色柴油、進氣處添加丁醇及EGR，進行實驗與數值模擬及性能測試改善。本研究將建立CCDE的濕度監測系統，能隨時監控進氣相對濕度，配合虛擬儀表(LabVIEW)

的特色做電腦診測的工作，同時診斷系統相對濕度之異常現象提出警報功能。讓使用者藉由個人電腦上所呈現出來的簡易圖形界面控管引擎系統之及時表狀態。使人員能更換離心式汽水分離器的乾燥劑或增加乾燥劑數量，也使用多段式鼓風機調整轉速，減少CCDE進口相對濕度。密閉式循環共軌柴油引擎中的丁醇導入系統使用電子控制單元(ECU)、丁醇噴嘴及數據微調處理器，透過此系統將能提供暫態的控制方式，精確的對於丁醇導入時機及導入量進行及時控制。不同引擎的負荷下，改變綠色柴油混合率、噴油參數、丁醇質量分率及 EGR 比率等條件下實驗，進行引擎氣缸壓力、排氣溫度、空氣流量、耗油量和氣體壓力等實驗量測，探討密閉式循環共軌柴油引擎系統的性能的提升比較柴油引擎運轉性能。量測引擎排氣各污染值(CO/HC/CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、Smoke及PM<sub>2.5</sub>等)，探討引擎的穩態和暫態運轉性能與排氣污染物的關係。經由修改 KIVA-3V 軟體之參數及副程式，結合詳細化學反應動力模式來模擬進氣處噴丁醇柴油引擎安裝在 CCDE 系統下之燃燒模式(裡面考慮包含有人造空氣、丁醇及 EGR 氣體進氣組成之化學反應)，來得到熱釋放率、預測氣缸壓力、Smoke 與 NO<sub>x</sub> 濃度。將實驗數據和所量測之數值加以互相印證，確保 CCDE 三維暫態模擬的準確性。探討柴油混摻綠色柴油在進氣處噴入丁醇對密閉式循環共軌噴射柴油引擎的紊流流場、燃料混合及溫度場的影響，進而瞭解進柴油混摻綠色柴油對氣缸壓力、熱釋放率及 Smoke 與 NO<sub>x</sub> 濃度的效應。

## 結果與討論

1. 將綠色柴油共軌噴射柴油引擎與CCDE系統進行結合(設備配置如圖1)。
2. 建立CCDE的濕度偵測線路，能夠隨時監控引擎進氣的相對濕度，來提升引擎整體的性能。
3. 根據本研究團隊的研究成果，圖3至圖12有密閉式循環採用30% KOH，從圖3觀察到隨著噴射正時的提前，NO<sub>x</sub>的數值呈上升趨勢。這種現象主要是由於噴射正時的提前會導致點火延遲增加，進而使得缸內溫度上升，導致NO<sub>x</sub>的生成量增加。另一個趨勢是隨著綠色柴油混摻比的增加，NO<sub>x</sub>的數值呈現下降的趨勢，由於綠色柴油的添加降低了燃燒過程中的燃燒溫度，從而抑制了NO<sub>x</sub>的生成。密閉式循環系統中噴灑霧化KOH水溶液來吸收NO<sub>x</sub>的濃度，有使用密閉式循環系統平均減少16.94%的NO-X濃度。圖4-圖7顯示將噴射正時從5 °BTC提前至10 °BTC，能夠有效地降低Smoke、PM<sub>2.5</sub>、CO以及HC的排放。綠色柴油混摻比例逐漸提高的情況下，能夠觀察到所有排放污染物皆呈現下降趨勢。這種現象主要歸因於噴射正時提前所造成的點火延遲增加，使得燃燒過程的混合時間變長，進而促使燃料更加充分燃燒，並且綠色柴油的混摻進一步增強這一效應，因為綠色柴油中不含雙鍵碳氫化合物與氧，降低污染物的產生。此外，使用密閉式循環系統在所有排放污染物中均有下降趨勢，其中密閉式循環系統添加氧氣，提供更好燃燒

環境，減少CO產生；Smoke和PM<sub>2.5</sub>透過內部噴灑霧化KOH水溶液能夠有效沖洗吸收；KOH水溶液能與CO<sub>2</sub>發生反應，讓閉環中CO<sub>2</sub>減少使得氣缸中有更好燃燒，減少因為燃燒不完全所產生的HC。Smoke平均減少27.36%、PM<sub>2.5</sub>平均減少43.44%、CO平均減少32.61%和HC平均減少30.75%。這些結果強調了噴射正時調整、綠色柴油混摻和使用密閉式循環對於降低柴油引擎排放污染物的的重要性。

4. 圖8顯示出隨著噴油壓力的增加，NO<sub>x</sub>排放呈現上升趨勢。這一現象歸因於提高的噴油壓力導致燃料液滴的細小化和更迅速的汽化，進而促使燃燒速率的加快以及燃燒溫度的提升，導致NO<sub>x</sub>的生成增加。隨著綠色柴油混摻比例的增加，NO<sub>x</sub>排放呈現下降的趨勢。這個趨勢的原因是綠色柴油混摻的增加可減少燃燒過程中的高溫區域，降低NO<sub>x</sub>的生成。這些結果突顯噴油壓力和綠色柴油混摻對於調節柴油引擎NO<sub>x</sub>排放的影響。密閉式循環隨著不同噴射壓力同樣具有降低NO<sub>x</sub>的效果，噴灑霧化KOH水溶液來吸收NO<sub>x</sub>的濃度，有使用密閉式循環系統平均減少16.88%的NO-X濃度。圖9-圖12顯示噴射壓力從400 bar提升到800 bar，Smoke、PM<sub>2.5</sub>、CO及HC有降低趨勢。共軌噴射系統具有能夠提高噴油壓力的優勢，進一步改善燃料的霧化特性。這種系統使得綠色柴油混合柴油燃料從噴油嘴噴入氣缸時，燃料液滴能夠更為細小地被霧化，此效果不僅增強了燃料的蒸發過程，同時也促進空氣和燃料更好地混合。同樣地，在不同噴射壓力下，密閉式循環系統對所有排放污染物都有下降的趨勢，Smoke平均減少26.72%、PM<sub>2.5</sub>平均減少43.34%、CO平均減少31.82%和HC平均減少30.88%。
5. 圖13顯示引擎廢氣在燃燒室內是不可燃氣體，其在燃燒過程中吸收部分熱能，進而降低燃氣溫度，減緩熱釋放率和氣缸壓力。添加丁醇導致混合燃料的點火延遲時間較長，因為丁醇的蒸發潛熱較高且十六烷值較低(如表2)，有利於空氣燃料在氣缸內蒸發與混合，再加上丁醇的高含氧量，則加快了燃燒速度，減少燃燒時間，進而提高了最大氣缸壓力和熱釋放率。從圖14可觀察到隨著丁醇添加量的增加，制動熱效率呈現上升的趨勢。此趨勢歸因於丁醇具有富氧特性，有助於燃燒過程，同時由於丁醇的熱值較低，也導致了較低的總輸入能量，進一步提高制動熱效率。
6. 根據圖1觀察到隨著負荷的增加，NO<sub>x</sub>排放量呈現上升的趨勢。主要原因是隨著引擎負荷增加，每個燃燒循環中的噴油量也增加。然而，當丁醇質量分率增加時，對於NO<sub>x</sub>排放有明顯的降低效果，這是因為丁醇擁有較高的汽化潛熱和較低的熱值，有助於實現更均勻的燃燒，並抑制最高燃燒溫度。模擬結果與實驗數據呈現相同的趨勢，誤差值大約為4.85%，進一步證實了模擬結果的準確性。根據圖26觀察到Smoke排放隨著引

擎負荷的增加而呈現上升的趨勢，由於每個燃燒循環中的噴油量增加所導致的。Smoke排放也隨著丁醇質量分率的提高而呈現下降的趨勢。隨著丁醇的添加，燃燒形成富氧燃燒的條件，進一步增加Smoke的氧化，從而減少Smoke的產生。模擬結果與實驗數據呈現相同的趨勢，誤差值大約為4.7%，驗證模擬結果的準確性。

### 成果自評

本計畫建立實驗設備與數值模擬，並達成預定工作進度與目標。完成原先柴油共軌噴射引擎結合密閉式循環系統於進氣處添加丁醇之設備與數值模擬，並且在引擎進氣端安裝溫度及濕度監測器，有效監測進氣端的內部情況。將柴油共軌噴射引擎結合密閉式循環系統，加入EGR系統和進氣處採用ECU將丁醇輔助燃料以噴嘴噴入。在固定密閉式循環的KOH水溶液濃度和引擎轉速，不同負荷以及不同丁醇質量分率，進行不同噴射壓力、噴射正時與不同綠色柴油混摻比之燃燒運轉與測試，已確定整個系統正常運轉。透過模擬與實驗值的對比驗證，證實KIVA-3V模型的副程式和參數調整，能夠準確預測燃燒過程中的熱釋放和污染物排放情況，包括進氣和壓縮行程的燃燒模式。根據研究結果，觀察到噴射正時的提前會為綠色柴油混摻柴油提供充足的時間進行均勻混合。丁醇預混合燃料的燃燒形成富氧燃燒的條件，進而降低了CO、HC、Smoke和PM<sub>2.5</sub>等污染物的排放。噴射壓力的增加則導致NO<sub>x</sub>排放的上升，但透過提高EGR系統和綠色柴油混摻比，能夠有效地減少CO、HC、NO<sub>x</sub>、Smoke和PM<sub>2.5</sub>等污染物的排放。本次實驗設備新增加的密閉式循環系統，經過反覆實驗後可觀察到透過密閉式循環系統中的二氧化碳吸收槽、液氧管路和霧化KOH水溶液能夠為氣缸中提供更好的燃燒環境以及沖洗吸收排放污染物。

### 誌謝

本研究承蒙行政院科技部MOST 111-2221-E-006-087-支助經費得以完成，也感謝所有參與本研究計畫之研究人員，花費時間與心思達到計畫預期之目標。並且感謝國立成功大學提供場地，讓研究人員能平安做實驗，特此謝忱。

### 圖與表

表1、Kubota RK125 柴油引擎規格

項目	單位	規格
冷卻模式		水冷

行程		4
氣缸直徑x行程	mm	94 × × 90
排氣量	cc	624
最大輸出馬力	kW/rpm	9.2/2400
連續輸出馬力	kW/rpm	7.7/2200
最大扭矩	N-m/rpm	39.6/1800
	kgf/rpm	4.038/1800
燃燒室型式		直噴式
壓縮比		18
噴射壓力	MPa	21.57-22.56
	kgf/cm <sup>2</sup>	220-230
柴油噴射時期		21.5°~23.5° Before TDC
進氣閥打開/關閉正時		Before TDC 20°/after BDC 45°

表 2、燃料性質

燃料性質	Diesel	Butanol	HVO
化學組成	C12H26	C4H10O	C17.49H36.99
沸騰溫度	150-360	117.7	65
密度 (kg/m3)	835	810	779
蒸發潛熱 (kJ/kg)	250	593	214
十六烷值	40-55	16	76.2
低熱值 (MJ/kg)	42.5	35.1	44.1
在40°C時動態黏度 (mm2/sec)	3.02	1.004	2.95

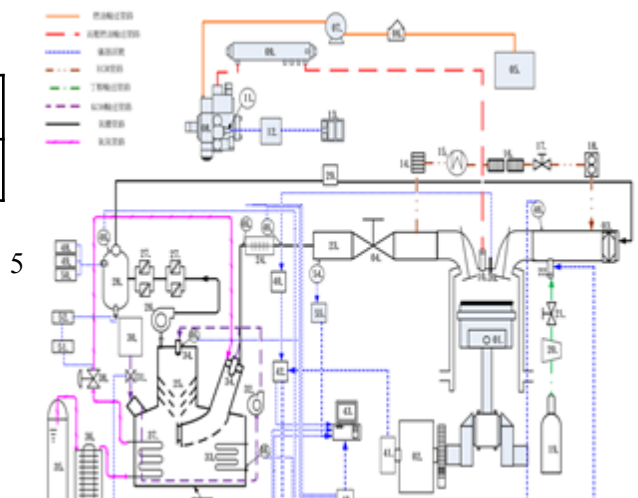


圖1、實驗設備配置

- |                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| 1. 柴油單缸引擎      | 20. 丁醇泵                       |
| 2. 動力計 W-70 型  | 21. 丁醇調節閥                     |
| 3. 逆止閥         | 22. 丁醇噴嘴                      |
| 4. EGR 切斷閥     | 23. 排氣端                       |
| 5. 燃油櫃         | 24. 鱗片銅管冷卻器                   |
| 6. 過濾器         | 25. 擋模板                       |
| 7. 馬達          | 26. 多段式鼓風機                    |
| 8. 高壓共軌泵       | 27. 離心式汽水分離器                  |
| 9. 共軌管總成       | 28. 氧氣/廢棄混合桶                  |
| 10. 燃油噴油嘴      | 29. 進氣流量計                     |
| 11. 燃油計量閥      | 30. 重力式水櫃                     |
| 12. 數位/類比訊號擷取器 | 31. 電磁閥開關                     |
| 13. 高壓噴射微電腦控制器 | 32. 循環泵                       |
| 14. 碳粒子吸收器     | 33. KOH 冷卻水交換器                |
| 15. 排氣冷卻器      | 34. KOH 水溶液噴嘴                 |
| 16. 離心式汽水分離器   | 35. 液態氧儲存桶                    |
| 17. 流量調節閥      | 36. 液態氧蒸發器                    |
| 18. EGR 流量計    | 37. 熱交換器                      |
| 19. 丁醇槽        | 38. 氧氣傳感器                     |
| 39. 氣缸壓力感測器    | 48. CO/HC/CO <sub>2</sub> 分析儀 |
| 40. 訊號放大器      | 49. NO <sub>x</sub> 分析儀       |
| 41. 曲柄角度感知器    | 50. Smoke 分析儀                 |
| 42. 數位/類比訊號擷取器 | 51. PM <sub>2.5</sub> 取樣裝置    |
| 43. 桌上型電腦      | 52. 氧氣流量控制閥                   |
| 44. 電子控制單元     | 53. PID 氧氣控制單元                |
| 45. 數據微調處理器    | 54. 酸鹼度感測器                    |
| 46. 溫度感測器      | 55. 濕度感測器                     |
| 47. 溫度訊號擷取卡    | 56. 濕度訊號擷取卡                   |

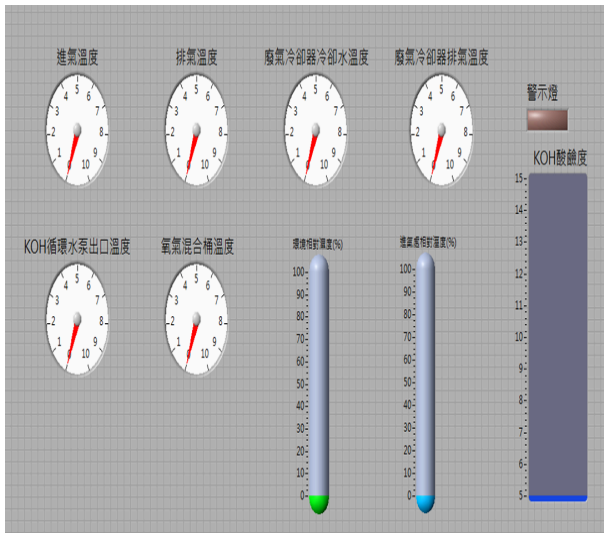


圖2、溫度及濕度監測系統

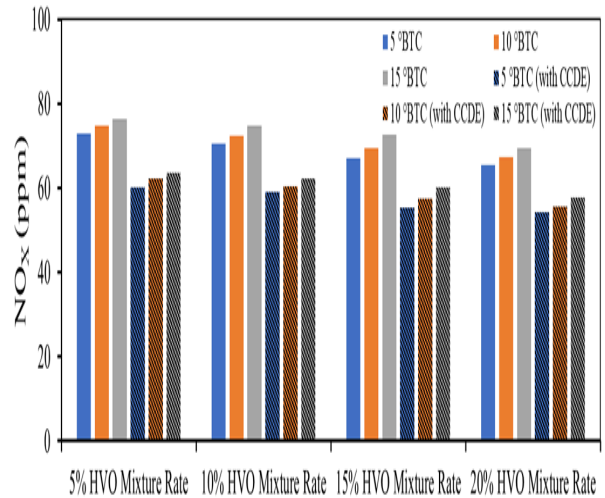


圖3、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射壓力600 bar下，不同噴油正時及綠色柴油混雜比之NO<sub>x</sub>變化

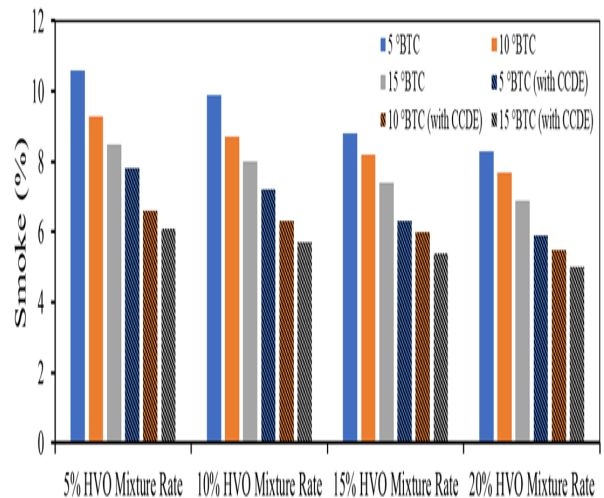


圖4、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射壓力600 bar下，不同噴油正時及綠色柴油混雜比之Smoke變化

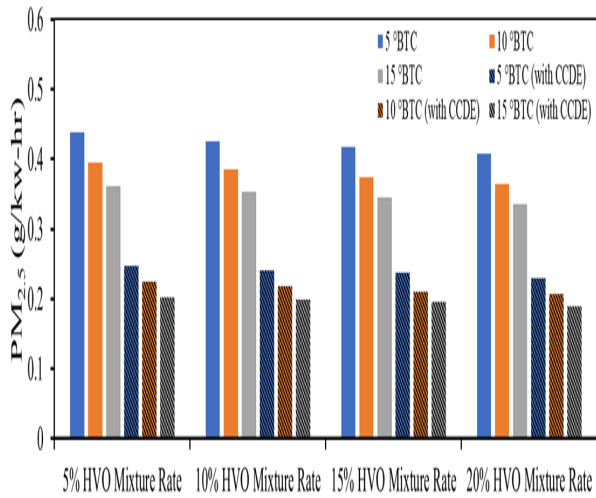


圖5、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射壓力600 bar下，不同噴油正時及綠色柴油混摻比之PM<sub>2.5</sub>變化

圖7、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射壓力600 bar下，不同噴油正時及綠色柴油混摻比之HC變化

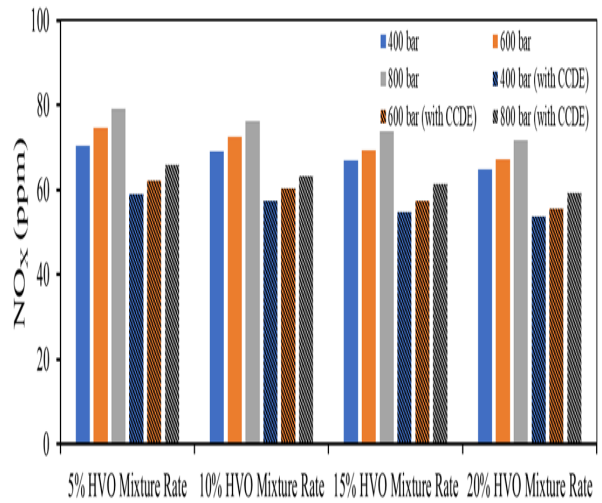


圖8、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射正時10 °BTC下，不同噴油壓力及綠色柴油混摻比之NO<sub>x</sub>變化

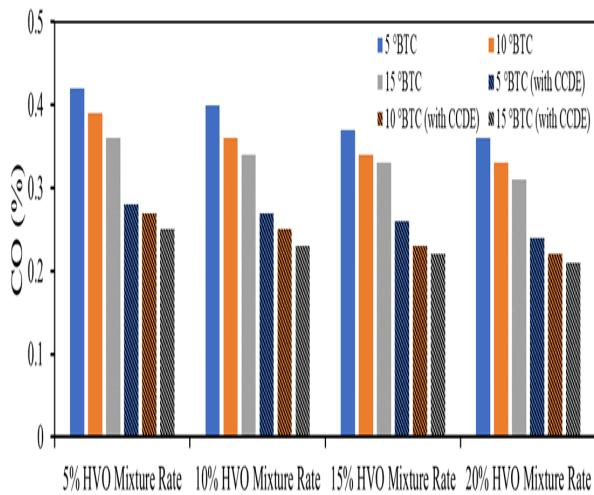


圖6、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射壓力600 bar下，不同噴油正時及綠色柴油混摻比之CO變化

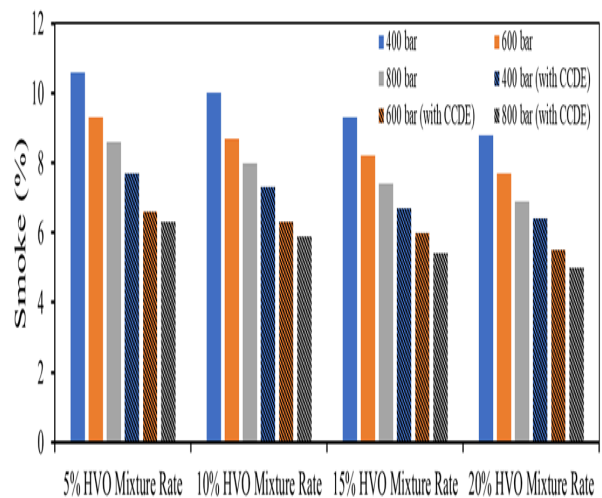
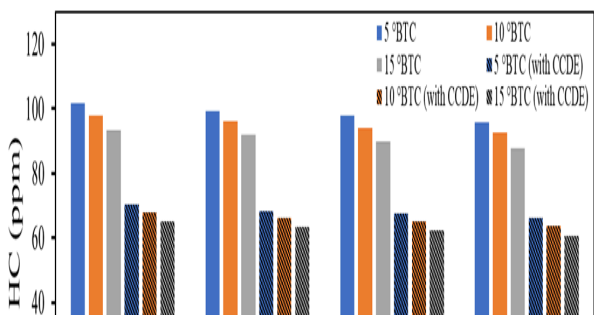


圖9、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射



正時10 °BTC下，不同噴油壓力及綠色柴油混摻比的之Smoke變化

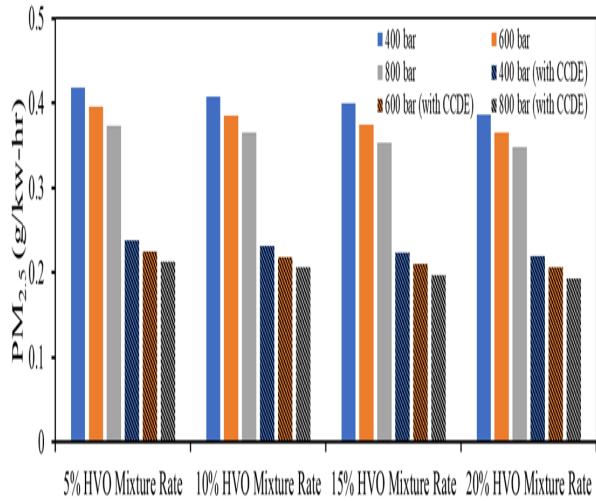


圖10、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射正時10 °BTC下，不同噴油壓力及綠色柴油混摻比的之PM<sub>2.5</sub>變化

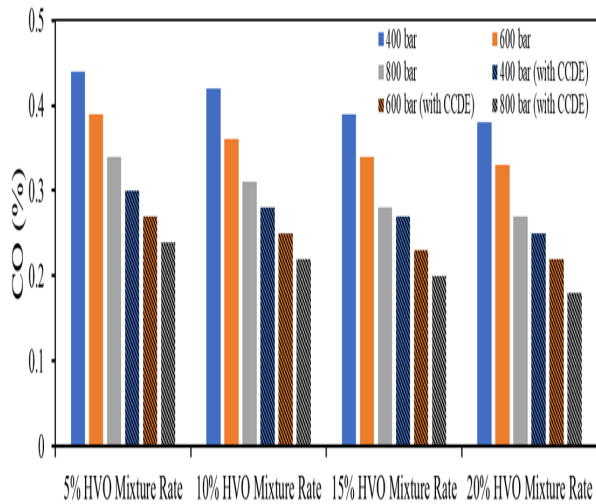


圖11、有無密閉式循環共軌噴射式柴油引擎於1500 rpm、60%負荷、30%EGR、35%丁醇質量分率與噴射正時10 °BTC下，不同噴油壓力及綠色柴油混摻比的之CO變化

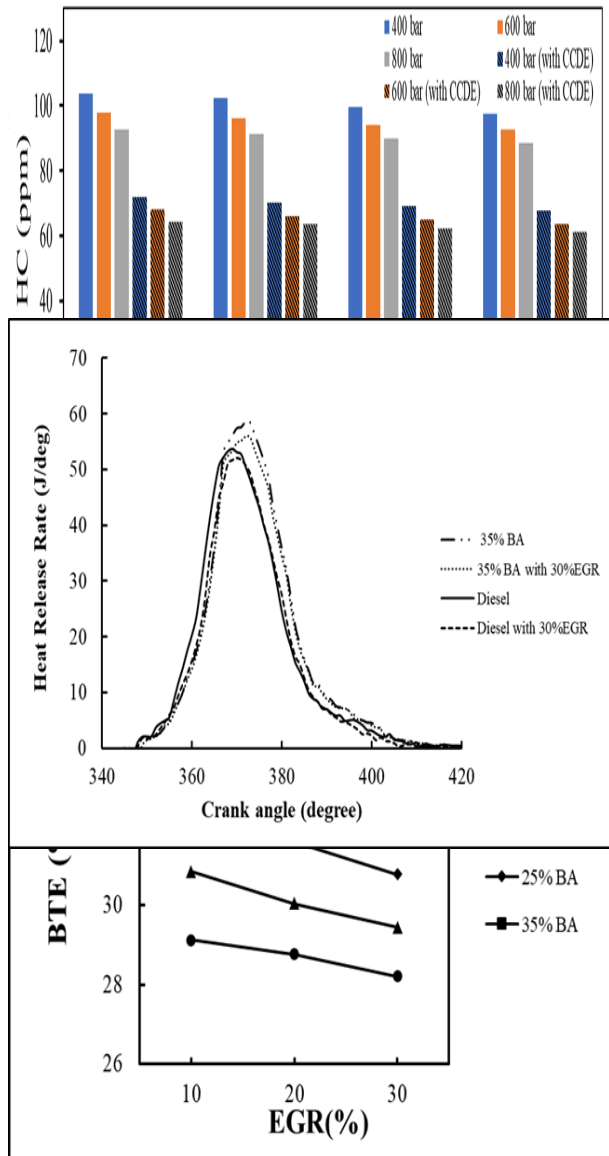


圖14、密閉式循環30%KOH、共軌噴射式柴油引擎 1500 rpm、不同EGR在噴射壓力600 bar與噴射正時10 °BTC下，純柴油及不同質量分率的丁醇對制動熱效率 (BTE)的效應



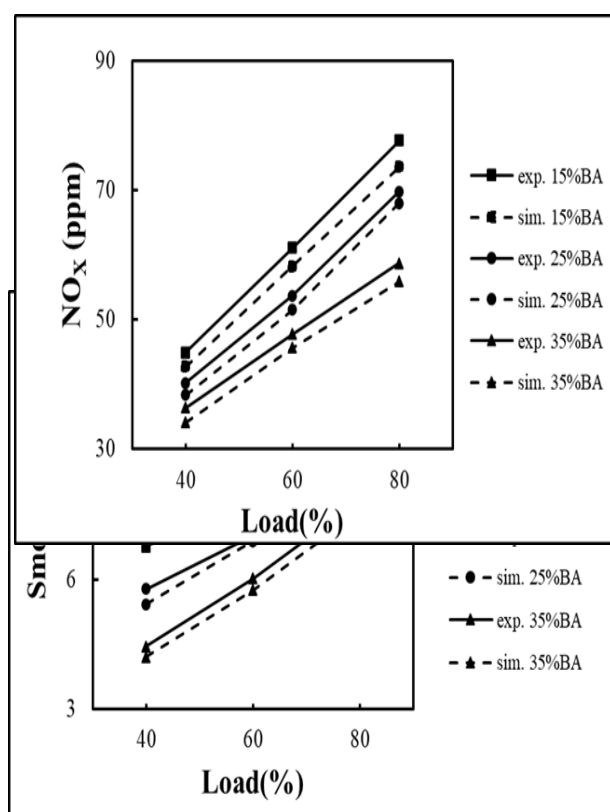


圖16、CCDE噴入不同的丁醇質量分率，模擬結果與實驗結果的Smoke排放

### 參考文獻

1. 巴黎協議：  
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
2. 全國法規：  
<https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=O0020015>
3. A. Sonthalia, N. Kumar, "Hydroprocessed vegetable oil as a fuel for transportation sector: A review",
4. Journal of the Energy Institute, Vol 92, pp.1-17, 2019.
5. A.A. Amsden, "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos National Laboratory report LA-13313-MS, July, 1997.
6. Liu, C., An Experimental and Analytical Investigation into the Combustion Characteristics of HCCI and Dual Fuel Engines with Pilot Injection. Ph.D. diss., Dept. of Mechanical and Manufacturing Engineering, Calgary Univ., 2006.
7. Krishnan Radhakrishnan, Alan C. Hindmarsh, Description and Use of LSODE, the Livermore Solver for Ordinary Differential Equations, Lawrence Livermore National Laboratory Report, UCRL-ID-113855, 1993.
8. 蘇脩聖、賴銘彬、林克衛、陳偉仁，綠色柴油對柴油引擎性能與排污改善分析探討，燃燒季刊，97期，pp.59-71，民國106年。
9. Y. Kroyan, M. Wojcieszka, O. Kaario, M. Larmi, K. Zengerb, "Modeling the end-use performance of alternative fuels in light-duty vehicles", Energy, Vol 205, Article Number: 117854, 2020.
10. J. Hunicz, M. Mikulski, P. C., Shukla, M. Geça, "Partially premixed combustion of hydrotreated vegetable oil in a diesel engine: Sensitivity to boost and exhaust gas recirculation", Fuel, Vol 307, 121910, 2021.
11. I. Bortel, J. Vavra, M. Takats, "Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine", Renewable Energy, Vol 140, pp.680-691, 2018.
12. 陳榮洪、王偉成、羅登傑、劉浩然，"綠色柴油的渦輪增壓引擎起動及暫態過程之黑煙與廢氣排放分析"，中華民國第二十九屆燃燒與能源學術研討會，民國108年。
13. F. Millo, T. Vlachos, A. Piano, "Physicochemical and mutagenic analysis of particulate matter emissions from an automotive diesel engine fuelled with fossil and biofuel blends", Fuel, Vol 285, Article Number: 119092, 2020.
14. R. Suarez-Bertoa, M. Kousoulidou, M. Clairotte, B. Giechaskiel, J. Nuottimäki, T. Sarjoavaara, L. Lonza, "Impact of HVO blends on modern diesel passenger cars emissions during real world operation", Fuel, Vol 235, pp.1427-1435, 2019. EN590 diesel fuels", Vol 245, pp.198-211, 2019.
15. Q. Cheng, H. Tuomo, O.T. Kaario, L. Martti, "Spray dynamics of HVO and EN590 diesel fuels", Fuel Vol 20, pp.569-578, 2019.
16. S. Marasri, P.P. Ewphun, P. Srichai, C. Charoenphonphanich, P. Karin, M. Tongroon, H. Kosaka, "Combustion Characteristics of Hydrotreated Vegetable Oil-Diesel Blends under EGR and Low Temperature Combustion Conditions", Vol 20, pp.569-578, 2019.
17. S. Ushakov, N. Lefebvre, "Assessment of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Applicability as an Alternative Marine Fuel Based on Its Performance and Emissions Characteristics", Vol 12, pp.109-120, 2019.
18. 吳鴻文、羅炯隆、劉乃禎，"噴油參數對預燃式柴油引擎排氣污染之效應研究"，中國造船暨輪機工程學刊，第十七卷第三期，PP.53~61，民國87年。
19. 陳宇元，"二甲醚/柴油混合燃料柴油機改變噴油參數及混合比例之實驗研究"，台灣碩士論文，國立台灣海洋大學，民國99年。
20. 吳鴻文、哈冀連、劉乃禎、楊佳穎，"使用柴油摻配甲酯於柴油引擎各種噴油條件之排氣污染研究"，中國造船暨輪機工程學刊，第二十一卷第一期，PP.37~47，民國91年。
21. L. Karikalan, S. Jacob, S. Baskar, S. Venugopal, "Analyzing the influence of varied fuel injection pressure on diesel engine fueled with Karanja biodiesel", Materials Today: Proceedings, Available online July, 2019.
22. J. Xia, Q. Zhang, Z. He, J. Wang, R. Liu, Y. Qian, D. Ju, X. Lu, "Experimental study on diesel's twin injection and spray impingement characteristics under marine engine's conditions", Fuel, Vol 302, Article Number: 121133, 2021.
23. Z. Wang, F. Zhang, Y. Xia, D. Wang, Y. Xu, G. Du, "Combustion phase of a diesel/natural gas dual fuel

- engine under various pilot diesel injection timings”, *Fuel*, Vol 289, Article Number: 119869, 2021.
24. W. Du, Q.K. Zhang, Z. Zhang, J.J. Lou, W.H. Bao, “Effects of injection pressure on ignition and combustion characteristics of impinging diesel spray”, Vol 226, pp.1163-1168, 2018.
  25. 林九洲, “以共軌系統探討噴油參數對柴油引擎的燃燒特性及排放污染之影響”, 國立中興大學碩士機械工程學系論文, 民國 105 年。
  26. 林英璋, “使用生質柴油共軌柴油引擎之控制參數調校”, 國立台灣科技大學機械工程學系碩士論文, 民國 102 年。
  27. 蔡銘晉, “改裝 HCCI 共軌噴射模式下對引擎性能影響分析”, 國立雲林科技大學機械工程學系碩士論文, 民國 99 年。
  28. 陳嘉原, “大缸徑單缸柴油引擎改裝共軌噴射系統下引擎測試及實驗操作變數探討”, 國立雲林科技大學機械工程學系碩士論文, 民國 100 年。
  29. 周志正, “先進內燃機與選擇性還原觸媒系統之建模與控制”, 國立台灣科技大學機械工程學系博士論文, 民國 103 年。
  30. Y. Li, B. Lou, S. Abubakar, G. Wu, “Skeletal mechanism for i-propanol-n-butanol-ethanol (IBE) and nbutanol combustion in diesel engine”, *Fuel*, Vol 302, Article Number: 12113, 2021.
  31. D.Q. Feng, H.Q. Wei, M.Z. Pan, L. Zhou, J.X. Hua, “Combustion performance of dual-injection using nbutanol direct-injection and gasoline port fuel-injection in a SI engine”, *Energy*, Vol 160, pp.573-581, 2018.
  32. L. Li, T.Y. Wang, J.Y. Duan, K. Sun, “Impact of butanol isomers and EGR on the combustion characteristics and emissions of a SIDI engine at various injection timings”, *Applied Thermal Engineering*, Vol 151, pp.417-430, pp.417-430, 2019.
  33. Z. Chen, J. He, H. Chen, L. Geng, P. Zhan, “Comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel common rail engines fueled with diesel/methanol, diesel/ethanol, and diesel/ n-butanol”, *Fuel*, Vol 304, Article Number: 121360, 2021.
  34. M. Mohebbi, M. Reyhanian, V. Hosseini, M.F.M. Said, A.A. Aziz, “Performance and emissions of a reactivity controlled light-duty diesel engine fueled with n-butanol-diesel and gasoline”, *Applied Thermal Engineering*, Vol 134, pp 214-228, 2018.
  35. L. Wei, C.S. Cheung, Z. Ning, “Effects of biodiesel-ethanol and biodiesel-butanol blends on the combustion, performance and emissions of a diesel engine”, *Energy*, Vol 155, pp 957-970, 2018.
  36. I.M. Yusri, R. Mamat, M.K. Akasyah, A.F. Yusop, “Evaluation of engine combustion and exhaust emissions characteristics using diesel/butanol blended fuel”, *Applied Thermal Engineering*, Vol 156, pp 209-219, 2019.
  37. H.L. Xiao, F.Y. Guo, S.J. Li, R. Wang, X.L. Yang, “Combustion performance and emission characteristics of a diesel engine burning biodiesel blended with n-butanol”, *Fuel*, Vol 258, Article 115887, 2019.
  38. H.W. Wu, R.H. Wang, Y.C. Chen, D.J. Ou, T.Y. Chen, “Influence of port-inducted ethanol or gasoline on combustion and emission of a closed cycle diesel engine,” *Energy*, Vol.64, pp.259-267, 2014.
  39. H.W. Wu, CM Fan, JYi He, TT Hsu, “Optimal factors estimation for diesel/methanol engines changing methanol injection timing and inlet air temperature,” *Energy*, 141, pp. 1819-1828, 2017.

## **Study on effect of diesel blended with hydrotreated vegetable oil and port-injecting butanol with different injection parameters on performance of a closed cycle diesel engine (III)**

*H.W. Wu \* C. H. Hor\**

\*Department of System and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Kun Shan University

*Keywords: Injection parameters, Adding butanol at intake, Closed cycle diesel engine, KIVA3V code, Diesel/Hydrotreated Vegetable Oil Blend, Exhaust gas recirculation*

### **ABSTRACT**

Based on the previous two years' research results, this project installed a common-rail injection system, electronically controlled butanol injection, and an exhaust gas recirculation (EGR) system in a closed-cycle diesel engine (CCDE) to investigate the operational performance of the engine using diesel blended with green diesel, butanol at the intake, and EGR at different injection parameters to improve the performance of the CCDE. This work also installed temperature and humidity sensors at the engine's intake for computerized monitoring of intake air temperature and relative humidity to conduct CCDE experiments by varying the green diesel blend rate, injection parameters, butanol mass fraction, and EGR ratio at a fixed butanol injection timing. The KIVA-3V was modified and combined with a detailed chemical power model to simulate the combustion and pollution under CCDE intake injection of butanol, diesel/green diesel blend, and numerical simulations to compare with the experimental results. The experimental results show that a closed-cycle system can reduce pollutants (CO, HC, NO<sub>x</sub>, Smoke, and PM<sub>2.5</sub>). The higher the ratio of green diesel blended with diesel, the tendency to reduce CO, HC, NO<sub>x</sub>, Smoke, and PM<sub>2.5</sub> becomes. Advancing the injection timing and increasing the injection pressure are both effective in suppressing the production of certain emission pollutants. The numerical simulation results show the same trend as the experimental data and the error value is about 4.7%, which can verify the accuracy of the simulation results.