

DİZEL/BİYODİZEL KARIŞIMI İLE ÇALIŞAN BİR MOTORUN PERFORMANS VE EMİSYONLARINI İYİLEŞTİRMEK İÇİN HİDROJEN KULLANILMASI

*Abdurrazzak AKTAŞ**

*Özkan ŞAHİN***

Özet: Hava kirliliğinin endişe verici seviyeye ulaşması ve petrol esaslı yakıtların tükeneceği endişesi sebebiyle içten yanmalı motorlarda yakıt olarak biyodizel, metil alkol, etil alkol, biyogaz, doğalgaz, LPG ve hidrojen gibi alternatif yakıtların kullanılabilirliği üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda alternatif yakıtlar dizel yakıtı ile birlikte genellikle çift yakıt şeklinde kullanılabilir. Emisyonları iyileştirmesi sebebiyle dizel biyodizel karışımların kullanılması yaygın çift yakıt uygulamalarındandır. Yapılan çalışmalar özellikle B20 ile emisyonların önemli miktarda azaldığını göstermiştir. Ancak biyodizelin bir çok olumlu özelliğine rağmen yüksek viskozite ve yoğunluk gibi olumsuz özellikleri emisyonları düşürme etkisini olumsuz etkilemektedir. Dizel biyodizel karışımına yüksek yanma hızına sahip karbon içermeyen hidrojenin ilavesi ile emisyonların daha da aşağı çekilebileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, tek silindirli, dört zamanlı hava soğutmalı, 1800 d/d sabit hızda ve %25, %50, %75 ve %100 yükte B20 (hacimsel olarak %20 soya biyodizel %80 dizel) ile çalışan bir dizel motorda B20 yerine kütleli olarak %3 ile %14 arasında değişen oranlarda hidrojen kullanmanın özgül yakıt tüketimi (ÖYT), egzoz gaz sıcaklığı (EGS), silindir basıncı, is, HC, CO ve NOx emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak hemen hemen her yük durumunda, vuruntu olmaksızın kütleli olarak B20 yakıtının en fazla %14'ü kadar hidrojen kullanılabildiği, hidrojen oranının artması ile ÖYT'nin, HC, CO ve is emisyonunun önemli miktarda düştüğü NOx'in ise bir miktar arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: sıkıştırma ile ateşlemeli motor, dizel, biyodizel, hidrojen, emisyon, performans.

Use of Hydrogen to Enhance the Performance and Emissions of a Diesel/Biodiesel Blending Fuelled Compression Ignition Engines

Abstract: Researches on usability of alternative fuels like biodiesel, methyl-alcohol, ethyl alcohol, biogas, natural gas, LPG and hydrogen as fuel in internal combustion engines have increased for reason that air pollution has reached threatening levels and it is worried that petroleum based fuels are going to run out. In compression ignition engines alternative fuels can be used as dual-fuel with diesel fuels. Use of diesel- biodiesel mixtures is among widespread dual-fuel systems because of its decreasing emissions. Studies have shown that emissions have decreased considerably especially with B20. But, in spite of biodiesel's many positive features, negative features like high viscosity and density affect negatively the effect of decreasing emissions. Addition to carbon-free hydrogen with high combustion velocity into diesel biodiesel mixture is thought to further reduce emissions. In this study in a diesel engine working with single-cylinder, four-stroke air-cooled, 1800 rpm constant speed and 25%, 50%, 75% and 100% on load B20 (volumetrically 20% soy biodiesel 80% diesel) the effect of using hydrogen in portions in weight changing between 3% and 14% instead of B20 on specific fuel consumption (SFC), exhaust gas temperature, cylinder pressure, soot, HC, CO, NOx emissions have been analyzed empirically. In conclusion almost in every load situation, it has been ascertained that maximum 14% hydrogen in molar can be used instead of B20 fuel without knocking; with the increase in hydrogen rate SFC, HC, CO and soot emissions decrease considerably while NOx increases a little.

Key Words: Compression ignition engines; Diesel; biodiesel; hydrogen; emission; performance.

* Karabük Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Balıklarkayası Kampüsü, 78080, Karabük.

** Karabük Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıklarkayası Kampüsü, 78080, Karabük.

1. Giriş

Enerji tüketiminin artmasına paralel olarak hava kirliliğinin artması ve petrol esaslı yakıtların tükeneceği endişesi araştırmacıları içten yanmalı motorlarda kullanılan petrol esaslı yakıtların yerini alacak daha temiz yanan yenilenebilir alternatif yakıtlar araştırmaya sevk etmiştir. İçten yanmalı motorlarda biyodizel, metil alkol, etil alkol, biyogaz, doğalgaz, LPG ve hidrojen gibi alternatif yakıtların kullanılabilirliği üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Yapılan araştırmalar, motor ve yakıt sisteminde değişiklik yapılmadan, dizel yakıtı yerine bitkisel yağ ve metil esterlerinden elde edilen yakıtların doğrudan, diğer yakıtların ise genellikle ikinci yakıt olarak kullanılabilmesini göstermiştir (Carraretto ve diğ., 2004; Van Gerpen ve diğ. 2007; Bozbaş, 2008). Bitkisel yağların az oranda sülfür içermeleri, daha iyi yağlama özelliğine sahip olmaları, yapılarında oksijen bulunması, parlama noktalarının yüksek olması, yanmaları sonucunda daha az zararlı emisyon yaymaları onları çekici hale getirmektedir. (Aktaş ve Sekmen, 2008; Rakopoulos ve diğ., 2006; Van Gerpen ve diğ. 2007; Yori ve diğ., 2007; Huzayyin ve diğ., 2004; Ramadhas ve diğ., 2004; He ve Bao, 2003; Silva ve diğ., 2003; Canakci ve Van Gerpen, 2001; Canakci ve Van Gerpen, 1999). Ancak yoğunluk ve viskozitelerinin yüksek olması (yakıt sisteminin ve filtresinin tıkanmasına, enjektör açılma basıncının yükselmesine, kötü atomizasyona, silindirde ve supap yuvalarında karbon birikmesine, yağlama yağının kalınlaşmasına neden olmaktadır) gibi bazı özellikleri ise doğrudan kullanılmalarının yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır (Rakopoulos ve diğ., 2006; Canakci, 2007; Demirbas, 2007; Karaosmanoğlu, 1999; Nwafor, 1996; Baranescu ve Lusco, 1982; Varde 1982). Bu yüzden bitkisel yağların dizel yakıtına belli oranlarda katılarak, metanol veya etanol ile mikroemulsiyona tabi tutularak, ısıtılarak veya biyodizele dönüştürülerek (esterleştirilerek) tüketilmesi tavsiye edilmektedir (Sahoo ve diğ., 2007; Van Gerpen ve diğ., 2007; D'Ippolito ve diğ., 2007; Romano, 1982; **Nwafor, 2004**). Bitkisel yağlar en çok biyodizele dönüştürülerek kullanılmaktadır. Bitkisel yağlar biyodizel haline getirildiğinde, özellikleri dizel yakıt özelliklerine yaklaşmasına rağmen yoğunlukları ve viskoziteleri dizel yakıtından genellikle biraz daha yüksek, ısı değerleri, uçuculuk özellikleri ve oksidasyon kararlılıkları düşük kalmaktadır (Rakopoulos ve diğ., 2006; Huzayyin ve diğ., 2004). Bu olumsuzlukların etkisini hafifletmek için biyodizelin dizel yakıtına karıştırılarak kullanılması daha çok tercih edilmektedir. Biyodizel dizel yakıtına her oranda karıştırılabilmektedir. Ancak, B2'nin (%2 biyodizel) yakıtın yağlama özelliğini iyileştirdiği ve B20'nin ise hem yakıtın yağlama özelliğini iyileştirdiği hem de motor emisyonlarını azalttığı belirtilmiştir (Van Gerpen ve diğ., 2007).

Motorlarda kullanılacak alternatif yakıtlardan birisi de hidrojenidir. Hidrojen fosil esaslı olmayan çok sayıda yenilenebilir kaynaktan elde edilebileceği için ideal bir yakıttır. Hidrojen yandığında, CO, HC, SO_x, duman, kurşun ve zehirleyici metaller yaymadığı için gelecekte esas enerji kaynağı gözüyle bakılmaktadır. İyi tasarlanmış saf hidrojenle çalışan bir motorda sülfirik asit birikimi, benzen ve diğer kanserojen bileşikler ile ozon ve diğer oksitleyiciler doğası gereği bulunmaz. Hidrojenin yaydığı en önemli kirlenici azot oksitlerdir. Hidrojen benzinli motorlarda karbüratör ile ya da doğrudan emme manifolduna püskürtülmek suretiyle tek başına kullanılabilir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ise kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması nedeniyle yanmayı başlatamadığı için tek başına kullanılamamakta ancak pilot dizel yakıtı ile birlikte emme manifolduna akitılarak veya püskürtülerek ikinci yakıt olarak kullanılabilir (Das, 2002a; Das, 2002b). Yani motor için gerekli esas enerji dizel yakıtından geri kalanı hidrojenden sağlanmaktadır. İkinci yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı çift yakıtlı dizel motorlarda, termik verimin arttığı, emisyonların önemli miktarda azaldığı tespit edilmiştir (Masood ve diğ. 2007, Saravanan, 2007). Yapılan bir başka çalışmada ise termik verimde kayıp olmaksızın ve az bir güç kaybıyla, dizel yakıtı yerine hacimsel olarak %38'e kadar hidrojen kullanılabilmesinin gözlendiği belirtilmiştir (Saravanan ve diğ., 2008a). Hidrojen gaz olduğu için hava ile iyi karışmakta ve tam yanmaktadır. Hidrojence zenginleştirilmiş motorların her çalışma koşulunda dizel yakıtı ile yaklaşık aynı çıkış gücü ve daha yüksek termik verim sağladığı ifade edilmiştir (Buckel ve Chandra, 1996; Haragopala ve diğ., 1983). Dizel yakıtı ve bitkisel yağlar daha yüksek is emisyonu ürettikleri için içerisinde karbon bulunmayan, yüksek alev hızı ve yanma verimine sahip hidrojenle birlikte kullanılmasının emisyonları azaltabileceği düşünülmüş ve yapılan sınırlı sayıda çalışma sonucunda motor tarafından emilen havaya az oranda H₂ katılmasının HC ve CO emisyonunu azalttığı tespit edilmiştir (Saravanan ve diğ., 2008b, Senthil Kumar ve diğ., 2001; Senthil Kumar ve diğ., 2002). Dizel biyodizel karışımlarının yakıt olarak kullanıldığı durumlarda da, karbon içermeyen ve yüksek yanma hızına sahip hidrojenin de ek olarak kullanılmasının biyodizelin yüksek viskozite,

düşük yanma hızı vb. özelliklerinden kaynaklanan olumsuzlukların etkisini azaltarak emisyonların daha da düşürülebileceği düşünülmektedir.

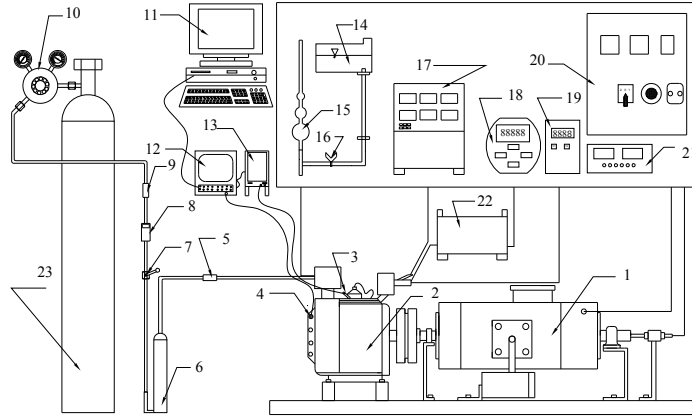
Bu çalışmada B20 (%20 soya biyodizeli %80 dizel yakıtı) ile çalışan tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motor, emilen hava içerisine değişik oranlarda hidrojen verilerek çalışabilecek şekilde uyarlanmıştır. Esas yakıt olarak dizel biyodizel yakıtı (B20) normal yakıt sistemi ile püskürtülmüştür. 1800 d/d sabit motor hızında, farklı yüklerde (%25, %50, %75, %100) değişik oranlarda hidrojenin B20 yerini almasının performans ve emisyonu etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deney düzeneği Şekil 1’de görüldüğü gibi, elektrikli DC tip dinamometre, sıkıştırma ile ateşlemeli motor, egzoz gaz analizörü, duman ölçer, basınç ve sıcaklık ölçme düzenlerinden oluşmaktadır. Deneysel çalışmada 210 cm³ silindir hacimli, hava soğutmalı, dört zamanlı ve 18:1 sıkıştırma oranlı tek silindirli bir dizel motor kullanılmıştır. Kullanılan DC dinamometre 4000 d/d’da 10 kW güç absorbe edebilmekte ve aynı zamanda deney motoruna ilk hareketi vermek için de kullanılabilir. Dinamometre yükü, yük hücresi kullanılarak ölçülmüştür. Sıvı yakıt tüketimi, motorun 10 ml’lik cam tüp içindeki yakıtı tüketme süresi kronometre ile tespit edilerek ölçülmüştür. Gaz yakıt (hidrojen) yüksek basınçlı (150 bar) bir tüpten basınç regülatörü yardımı ile 1,5 bara düşürülerek ve sırası ile emniyet valfi, gaz debimetresi, ayarlanabilir hassas vana, sulu güvenlik ve ikinci bir emniyet valfinden geçirilerek motorun emme manifolduna verilmiştir. Hidrojen yakıt tüketimi kalibre edilmiş gaz debimetresi ile ölçülmüştür. Egzoz gaz sıcaklık ölçümleri K tipi termokupul ve dijital termometre ile gerçekleştirilmiştir. Egzoz emisyonlarının ölçülmesinde Tablo I’de ölçüm aralıkları ve hassasiyetleri verilen MRU DELTA 1600L egzoz gaz analizörü ve MRU oprans 1600 duman ölçer kullanılmıştır. Silindir basıncını ölçmek için Kistler marka 601A model bujili piezoelektrik basınç sensörü, Kistler model 5011 şarj amplifikatörü, Hitachi dijital osiloskop (VC-5430), basınç verilerini kaydetmek için bilgisayar ve krank mili dönme açısı ile üst ölü nokta pozisyonunu tespit etmek için indüktif konum sensörü kullanılmıştır. Deneylere motor normal çalışma sıcaklığına ulaşmış kararlı çalıştıktan sonra başlanmıştır. İlk olarak motor B20 yakıtı ile %25 yükte, 1800 d/d sabit hızda çalışacak şekilde dinamometre ile yüklenmiş ve kararlı çalıştığı görüldükten sonra kuvvet, yakıt tüketimi, silindir basıncı ve emisyonlar gibi veriler kaydedilmiştir. Sonra %25 yükte, 1800 d/d sabit hızda B20 ile çalışan motora kütleli olarak %3 ile %14 arasında değişen oranlarda hidrojen emme manifolduna verilmiş ve dinamometrenin sabit yüküne rağmen H₂’nin ilave edilmesi ile artan motor hızının tekrar 1800 d/d’ya düşürülmesi, dizel yakıt pompası kolunun bir miktar stop konumuna çekilmesi ile sağlanmıştır. Böylece, motorun 1800 d/d sabit motor devrinde B20/Hidrojen çift yakıtı ile çalışması sağlanmış ve motorun kararlı çalıştığı görüldükten sonra gaz ve sıvı yakıt tüketimi, kuvvet, CO, HC, NO_x, egzoz gaz sıcaklığı ve silindir basıncı ölçülmüştür. Bu işlem %25 yükte her bir hidrojen ilavesi için tekrarlandıktan sonra sırasıyla %50, %75 ve %100 yükte deneyler tekrarlanmıştır. Hidrojenin bazı özellikleri Tablo II’de, ticari dizel ve soya biyodizelin özellikleri ise Tablo III’te verilmiştir.

Tablo I.
MRU 1600-L egzoz gaz analizörü özellikleri

Ölçüm	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
CO (%vol)	0-15,00	±%0,06
CO ₂ (%vol)	0-20,00	±%0,5
NO _x (ppm)	0-2000	±5
HC (ppm)	0-20000 n-hexan	±12
O ₂ (%vol)	0-25	±0,1
Sıcaklık (°C)	-40 ... +650	±1



Şekil 1.

Deney setinin şematik görünüşü (1-Dinamometre, 2-Motor, 3-Basınç sensörü, 4-Konum sensörü, 5-Emniyet valfi, 6-Sulu güvenlik, 7-Hassas vana, 8-Hidrojen debimetresi, 9-Emniyet valfi, 10-Basınç düşürücü regülatör ve manometreleri, 11-Bilgisayar, 12-Osiloskop, 13-Amplifikatör, 14-Yakıt deposu, 15-Dereceli yakıt kabı, 16-Vana, 17-Emisyon cihazı, 18-İs Emisyon indikatörü, 19-Dijital termometre, 20-Kontrol panosu, 21-Yük hücresi indikatörü, 22-İs emisyon cihazı, 23-Hidrojen tüpü)

Tablo II.
Hidrojenin bazı özellikleri (Porpatham, 2007)

Özellikler	H ₂
Alt Isıl Değer 1 atm'de ve 15 °C'de (MJ/kg)	120
Yoğunluk 1 atm'de ve 15 °C'de (kg/m ³)	0.0838
Alev hızı (cm/s)	275
Stokiyometrik Hava/Yakıt oranı (kg/kg)	34.2
Alevlenebilme sınırı (hava içinde %'de hacim)	4-75
Araştırma Oktan sayısı	130
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	585

Tablo III.
Kullanılan dizel ve biyodizel yakıt özellikleri.

Özellikler	Dizel ^a	Soya biyodizeli ^b
Ester içeriği, %(m/m)	-	96,7
Yoğunluk, kg/m ³ , at 15°C	828	887
Kinematik viskozite, mm ² /s, at 40°C	2.6	4,2
Parlama noktası, °C	60	151
Sülfatlı kül içeriği, %(m/m)	-	-
Su, mg/kg	218.1	220
Bakır şerit korozyon, 3h at 50°C	-	1a
Asit değeri, mg KOH/g	-	0,64
İyot değeri, g iodine/100 g	-	115,4
CFPP, °C	-5	-9
Setan sayısı	55.6	50
Alt ısı değeri, (MJ/kg)	43.76	37,31

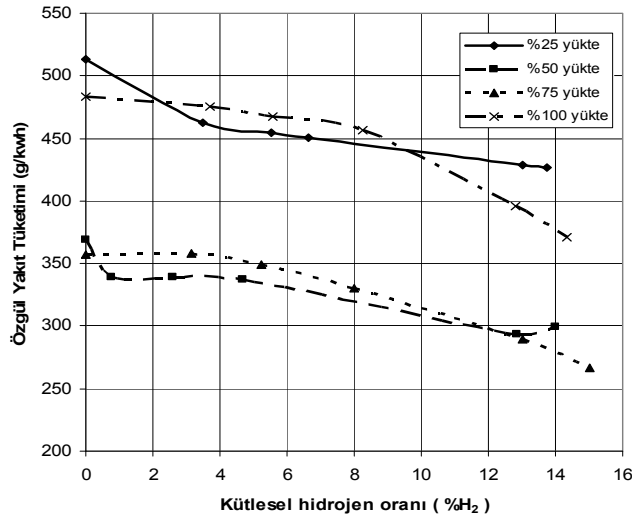
^a Dizel yakıt özellikleri Şeyhoğlu Tic. Ltd. Şti'den (Shell İst. Atatürk Bulvarı Karabük) alınmıştır.

^b soya biyodizel özellikleri KOLZA Biyodizel Yakıt ve Petrol Ürünleri San ve Tic. A.Ş.'den (Kimya Sanayicileri Organize San. Bölgesi B.20 Tuzla İSTANBUL) alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

B20'dan oluşan yakıt ile çalışan tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, sıkıştırma ile ateşlemeli motora 1800 d/d sabit hızda değişik yüklerde ve değişik oranlarda hidrojenin B20 yerini almasının performans ve emisyonu etkisi ile ilgili bütün sonuçlar aşağıda grafikler halinde verilmiştir.

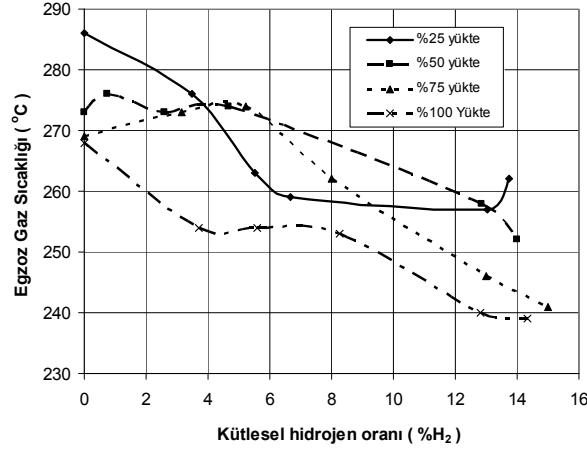
ÖYT'nin değişimini gösteren Şekil 2'de her bir yükte motora verilen hidrojen oranı arttıkça ÖYT'nin düştüğü görülmektedir. ÖYT'nin düşmesinin esas sebebi hidrojenin ısı değerinin yüksek olmasıdır. Diğer bir sebep de hidrojenin yanma hızının oldukça yüksek olması olabilir. Çünkü stokiometrik karışım oranlarındaki hidrojen hava karışımlarında yanma hızı, benzin-hava karışımlarındakinin yaklaşık 7 - 8 katına ulaşmakta ve bu durum yanma sürecinin kısılmasını ve ısı veriminin artmasını sağlamaktadır (Senthil Kumar ve diğ., 2003; Gül, 2006). ÖYT'leri %50 den %100'e kadar yük arttıkça artış göstermiştir. Bu bitkisel yağ ile çalışan bir motorun performansını arttırmak için hidrojen kullanılması adlı bir çalışmada elde edilen sonuçlar ile benzerlik arz etmektedir (Senthil Kumar vd., 2003). %25 yükte ve %100 yükte ÖYT birbirine yakın ve yüksek çıkmıştır. %25 yükte ÖYT'nin yüksek olmasında, kısmi yükte karışımın fakir olmasının ve yanma hızının düşük olmasının etkisi olmakta, tam yükte ÖYT'nin yüksek çıkmasında ise homojen olmayan zengin karışım nedeniyle yakıtın yeterli oksijen bulamaması sonucu yanmanın kötüleşmesinin etkisi bulunmaktadır. Orta yükte (%50-75) %25 ve %100 yüke göre düşük olan ÖYT'nin tüketilen yakıt içindeki H₂ oranı arttıkça daha da düşmesi göz önüne alındığında, orta yüklerde çalışmanın daha ekonomik olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 2.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde özgül yakıt tüketimine etkisi (n=1800 d/d)

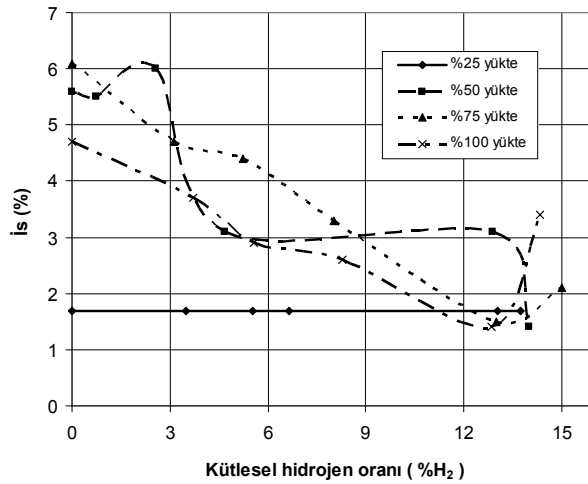
Şekil 3'te sabit devirde, değişik yüklerde B20 ile çalışan dizel motor emme manifolduna B20 yerine belirli oranda hidrojen verildiğinde egzoz gaz sıcaklığının (EGS) değişimi görülmektedir. Bütün yüklerde, hidrojen oranının artması ile EGS'lerinin yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde azaldığı görülmektedir. Hidrojen oranının artması ile EGS'nin azalmasının hidrojenin silindir içerisinde homojen dağılması, hızlı yanması ve dolayısı ile tutuşma gecikmesi ve yanma süresini kısaltarak yanmanın daha az oranda egzozla sarkmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde egzoz gaz sıcaklığına etkisi (n=1800 d/d)

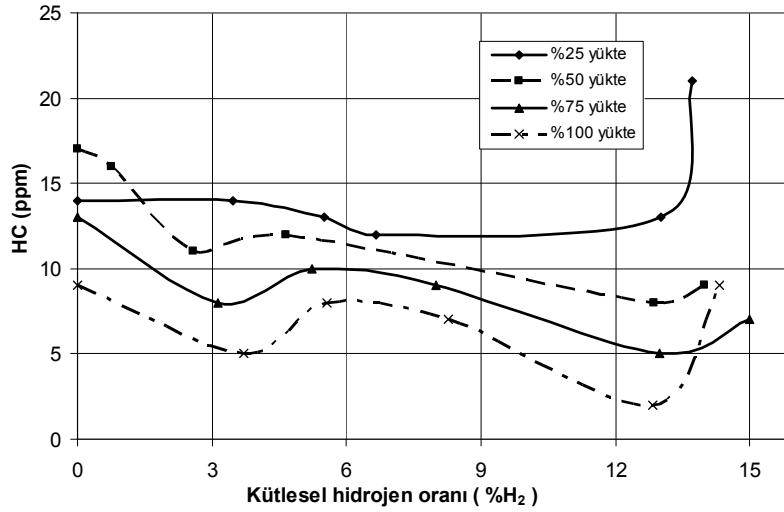
Is emisyonları aslında partikül emisyonlarının bir parçasıdır ve silindir içinde değişik noktalardaki aşırı hava eksikliğinde uzun zincirli moleküllerin ısısal parçalanması ile oluşur. (Homann, 1985). Şekil 4'te değişik yük durumlarında hidrojen artış oranına bağlı olarak egzoz gazı içindeki is emisyonu görülmektedir. Görüldüğü gibi B20 yakıtı ile çalışırken %25 yük hariç diğer yük durumlarında %5-6 seviyesinde olan is emisyonu hidrojen miktarının artması ile %2'nin altına kadar düşmektedir. Dizel ve biyodizel yakıtı ile çalışan motorlarda bu yakıtların yerini belirli sabit bir oranda H₂'nin almasının etkisi üzerine yapılan çalışmalarda da hidrojenin is emisyonunu önemli miktarda düşürdüğü tespit edilmiştir (Senthil Kumar vd. 2003; Saravanan vd., 2008a; 2008b; 2008c; 2008d; Saravanan vd., 2009). Hidrojen oranı arttıkça is emisyonunun azalmasına içeri sürülen hidrojenin artması ile karbon içeren sıvı yakıt miktarının azalmasına ve daha hızlı yanan karbon içermeyen H₂ miktarının artmasının etkisi olmaktadır. %25 yükte hidrojenin HC emisyonunu etkilememesinin sebebi ise karışımın çok fakir olması ve saf B20 ile çalışmada bile HC'nin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile orta ve ortanın üstündeki yüklerde hidrojenin is emisyonu kontrolü için kullanılabilceği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde is emisyonuna etkisi (n=1800 d/d).

HC emisyonları, dizel motorlarda yanma işlemi sırasında belirli bölgelerde hava fazlalığı olmasına rağmen hava/yakıt karışımının homojen olmaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Yüksek hava yakıt oranı düşük bölgesel sıcaklığa sebep olmaktadır. Bu da kimyasal reaksiyonların ilerlemesinin oldukça yavaşlaması ya da donabilmesi demektir ki HC emisyonlarının artmasına neden olmaktadır (Abdel-Rahman, 1998). Şekil 5’de görüldüğü gibi her bir yük durumunda HC seviyesi hidrojen miktarı arttıkça is emisyonuna benzer şekilde düşmektedir (Örneğin tam yükte B20 ile 9 ppm iken %13 hidrojen ilavesi ile çalışmada 2 ppm’e düşmektedir). Ancak bu düşüş hidrojen oranı %13’e çıkana kadar devam etmektedir. Bu orandan sonra HC seviyesi artmaya başlamaktadır. Jatropa (*Jatropha Curcas*) bitki yağı ile çalışan sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda performans arttırmak için, değişik yüklerde (%20, %40, %60, %80, %100) hidrojen miktarının etkisinin araştırıldığı bir çalışmada da HC’ emisyonunun önemli miktarda düştüğü tespit edilmiştir (Senthil Kumar vd., 2003). HC emisyonlarının düşmesine, hidrokarbon içeren yakıt miktarının azalmasının, biyodizel içerisinde oksijen bulunmasının, hidrojenin silindirin her tarafına homojen olarak dağılmasının, hızlı yanmasının ve yanma sıcaklığının artmasının etkisi olduğu belirtilmiştir (Senthil Kumar vd., 2003). %13 hidrojen oranından itibaren HC seviyesinin hızla artması ise çalışma sırasında ses ve motorun düzensiz çalışması şeklinde ortaya çıkan vuruntulu çalışma sebep olmuştur.

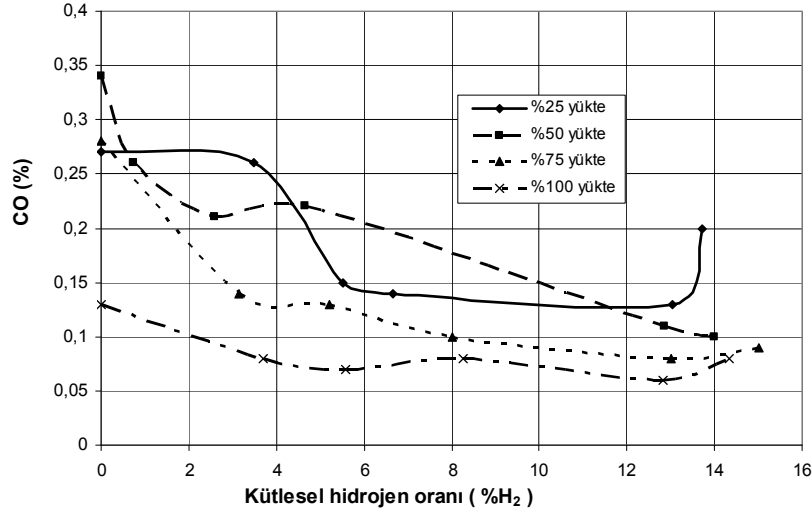


Şekil 5.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde HC emisyonuna etkisi (n=1800 d/d).

Dizel motorlarda çevrim başına yanma odası içerisindeki ortalama hava/yakıt oranı, buji ile ateşlemeli motorlardan oldukça yüksektir. Kademeli dolgunun sebep olduğu homojen karışım eksikliği nedeniyle aşırı zengin yerel bölgeler meydana gelmektedir. Bu yüksek CO meydana getirmektedir ki post-oksidasyon tarafından azalır veya çoğalabilir. Hava fazlalık kat sayısı artınca azalan sıcaklık post-oksidasyon oranının düşmesine sebep olmaktadır (reaksiyon donmaktadır). Dizel motorların CO konsantrasyonu bu yüzden benzinli motorlarınkinden oldukça düşüktür. Ancak CO oluşumunun esasları her ikisinde aynıdır (Abdel-Rahman, 1998).

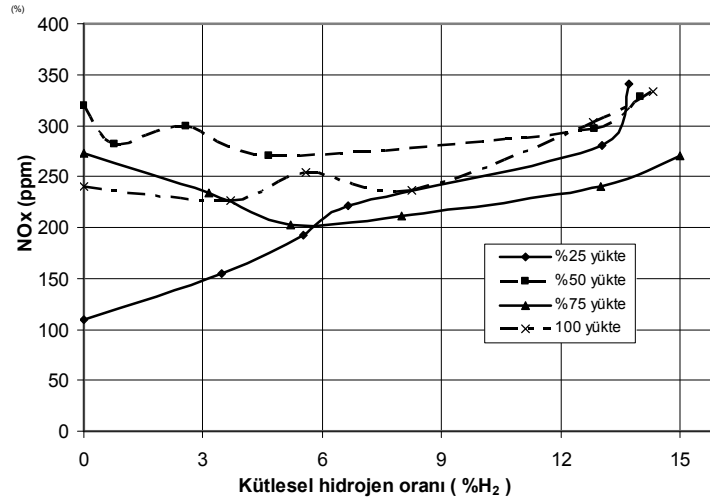
Bu çalışmadaki CO emisyonu şekil 6’da görüldüğü gibi bütün yük durumlarında B20 ile çalışmada hidrojeniz çalışmadan daha yüksektir ve B20 yakıtı yerini alan H₂ miktarı arttıkça CO emisyonu önemli miktarda azalmaktadır. Örneğin % 75 yükte B20 ile % 0,28 seviyesinde olan CO emisyonu %13 oranında hidrojen ilavesi ile %0,08 seviyesine düşmektedir. Ancak hidrojen oranı daha da arttırıldığında daha önce de belirtildiği gibi motorun vuruntulu çalışmaya başlaması nedeniyle CO emisyonu artmaya başlamaktadır. Burada dikkat çeken diğer bir durum da yük arttıkça CO emisyonunun azalmasıdır. Yük arttıkça CO emisyonunun azalmasının en önemli sebebi yanmaya katılan yakıt miktarının artması nedeniyle sıcaklığın artması ve dolayısı ile yanma veriminin artmasıdır.



Şekil 6.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde CO emisyonuna etkisi (n=1800 d/d).

Şekil 7'de görüldüğü gibi NO_x emisyonları %50 yükleme hariç diğer yük durumlarında hidrojen oranı arttıkça artmaktadır. Tam yükte B20 ile çalışırken NO_x emisyonu 240 ppm iken hidrojen oranı arttıkça artmakta ve %14 hidrojen oranında 333 ppm'e çıkmaktadır. Hidrojenin yanma hızı yüksek olduğu için B20 yerine kullanılan hidrojen oranı arttıkça muhtemelen silindir içi sıcaklık artmakta ve dolayısı ile NO_x emisyonu artmaktadır. Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan NO_x'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması ve yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir (Naber ve Siebers, 1998; Gül, 2006).

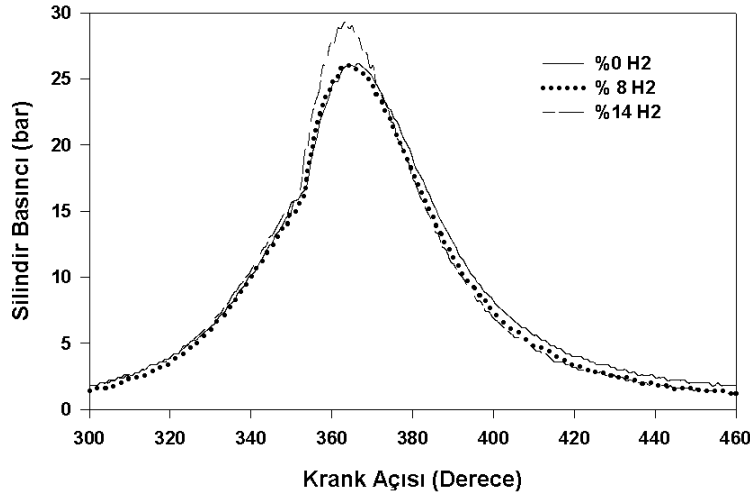


Şekil 7.

B20 yerine değişik oranlarda hidrojen ilave edilmesinin değişik motor yüklerinde NO_x emisyonuna etkisi (n=1800 d/d).

Şekil 8'de bu çalışmada tam yükte B20 yerine ilave edilen hidrojen oranlarından orta değer sayılan %8 ile en yüksek değer olan %14 ve B20'nin basınç diyagramlarının krank açısına göre değişimleri karşılaştırılmıştır. Basınç diyagramları incelendiğinde B20 yerine %8 H₂ ilavesi ile basınç artışının dolayısı ile yanmanın dizel yakıtına göre biraz hızlı, %14 H₂ de ise daha belirgin bir şekilde hızlı

geliştiği görülmektedir. Maksimum silindir basınçlarına bakıldığında, önce %14 H₂'nin (361,46 KMA'ında) sonra %8 H₂'nin (363,0 KMA'ında) ve en son B20'nin (366,7 KMA'ında) geldiği görülmektedir. B20'ye hidrojen ilavesinin yanma hızını ve kalitesini arttırdığı anlaşılmaktadır. Ancak ilave edilebilecek hidrojen miktarının da bir limiti vardır ve nitekim bu çalışmada bu limitin kütesel olarak yaklaşık %14 olduğu anlaşılmıştır. Çünkü hidrojen oranı %14'e çıkarıldığında vuruntulu çalışmanın meydana geldiği hem motor sesinden hem emisyonların bozulmasından hem de basınç diyagramının düzensizleşmesinden anlaşılmıştır. Ayrıca, B20 yerini alan H₂'nin artmasının yanma süresini kısaltarak maksimum basıncın üst ölü noktaya daha yakın gerçekleşmesine diğer bir ifade ile tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasına sebep olduğu anlaşılmaktadır. Bu negatif işi arttırabilir. Bunun için yakıt püskürtme başlangıcının biraz geciktirilmesi (Rotar) yararlı olabilir. Bitkisel yağ ve hidrojenin birlikte kullanıldığı çift yakıtlı bir çalışmada tutuşma gecikmesi süresinin uzadığı buna pilot yakıtın çevresini saran hava ve gaz karışımının tutuşmayı etkilemiş olabileceği ifade edilmiştir (Senthil Kumar vd., 2003). Bir başka kaynakta ise hidrojenli çift yakıtlı çalışmada hidrojenin tutuşma gecikmesi süresini kısalttığı ifade edilmiştir (Ghazi, 1987). Çift yakıtlı hidrojenli çalışmalarda hidrojenin tutuşma gecikmesi süresine etkisinin daha net anlaşılması için buna yönelik kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır



Şekil 8.

Tam yükte B20'ye %8 ve %14 hidrojen ilave edilmesinin krank mili açısına bağlı olarak silindir basıncına etkisi (n=1800 d/d).

4. Sonuç ve Öneriler

Değişik yüklerde 1800 d/d sabit hızda esas yakıt olarak çift yakıttan oluşan B20 ile çalışan tek silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda, B20 yerine belirli oranda hidrojen ilave edilmesinin performans ve emisyonlara etkisi ile ilgili bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

Her bir yükte motora verilen hidrojen oranı arttıkça ÖYT'nin düştüğü görülmüştür. ÖYT'nin düşmesinin esas sebebi hidrojenin ısı değerinin yüksek olmasıdır. Diğer bir sebep ise hidrojenin yanma verimini iyileştirmesi olabilir.

Bütün yüklerde, hidrojen oranının artması ile EGS'larının yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde azaldığı görülmüştür. Buna hidrojenin homojen dağılmasının ve yanma hızının yüksek olması nedeniyle yanmanın egzoza daha az sarkmasının sebep olduğu tahmin edilmektedir.

B20 yakıtı ile çalışırken her yük durumunda is emisyonu hidrojen miktarının artması ile önemli miktarda düşmektedir. İS emisyonunun azalmasına içeri sürülen hidrojenin artması ile karbon içeren yakıtın toplam yakıt içerisindeki miktarının azalması ve yanmanın iyileşmesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

HC ve CO emisyonu B20 yakıtı ile hidrojen miktarı arttıkça is emisyonuna benzer şekilde düşmektedir. HC ve CO emisyonlarının düşmesine, hidrokarbon içeren yakıt miktarının azalmasının,

biyodizel içerisinde oksijen bulunmasının, hidrojenin silindirin her tarafına homojen olarak dağılmasının ve hızlı yanmasının sebep olduğu tahmin edilmektedir.

NO_x emisyonu ise her bir yükte B20 yerini alan H₂ arttıkça artmaktadır. NO_x emisyon artışı, püskürtme başlangıcının geciktirilmesi ve bir miktar egzoz gazının yeniden motora verilmesi (EGR) gibi yöntemlerle önlenabilir.

B20 yakıtının yerini alan H₂ ilavesi, maksimum basıncın daha erken meydana gelmesine sebep olduğu için negatif işi arttırabilir. Bunun için esas yakıtla birlikte hidrojen kullanılması halinde yakıt püskürtme başlangıcının biraz geciktirilmesi (Rotar) yararlı olabilir. Buna yönelik kapsamlı araştırmalar yapılabilir

5. Kaynaklar

1. Abdel-Rahman, AA. (1998) On the emissions from internal-combustion engines: a review, *International Journal Of Energy Research*; 22,:483-513.
2. Aktaş A., ve Sekmen, Y. (2008) The effects of advance fuel injection on engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, 23(1), 199-206.
3. Baranescu, RA., ve Lusco, JJ. (1982) Performance, durability and low temperature evaluation of sunflower oil as a diesel fuel extender, *Vegetable Oil Fuels: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, ASAE Publication, Fargo, ND, 312-328, Aug.
4. Bozbas, K. (2008) Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 542-552.
5. Buckel, JW., Chandra, S. (1996) Hot wire ignition of hydrogen—oxygen mixture, *Int J Hydrogen Energy*; 21(1):39-44.
6. Canakci, M., ve Van Gerpen, JH. (2001) Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids, *Trans. ASAE*, 44 (6), 1429-1436.
7. Canakci, M., ve Van Gerpen, JH. (1999) Biodiesel production via acid catalysis, *Trans. ASAE*, 42(5), 1203-1210.
8. Canakci, M. (2007) Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel, *Bioresource Technology*, 98(6), 1167-1175.
9. Carraretto, C., Macor A., Mirandola A., Stoppato A., Tonon S. (2004) Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations, *Energy*, 29, 2195-2211.
10. Das, LM. (2002a) Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application, *Int J Hydrogen energy*; 27, 479-87.
11. Das, LM. (2002b) Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi. *Int J Hydrogen Energy*, 27, 953-65.
12. D'Ippolito, SA., Yori JC., Iturria ME., Pieck CL., Vera CR. (2007) Analysis of a Two-Step, Noncatalytic, Supercritical Biodiesel, Production Process with Heat Recovery, *Energy & Fuels*, 21, 339-346.
13. Demirbas, A. (2007) Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide, *Energy Conversion and Management*, 48, 937-941.
14. Ghazi, AK. (1987) The Dual Fuel Engine, In: Evens RL. Editor. A Chapter in automotive engine alternatives, Canada: Bleham Press.
15. Gül, K.E. (2006) Hidrojenin içten Yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performansa etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
16. Haragopala Rao, B., Shrivastava, KN., Bhakta, HN. (1983) Hydrogen for dual fuel engine operation, *Int J Hydrogen Energy*, 8(5):381-4.
17. He, Y., ve Bao, YD. (2003), Study on rapeseed oil as alternative fuel for a single-cylinder diesel engine, *Renewable Energy*, 28, 1447-1453.
18. Homann, H. S. (1985). Conversion facts among smoke measurements, SAE 850267.
19. Huzayyin, AS., Bawady, AH., Rady, MA., Dawood, A. (2004) Experimental evaluation of Diesel engine performance and emission using blends of jojoba oil and Diesel fuel, *Energy Conversion and Management*, 45(13-14), 2093-2112.
20. Karaosmanoğlu, F. (1999) Vegetable oil fuels: a review, *Energy Sources*, 21, 221-231.

21. Naber, JD, Siebers, DL. (1998) Hydrogen combustion under diesel engine conditions, *Int. J Hydrogen Energy*; 23(5):363–71.
22. Nwafor, OMI., ve Rice G. (1996) Performance of rapeseed oil blends in diesel engines, *Applied Energy*, 54(4), 345-354.
23. Nwafor, OMI. (2004) Emission characteristics of diesel engine running on vegetable oil with elevated fuel inlet temperature, *Biomass and Bioenergy*, 27(5), 507-511.
24. Masood, M., Ishrat, MM., Reddy, AS. (2007) Computational combustion and emission analysis of hydrogen-diesel blends with experimental verification, *Int J Hydrogen Energy*, 3, 2539–47.
25. Porpatham, E., Ramesh, A., Nagalingam, B., (2007) Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2057 – 2065.
26. Rakopoulos, CD., Antonopoulos, KA., Rakopoulos, DC., Hountalas, DT., Giakoumis EG. (2006) Comparative performance and emissions study of a direct injection Diesel engine using blends of Diesel fuel with vegetable oils or bio-diesels of various origins, *Energy Conversion and Management*, 47, (18-19), 3272-3287.
27. Ramadhas, AS., Jayaraj, S., Muraleedharan, C. (2004), Use of vegetable oil as I.C. engine fuels - A review, *Renewable Energy*, 29, 727-742.
28. Romano, S. (1982) Vegetable oils - a new alternative, *Vegetable Oil Fuels: Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, ASAE Publication, Fargo, ND, 106-116Aug.
29. Sahoo, P.K., Das L.M., Babu M.K.G., Naik S.N. (2007) Biodiesel development from high acid value polanga seed oil and performance evaluation in a CI engine, *Fuel*, 86, 448–454.
30. Saravanan, N., Nagarajan, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M. (2007) Experimental investigation of hydrogen port fuel injection in DI diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 4071 – 4080.
31. Saravanan, N., Nagarajan, G., Narayanasamy, S. (2008a) An experimental investigation on DI diesel engine with hydrogen fuel, *Renewable Energy*, 33, 415–421.
32. Saravanan, N., Nagarajan, G., Sanjay, G., Dhanasekaran, C., Kalaiselvan, K.M. (2008b) Combustion analysis on a DI diesel engine with hydrogen in dual fuel mode, *Fuel*, 87, 3591–3599.
33. Saravanan, N., Nagarajan, G. (2008c) An Experimental Investigation Of Hydrogen-Enriched Air Induction In A Diesel Engine System, *International Journal Of Hydrogen Energy*, 33, 1769 – 1775
34. Saravanan, N., Nagarajan, G., Kalaiselvan, K.M., Dhanasekaran, C. (2008d) An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique, *Renewable Energy* 33 422–427.
35. Saravanan, N., Nagarajan, G. (2009) Performance and emission study in manifold hydrogen injection with diesel as an ignition source for different start of injection, *Renewable Energy*, 34; 328–334.
36. Senthil Kumar M, Ramesh A, Nagalingam B. (2001) Use of hydrogen and methanol as primary fuels in a dual fuel engine. XVII National Conference on I.C.Engines and Combustion, India, December.
37. Senthil Kumar, M., Ramesh A, Nagalingam B. (2002) Hydrogen Induction for improving the performance of a vegetable oil fueled CI Engine. Proceedings of the International Conference on Waste to Energy, Jaipur, India.
38. Senthil Kumar, M, Ramesh, A, Nagalingam, B., (2003) Use of hydrogen to enhance the performance of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, 1143 – 1154.
39. Silva, FN., Prata, AS., Teixeira, JR. (2003), Technical feasibility of oleic sunflower methyl ester utilization in Diesel bus engines, *Energy Conversion and Management*, 44(18), 2857-2878.
40. Van Gerpen, JH., Peterson, CL., Goering CE. (2007) Biodiesel: An Alternative Fuel for Compression Ignition Engines, *Agricultural Equipment Technology Conference*, Louisville, Kentucky, USA, 1-22, 11-14 February.
41. Yori, JC., D'Ippolito, SA., Pieck, CL., Vera, CR. (2007) Deglycerolization of Biodiesel Streams by Adsorption Over Silica Beds, *Energy & Fuels*, 21, 347-353.