



## TEK SİLİNDİRLİ BENZİNLİ BİR MOTORDA KISMİ YÜKLERDE BÜTANOL İLAVESİNİN PERFORMANSA VE EMİSYONLARA ETKİSİ

Salih ÖZER\*, Mehmet AKÇAY\*\*, Mustafa GÖLCÜ\*\* ve Hilmi YAZICI\*\*

\* Otomotiv Programı, Meslek Yüksek Okulu, Muş Alparslan Üniversitesi, 49100, Muş  
sallih@hotmail.com

\*\* Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, 20017, Denizli  
makcay@pau.edu.tr, mgolcu@pau.edu.tr, hyazici@pau.edu.tr

(Geliş Tarihi :02.07.2010 Kabul Tarihi:24.02.2011)

**Özet:** İçten yanmalı motorlarda petrol kaynaklı yakıtlara alternatif olarak görülen yakıtlardan biri de bütanoldür. Bütanol, biokütleden (biobütanol) fermantasyon yolu ile üretilebilmekte ve buji ile ateşlemeli motorlarda önemli bir değişiklik yapılmadan saf olarak veya benzin ile belirli oranlarda karışım yapılarak kullanılabilir. Yapılan bu çalışmada, tek silindirli buji ile ateşlemeli bir motorda hacimsel olarak benzinin içerisine %10 ve %20 n-bütanol ilavesinin 2400 d/d motor hızında, %20, %40, %60, %80 ve %100 motor yüklerinde performans ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, benzine n-bütanol ilavesi fren özgül yakıt tüketimini, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve egzoz gazı sıcaklığını artırdığı, CO ve HC emisyonlarını azalttığı görülmüştür. Ayrıca benzin içerisine n-bütanol ilavesinin faz ayrışması olmaması ve motorda kullanıldığı sürece hiçbir olumsuzlukla karşılaşılması sonucunda, n-bütanolün fosil kaynaklı yakıt emisyonlarının azaltılmasında bir katkı maddesi olarak kullanılabilmesi ifade edilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Bütanol, alternatif yakıt, performans, emisyon

## EFFECT OF ADDING BUTANOL ON THE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A SINGLE-CYLINDER GASOLINE ENGINE FOR PARTIAL LOADS

**Abstract:** Butanol is one of the fuel which is seen as alternative to petroleum based on fuels in internal combustion engines. Butanol, can be produced via fermentation from biomass (biobutanol) and it can be used as pure or mixed with gasoline in specific ratios in spark ignition engines without a significant change. In this study, the effects on the performance and exhaust emissions of n-butanol addition 10% and 20% by volume into the gasoline, on single-cylinder spark ignition engine was investigated at engine speed 2400 1/min and engine load 20%, 40%, 60%, 80% and 100%. According to the results obtained from the study, n-butanol addition to gasoline increases brake specific fuel consumption, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emissions, and exhaust gas temperature and reduces CO and HC emissions. Moreover, the result of adding n-butanol inside of gasoline does not cause phase separation and any negativeness is seen while using in engine. Therefore it can be signified that n-butanol can be used as additive for reducing fossil based fuel emission.

**Keywords:** Butanol, alternative fuel, performance, emissions.

### GİRİŞ

Günümüzde içten yanmalı motorlar, petrol esaslı yakıtlar ile çalışmaktadırlar. Ancak petrol rezervlerinin sınırlı ömrünün olması ve petrol kaynaklı yakıt kullanımı ile açığa çıkan emisyonların çevreye olan olumsuz etkileri, petrole alternatif yakıtların araştırılması ve geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Fosil yakıtların yanması neticesinde açığa çıkan CO, HC, NO<sub>x</sub> ve partikül emisyonları atmosferi kirleterek ciddi bir sağlık problemi oluşturmaktadır. Büyük şehirlerde yapılan çalışmalar, zararlı emisyonların %50'sini içten yanmalı motorların oluşturduğunu göstermektedir (Şen ve Şahin, 1996; Sharma ve Khara, 2001). Taşıtlarda kirletici egzoz emisyonlarının azaltılması yönünde alınan önlemler kaynak öncesi, kaynağında ve kaynak sonrası olmak üzere üç ayrı grupta değerlendirilmektedir (Ergeneman vd, 1997).

Alternatif yakıt kullanımı, kaynak öncesi kontrol yöntemi olarak değerlendirilmekte ve taşıt motorunda kullanılan yakıt bileşiminin kirletici emisyonu azaltıcı yönde hazırlanması olarak tanımlanmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda kullanılacak yakıtların, ucuz ve bol miktarda üretilebilmesi, ısı değerlerinin yüksek olması, kolayca depolanabilmesi ve taşınabilmesi, yüksek oktan sayısına sahip olması ve düşük düzeylerde egzoz emisyonu oluşturması istenir. Bu nedenle de, alternatif olarak öne sürülen yakıtın minimum bu özellikleri sağlaması gerekmektedir. Alkoller, oktan sayısının yüksek olması, egzoz emisyonlarının düşük olması ve tarımsal ürünler gibi yenilenebilir biokütle kaynaklardan üretilebilmesi nedeniyle alternatif yakıtlar arasında önemli bir yere sahiptir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılabilen alkol çeşitleri metanol (CH<sub>3</sub>OH), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ve bütanol (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH)'dür. Alkoller motor yakıtlarına göre daha küçük moleküler yapıya sahip olmaları, yapılarında oksijen bulundurmaları, motor yakıtlarında bulunan kükürt, kanserojen maddeler ve ağır metalleri içermemelerinden dolayı egzoz emisyonlarında olumlu etkilere sebep olmaktadır (Akyaz, 2007; Kulakoğlu, 2008). Yapılarında bulunan oksijen sayesinde daha parlak ve daha hızlı bir yanma sağlanmaktadır. Yanma hızının artırılması, yanma verimini iyileştirmekte ve motorun kararlı çalışması sağlanmaktadır. Ayrıca, hızlı bir yanma ile yüksek sıkıştırma oranlarına çıkarılarak motor vuruşu yapmadan verim artırılabilir (Çelik ve Çolak, 2008).

Alkoller içerisinde bütanol, benzin ile çalışan içten yanmalı motorlarda bir değişiklik yapılmadan yakıt olarak kullanılabilir olup etanol ve metanole göre daha yüksek enerji içeriğine, düşük buhar basıncına ve

su içerisinde daha düşük çözünürlüğe sahiptir (Zhang ve Boehman, 2010; Alasfour, 1998a). Etanolün motorlarda kullanımı havanın kalitesini kötüleştirmekte ve hatta insan sağlığı üzerinde zararlı bir etkiye neden olmaktadır (Black *vd*, 2010). Bütanol, %22 oranında oksijen içerir ve bu durum etanole göre daha temiz yanmasını sağlar (Qureshi *vd*, 2008; Qureshi *vd*, 2010). Bunun yanında bütanol, bir hidrokarbon yakıtı içerisinde suyun tutulmasını artırmaktadır ve böylece yakıtın oktan sayısını artırmakta ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını da düşürmektedir (Zhang, 2010; Black, 2010). Bütanol, bu ve benzeri özellikleri bakımından etanole göre benzine daha yakın olarak görülmektedir (Alasfour, 1998a; www.wikipedia.org, 2010), Black, 2010; Qureshi *vd*, 2008; Qureshi *vd*, 2010). Tablo 1'de benzin (izo-oktan) ve alkollerin genel olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmektedir (Çolak, 2006; Haşimoğlu *vd*, 2000; Topgül *vd*, 2006; Szwaja ve Naber, 2010; Merc, 2009; Rakopoulos *vd*, 2010a; Rakopoulos *vd*, 2010b; Sürmen *vd*, 2004).

**Tablo 1.** Benzin ve alkollerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

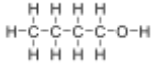
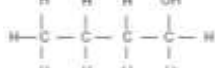
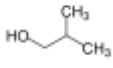

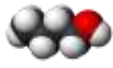



Özellik	Metanol	Etanol	Bütanol	Benzin
<b>Kimyasal formülü</b>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
<b>Mol Ağırlığı</b>	32,04	46,06	74,12	91,4
<b>C/H oranı</b>	0,25	0,333	4,8	0,556
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	796	788	811	732
<b>Isıl değeri (MJ/kg)</b>	20,11	26,9	33	43,4
<b>Stokiyometrik oran (H/Y oranı)</b>	6,45	9	11,2	14,7
<b>Buharlaştırma ısısı (kJ/kg)</b>	1200	960	584	360
<b>Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)</b>	470	425	390	257
<b>Oktan sayısı</b>	108,7	108,6	96	94
Araştırma oktan sayısı (AOS)				
Motor oktan sayısı (MOS)	88,6	89,7	78	82-94
<b>Kaynama noktası (°C)</b>	64,5	78,3	117,2	27-255
<b>Donma noktası (°C)</b>	-97,8	-114,3	-89,2	-40
<b>Kinematik Viskozite (mm<sup>2</sup>/ s, 40°C)</b>	0,59	1,19	1,2	0,37-0,44
<b>Buhar basıncı (kPa, 38°C)</b>	32	15,9	44	48-108

Bütanol, ABE(Aseton-Bütanol-Etanol) rnantasyonunun bir ürünüdür. Mısır, çimen, tarımsal atıklar ve diğer biyokütleden fermantasyon yoluyla (biobütanol) elde edilebilmesinin yanında, fosil yakıtlardan da (petrobütanol) üretilebilmektedir (Qureshi *vd*, 2008; Qureshi *vd*, 2010; Mortimer, 1992). Bütanolün 4 çeşit izomeri bulunur ve her biri aynı kapalı formüle sahip (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH), ancak açık formülleri farklıdır. Atom gruplaşmaları farklı olduğundan dolayı her biri farklı özellikler gösterirler (www.wikipedia.org, 2010; Szwaja ve Naber, 2010). Tablo 1'de bütanol ve izomerlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Szwaja ve Naber, 2010; www.meck-chemicals.com.tr, 2010; http://en.wikipedia.org, 2010). Konu ile ilgili olarak öne çıkan bazı çalışmalar şu şekildedir; Szwaja ve Naber, (2010), yapmış oldukları çalışmada; benzine belirli oranlarda (%0, %20, %60 ve %100) n-bütanol karıştırılması ile fosil yakıt oranını düşürmeyi ve bu yolla da CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda n-bütanolün saf olarak ya da benzin ile karışım oluşturularak kullanımının mümkün olduğu ve benzinin yerini alabilecek yeterlilikte bir alternatif yakıt olduğu

ifade edilmiştir. Alasfour, (1998b), yapmış olduğu çalışmada, izo-bütanol kullanımının buji ile ateşlemeli bir motorda NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkisini araştırmıştır. %30 oranındaki izo-bütanol ile benzin karışımının NO<sub>x</sub> emisyonunu %9 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyon seviyesindeki azalma zengin karışım içerisinde belirgin olmuştur. Hava/hayit oranı (λ) 0,9 iken giriş havasının sıcaklığı 40 °C den 60 °C ye çıkarılması, NO<sub>x</sub> emisyonlarında %10 azalma meydana getirmiştir. Özer (2010) yapmış olduğu çalışmada; tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda %3, %5, %8, %10 oranında bütanolün motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak, dizel motorlarda bütanolün yüksek oranlarda kullanımının motor performansını azalttığı, diğer taraftan emisyonlarda iyileşme sağladığı görülmüştür.

Rakopoulos *vd*, (2010b), yapmış oldukları çalışmada, hacimsel olarak %8 ve %16 oranlarındaki n-bütanol ile standart dizel yakıtı karışımının direk püskürtmeli bir dizel motorunda kullanımının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Dizel yakıtına göre, n-bütanolün setan sayısının düşük

**Tablo 2.** Bütanol ve izomerlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik/ İzomeri	n-Bütanol (1-Bütanol, Bütıl alkol, Metil ol propan)	sec-bütanol (2-Bütanol, sec-Bütıl alkol)	izo-bütanol (İzobütıl alkol, IBA)	tert-bütanol (t-Bütanol, t-Bütıl Alkol, tert-Bütıl alkol)
Kimyasal Formülü	CH <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> - CH <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> CH(OH)CH <sub>2</sub> C H <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> OH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> COH
Kimyasal Yapısı				
3 Boyutlu Yapısı				
Moleküler ağırlığı (g/mol)	74.12	74.12	74.12	74.12
Kaynama Noktası (°C)	116-118	99-102	108	81-83
Erime Noktası (°C)	-89,5	-115	-108	25
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) (20 °C)	0,81	0,81	0,802	0,78
Patlama noktası (°C)	34	23	28	14
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (°C)	345	406	415	470

olmasından dolayı dizel yakıtına yapılan n-bütanol karışımı daha yüksek ateşleme gecikmesi ve kontrolsüz yanmaya neden olmuştur. İS, NO<sub>x</sub> ve CO emisyonları dizel yakıtına göre daha düşük, ancak HC emisyonları daha yüksek ölçülmüştür.

Yapılan literatür araştırmasında, n-bütanolün buji ile ateşlemeli motorlarda performans ve emisyonlar üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışmaya ulaşılabilmekte iken (Szwaja ve Naber, 2010) dizel motorlarındaki uygulamalarına daha çok rastlanmaktadır (Rakopoulos vd, 2010a; Rakopoulos vd, 2010b; Rakopoulos vd, 2010c; Karabektas ve Hosoz, 2009). Bu nedenle, yapılan çalışmada, n-bütanolün benzinli bir motorda denenmesi tercih edilmiştir.

Alkollerle ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, genel olarak benzinin içerisine alkol ilavesi (bütanol, etanol, metanol) ile ısı veriminin düştüğü görülmektedir. Alsfor (1998b)'un yaptığı çalışmadan da görüldüğü gibi benzinin içerisine ilave edilen izo-bütanol oranının %20'yi geçmesinden sonra aynı şartlarda aynı ısı verimi elde etmek için karbüratör memesi üzerinde değişiklik yapılmıştır. Bu durum göz önünde bulundurularak, yapılan çalışmada, motor üzerinde değişikliğe yol açmayacak oranlarda alkol ilavesi tercih edilmiştir.

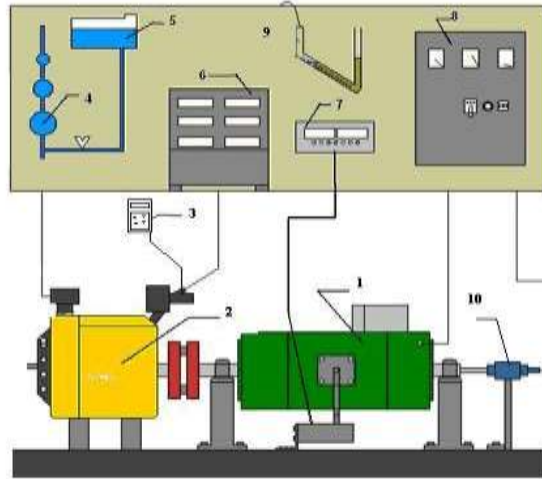
Bu çalışmanın amacı, n-bütanol ilavesi ile egzoz emisyonlarının iyileştirilmesine yöneliktir. Literatürde n-bütanolün %10-%20 oranında benzine ilavesinin egzoz emisyonları üzerine etkileri ile ilgili benzer

çalışmaya rastlanmamış olması da bu oranlarda çalışılmasını teşvik etmiştir. Ayrıca bütanol; etanol ve metanole göre gerek ısı değerince gerekse buharlaşma ısıları bakımından üstünlük göstermesi de bütanol ile çalışmayı tercih ettiren bir başka sebeptir.

Bu sebeplerden dolayı yapılan çalışmada; tek silindri, buji ile ateşlemeli bir motorda %20, %40, %60, %80 ve %100 motor yüklerinde, 2400 d/d motor hızında, benzinin içerisine hacimsel olarak %10 ve %20 n-butanol ilavesinin motor performans ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, n-bütanol kullanımı ile CO emisyonlarındaki azalma (Rakopoulos vd, 2010a; Rakopoulos vd, 2010b) ve NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki artış (Rakopoulos vd, 2010c) literatür ile benzerlik göstermektedir. (Rakopoulos vd, (2010c) yapmış oldukları çalışmada, hacimsel olarak %25 oranında dizel yakıtına yapılan n-bütanol ilavesinin NO<sub>x</sub> emisyonlarında %36,2 oranında bir artışa neden olduğu ifade edilmektedir. Diğer taraftan HC emisyonlarında ise literatürün aksine azalma gözlemlenmiştir Rakopoulos vd, 2010a; Rakopoulos vd, 2010b). Karabektas ve Hosoz, (2009), yapmış oldukları çalışmada, dizel yakıtı içerisine yapılan izobütanol ilavesinin HC emisyonlarını artırdığı gözlemlenmiştir. Karışım oranının artışına paralel olarak HC emisyonları da artmıştır. Ortalama artış %12,9 ve %32,9 arasında gerçekleşmiştir.

1. DC Dinamometre
2. Deney Motoru
3. Egzoz Gazı Sıcaklığı Ölçme Göstergesi
4. Yakıt Bütürü
5. Yakıt Deposu
6. Egzoz Gaz Analiz Cihazı
7. Loadcell İndikatörü
8. Dinamometre Kontrol Paneli
9. Hava Ölçme Diyagramı
10. Dinamometre Devir Sensörü



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

## MATERYALMETOT

Deney düzeneği; buji ile ateşlemeli motor, DC tip bir dinamometre, egzoz gaz analiz cihazı, egzoz gazı sıcaklığını ölçmek için K tipi bir termokupl ve yakıt tüketimi ölçme düzeneğinden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1’de gösterilmektedir.

Deney düzeneğinde kullanılan DC dinamometre 4000 d/d’da 10 kW gücü absorbe edebilmekte ve aynı zamanda motora ilk hareketi vermek içinde kullanılmaktadır. Deney motorunun genel özellikleri Tablo 3’de verilmektedir.

Tablo 3. Deney motorunun özellikleri.

Model	
Silindir Sayısı	1
Tipi	4 zamanlı, hava soğutmalı
Çap x Strok	70 x 55
Yakıt Sistemi	Karbüratörlü
Sıkıştırma Oranı	8:1
Maksimum Güç	1,937 kW (2600 d/d)

Motora gelen yük bir loadcell yardımı ile ölçülmüştür. Emisyon ölçümleri için MRU DELTA 1600L egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Yakıt tüketimi, 10 ml kaptaki yakıtın birim saniyedeki harcanma miktarı ölçülerek bulunmuştur. Ölçüm aletlerinin hassasiyetleri ve ölçüm aralıkları Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Deney düzeneğinde kullanılan ölçü aletlerinin ölçüm hassasiyetleri.

Ölçümler	Hassasiyet
Yük	±%0,6 N
Yük Kolu	±%0,1 m
Hız	±1 1/min
Zaman	±%1 s
Sıcaklık	±1 °C
CO (%vol)	±%0,06
CO <sub>2</sub> (%vol)	±%0,5
NO <sub>x</sub> (ppm)	±%0,05
HC (ppm)	±%0,12

Deney yakıtı olarak kurşunsuz benzin ve n-bütanol kullanılmış ve genel özellikleri Tablo 5’de verilmiştir (Szwaja ve Naber, 2010; , Rakopoulos vd, 2010b; Gümüş, 2009; www.shell.com, 2010).

Deneylerde ilk olarak; motor, benzin ile maksimum torkun sağlandığı 2400 d/d motor hızında çalıştırılmış, bu devirde gaz kolu konumunun maksimum konumda olduğu yerde elde edilen kuvvetin, %20, %40, %60 ve %80 yüklere karşılık gelen; 2,1 Nm, 4,2 Nm, 6,3 Nm ve 8,4 Nm motor yüklerinde ölçümler alınmıştır.

Tablo 5. Deney yakıtlarının genel özellikleri

Özellik	Benzin	n-Bütanol
Yoğunluk 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	765	810
Oktan Sayısı (RON+MON)/2	90	86
Alt Isıl Değeri (MJ/kg)	44.04	33,1
Kinematik Viskozite 20°C (mm <sup>2</sup> /s)	1 <sup>a</sup>	3,6
Kaynama Noktası (°C)	210	118
Buharlaştırma ısı (kJ/kg)	~350	585
Ağırlıkça Oksijen İçeriği (%)	2.7	21,6
Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı	14.7	11.2

<sup>a</sup>= 37,8 °C’de ölçülmüştür.

Deney yakıtlarının karışımları hacimsel olarak ayarlanmıştır. Benzinin içerisine ölçme kapları kullanılarak ilk olarak %10 n-bütanol ilave edilmiş, 2400 d/d motor hızında aynı motor kuvvetini verecek şekilde çalıştırılmış ve ölçümler tekrarlanmıştır. Benzer deneyler, aynı koşullar oluşturularak %20 n-bütanol ile gerçekleştirilmiştir.

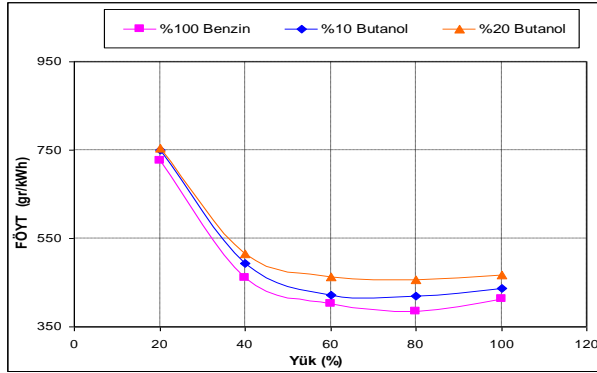
## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### Motor Performansı

Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT); bir saatte bir kW yararlı iş elde edebilmek için yakılması gereken yakıt miktarıdır. Bu nedenle motor yakıtlarının FÖYT’leri karşılaştırılmasında yakıtların ısıl değerlerinin etkisi oldukça önemlidir. Isıl enerjisi yüksek yakıtların içerisine, ısıl enerjisi düşük yakıtlar karıştırılırsa

karışımların ısı enerjileri düşmekte ve FÖYT artmaktadır (Bayraktar, 2005; Sekmen, 2007).

Şekil 4'te benzine bütanol ilavesinin motor yüküne bağlı olarak FÖYT'ne etkisi görülmektedir. Bütanol ilavesi ile FÖYT'de artış olmuştur. Yakıtın ısı değeri FÖYT'ni önemli derecede etkileyen bir parametredir. Motorda ve çalışma parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın benzine bütanol ilavesi, yakıtın ısı değerini düşüreceğinden FÖYT'de artışa neden olmaktadır. Bu artış büyük oranda bütanolün ilave edilme oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Maksimum FÖYT'deki artış, saf benzin kullanımına göre, %20 n-bütanol karışımı ile %80 motor yükünde %18,8 olarak ölçülmüştür. Bütanolün ısı değeri, benzinin ısı değerinden yaklaşık olarak %25 daha düşüktür. Dolayısıyla, aynı şartlarda aynı gücü elde etmek için daha fazla yakıtı ihtiyaç duyulmakta, bu da FÖYT'yi artırmaktadır.



Şekil 4. Bütanol Benzin karışımının Fren Özgül Yakıt Tüketimine etkisi.

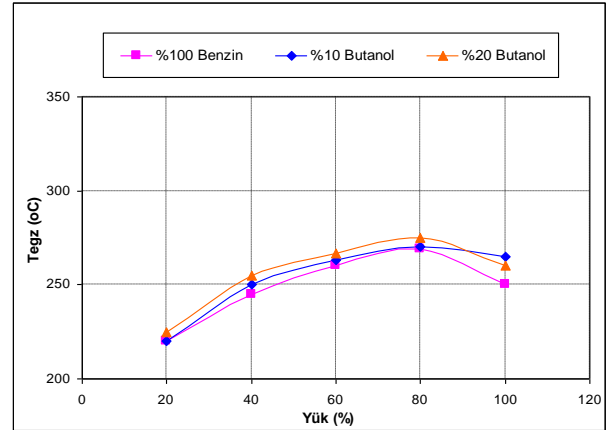
Benzin içerisine hacimsel olarak bütanol ilavesinin egzoz sıcaklığına etkisi Şekil 5'de gösterilmektedir. Egzoz gazı sıcaklığı yanma sonu sıcaklığının bir fonksiyonu ve göstergesidir. Bütanolün içerisinde bulunan oksijen, hidrojen elementinden ayrışarak yanmayı kısmi olarak iyileştirmektedir. Yanmanın iyileşmesi ise yanma sonu sıcaklığını etkilemektedir. Ayrıca, benzine bütanol ilave edilmesi yakıt/hava oranını da etkilemekte, bütanol ilavesi ile yakıt/hava oranı zenginleşmektedir. Karışımın zenginleşmesi yanma sonu sıcaklığını etkileyen bir başka etmendir. Şekil 5'de görüldüğü üzere, benzinin içerisine bütanol ilavesi ile her bir benzin-bütanol karışımlarında egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Maksimum egzoz gazı sıcaklığındaki artış, saf benzine göre %10 n-bütanol karışımı ile %100 motor yükünde %6 olarak ölçülmüştür.

## Egzoz Emisyonları

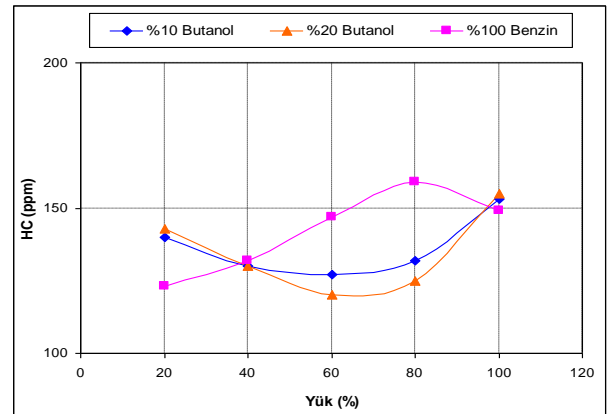
Benzine bütanol ilavesinin HC emisyonlarına etkisi Şekil 6'da gösterilmektedir. Benzine bütanol ilavesi ile düşük ve yüksek motor yüklerinde HC emisyonları artmakta, orta motor yüklerinde ise HC emisyonları azalmaktadır. Maksimum HC emisyonlarındaki azalma, saf benzin kullanımına göre %20 n-bütanol karışımı ile

%80 motor yükünde %21,4 olarak ölçülmüştür. Düşük motor yüklerinde gaz keleşinin kısmen kapalı olması ve silindir içerisine giren yakıt miktarının kısmen azalması ile karışım fakirleşmekte, silindir içerisine yanma kötüleşmektedir. Bu durum düşük motor yüklerinde HC emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Motor yükünün artması ile silindir içerisine gönderilen yakıt miktarı artmaktadır. Bütanolün içerisinde bulunan oksijenin silindir içerisine iyileştirmesi ile HC emisyonlarında azalma olmaktadır. Yüksek motor yüklerinde ise silindir içerisine gönderilen yakıt miktarı artmakta ve bütanolün karışımı zenginleşmesinden dolayı silindir içerisindeki karışım tam yanmamaktadır. Yanamayan yakıtın bir kısmı egzozdan dışarıya atılmakta ve dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır.

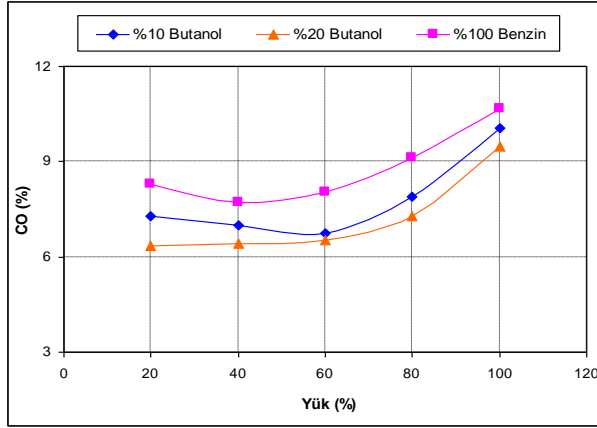
Benzin içerisine bütanol ilavesinin CO emisyonunu azaltmasının sebeplerinden birisi, bütanol içerisine bulun oksijenin silindir içerisindeki yanmayı iyileştirmesidir. Ayrıca, C atomlarının miktarı, yanma sonunda ortaya çıkan ürünlere etki etmektedir. CO emisyonlarının azalmasıdaki etkenlerden biride bütanol yakıtının içerisinde bulunan C atomunun benzine göre daha az olmasıdır. Ayrıca, bütanolün oktan sayısının yüksek olması silindir içerisindeki yanmayı iyileştirmekte, C atomlarının tam yanmasını sağlamakta ve eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 5. Benzin bütanol karışımının egzoz sıcaklığına etkisi.

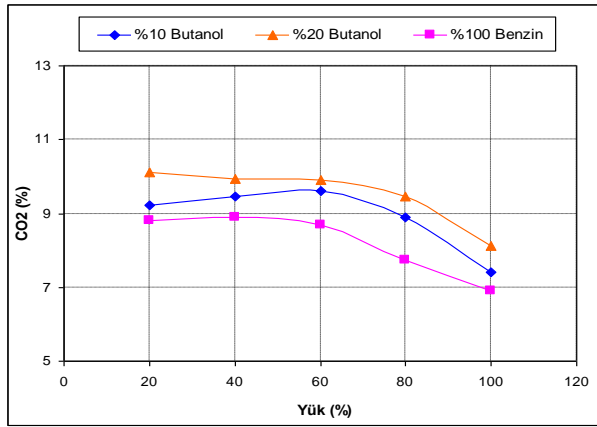


Şekil 6. Benzin bütanol karışımının HC emisyonlarına etkisi.



Şekil 7. Benzine bütanol ilavesinin CO emisyonuna etkisi.

Benzin içerisine yapılan bütanol ilavesinin CO<sub>2</sub> emisyonlarına etkisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Benzine bütanol ilavesi ile her bir karışım oranında ve her bir motor yükünde CO<sub>2</sub> emisyonu artmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonlarında saf benzine göre maksimum artış, %20 n-bütanol karışımı ile %80 motor yükünde %22,3 olarak ölçülmüştür. CO<sub>2</sub> emisyonu bir tam yanma ürünüdür. CO<sub>2</sub> emisyonunun artması, bütanolün bünyesinde bulunan oksijenin silindir içerisinde salınarak yanmayı iyileştirmesi ve tam yanmayı sağlaması ile açıklanabilmektedir. CO emisyonundaki azalmanın CO<sub>2</sub> emisyonunun artışı netiklediği ifade edilebilir.

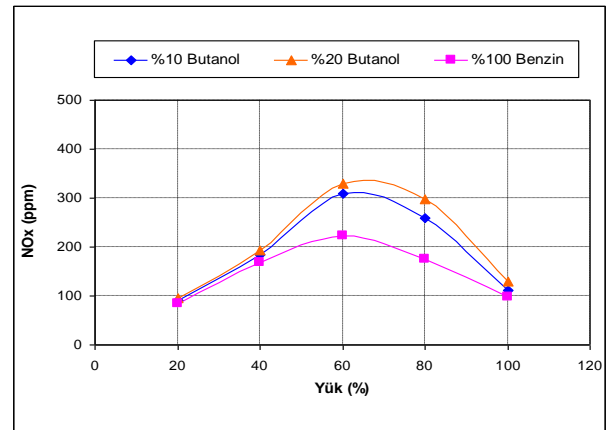


Şekil 8. Benzin bütanol karışımının CO<sub>2</sub> emisyonuna etkisi.

Yanma sonucu oluşan N<sub>2</sub>O, NO, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, N<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> emisyonlarına genel olarak azot oksitler (NO<sub>x</sub>) denilmektedir. NO<sub>x</sub>'ler büyük oranda silindir içerisinde oluşan sıcaklığa ve ortamdaki O<sub>2</sub> miktarına bağlıdır. Hava içerisindeki O<sub>2</sub>, yakıt ile reaksiyona girerken N<sub>2</sub> gazı reaksiyona girmemektedir. Ancak sıcaklık yaklaşık olarak 1600 °C'yi geçtiğinde hava içerisindeki N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ile reaksiyona girmekte ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını oluşturmaktadırlar (Ergeneman vd, 1997; Lin ve Li, 2009; Küçükşahin 2008).

Şekil 9'da benzin bütanol karışımının NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisi görülmektedir. Her bir karışım ve yük oranında NO<sub>x</sub> emisyonu artmaktadır. NO<sub>x</sub> emisyonlarında saf benzine göre maksimum artış, %20 n-bütanol

karışımında, %80 motor yükünde %71,5 olarak ölçülmüştür. Benzine bütanol ilavesi ile %20 ve %40 motor yüklerinde NO<sub>x</sub> emisyonları önemsenmeyecek derecede artış göstermektedir. Düşük motor yüklerinde silindirlere giden yakıt miktarı az olduğu için yanma sonu sıcaklığı azalmakta ve NO<sub>x</sub> emisyonları azalmaktadır. %60 ve %80 yüklerde ise hava/yakıt oranı zengine yaklaşmakta ve bütanolün bünyesinde bulunan oksijenin silindir içerisindeki yanmayı iyileştirmesi ile NO<sub>x</sub> emisyonları daha da artmaktadır. %100 motor yükünde silindir içerisine giden yakıtın artması ile karışım daha da zenginleşmekte ve tam yanma için gerekli olan hava bulunmadığı için yanma, %60 ve %80 motor yüküne göre kısmen kötüleşmektedir. Bu durum NO<sub>x</sub> emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 9. Benzin bütanol karışımının NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisi.

## SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, benzinin içerisine hacimsel olarak %10 ve %20 oranında n-bütanol ilavesinin (%90 benzin + %10 n-bütanol ve %80 benzin+%20 n-bütanol) değişik yüklerde, buji ile ateşlemeli bir motorun performans ve emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Her bir testte ayrı ayrı FÖYT, egzoz sıcaklığı, HC, CO, CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> değerleri ölçülmüştür. Deneysel motoru olarak 1 silindirli 4 zamanlı hava ile soğutmalı 8/1 sıkıştırma oranına sahip benzinli bir motor kullanılmıştır. Deneysel %100 benzin kullanımı sonucunda elde edilen performans ve emisyon sonuçları %10 ve %20 n-bütanol karışımı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak yorumlar yapılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- FÖYT'de bütanol ilavesi ile artış gözlemlenmiştir. Maksimum FÖYT'deki artış, saf benzin kullanımına göre %20 n-bütanol karışımı ile %80 motor yükünde %18,8 olarak ölçülmüştür.
- Egzoz gazı sıcaklığı benzine yapılan n-bütanol karışımı ile artış göstermiş ve artan oran ile daha da artmıştır. Maksimum egzoz gazı sıcaklığı artışı, saf benzine göre %10 n-bütanol karışımı ile %100 motor yükünde %6 olarak ölçülmüştür.

- HC emisyonları düşük motor yükünde saf benzine göre artış gösterirken artan motor yükü ile düşüş meydana gelmiştir. Motor yükündeki artış belirli bir değere ulaştığında (~%80) HC emisyonlarında yine saf benzin kullanımına göre n-bütanol katkısında artış gözlemlenmiştir. Maksimum HC emisyonlarındaki azalma saf benzin kullanımına göre %80 motor yükünde %20 n-bütanol karışımı ile %21,4 olarak ölçülmüştür.
- CO emisyonlarında, n-bütanol katkısı ile her iki oranda (%10, %20) ve her bir motor yükünde düşüş gözlemlenmiştir. Maksimum azalma %20 n-bütanol karışımında %80 motor yükünde %20,8 olarak ölçülmüştür.
- CO<sub>2</sub> emisyonlarında n-bütanol katkısı ile her bir karışım oranında ve her bir motor yükünde artış gözlemlenmiştir. CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki maksimum artış, %20 n-bütanol karışımında, %80 motor yükünde %22,3 olarak ölçülmüştür.
- NO<sub>x</sub> emisyonlarında, her bir karışım oranında ve motor yükünde artış gözlemlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki maksimum artış, %80 motor yükünde %20 n-bütanol kullanımı karışımında %71,5 olarak ölçülmüştür.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, benzine yapılan n-bütanol katkısı ile NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak da n-bütanol ilavesi ile silindir içi sıcaklığının dolayısı ile de egzoz sıcaklıklarının artması (Şekil 5.) gösterilmektedir. Buna karşın, özellikle %20 oranında n-bütanol katkısı ile HC ve CO emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7). CO emisyonlarındaki maksimum azalma %20,8 olarak ölçülmüştür. Oksijen içerikli yakıtlarla yapılan çalışmalar ile bu durum paralellik göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, n-bütanolün fosil kaynaklı yakıt emisyonlarının azaltılmasında bir katkı maddesi olarak kullanılabilirliği ifade edilebilir. Petrol kaynaklı yakıtların kullanım oranını azaltmak ve böylece hava kalitesini korumak için emisyonların düşürülmesine olumlu katkıda bulunan bütanol gibi alternatif yakıtların saf halde veya karışım oluşturularak kullanımı teşvik edilmelidir.

## KAYNAKLAR

Alasfour, F. N., NO<sub>x</sub> Emissions From a Spark Ignition Engine Using 30% Iso-Butanol-Gazoline Blend: Part 2- Ignition Timing, *Applied Thermal Engineering*, 18 (8), 609-618, 1998a.

Alasfour, F. N., NO<sub>x</sub> Emissions From a Spark Ignition Engine Using 30% Iso-Butanol-Gazoline Blend: Part 1- Preheatin Inlet Air, *Applied Thermal Engineering*, 18 (5), 245-256, 1998b.

Akyaz, S., Benzin-Tersiyer Bütil Alkol ve Benzin Naftalin Karışımlarının Buji Ateşlemeli Motorun Performansına ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,

*Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 12-15, 36-149, 2007.*

Black, G., Curan, H. J., Pichon, S., Simmie, J. M., Zhukov, V., Bio-Butanol: Combustion Properties and Detailed Chemical Kinetic Model, *Combustion and Flame*, 157, 363-373, 2010.

Bayraktar, H., Experimental and Theoretical Investigation of Using Gasoline Ethanol Blends in Spark Ignition Engines, *Renewable Energy* 30, 1733-1747, 2005.

Çelik M. B. ve Çolak, A., Buji Ateşlemeli Bir Motorda Alternatif Yakıt Olarak Saf Etanol'un Kullanılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 23 (3), 622-625. 2008.

Çolak, A., Buji Ateşlemeli Motorlarda Farklı Sıkıştırma Oranlarında Etanol Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 48-57, 2006.

Ergeneman, M., Kutlar, O.A., Mutlu, M. ve Arslan H., Taşıtlardan Kaynaklanan Egzoz Kirleticileri, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1997.

Gümüş, M., Çift Yakıt Enjeksiyonlu Buji Ateşlemeli Bir Motorda LPG Kullanım Oranının Performans ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 265-273, 2009.

Haşimoğlu, C., Ciniviz, M., Uçar, G., Günümüzde İçten Yanmalı Motorlarda Alkol Yakıtının Kullanılması, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, ISSN 1302/6178, Konya, 2000.

<http://www.meck-chemicals.com.tr>, (02.06.2010).

<http://www.shell.com>, (02.08.2010).

[http://www.wikipedia.org/Butanol\\_fuel](http://www.wikipedia.org/Butanol_fuel), (12.08.2010).

Karabektas, M. and Hosoz, M., Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Using Isobutanol-Diesel Fuel Blends, *Renewable Energy*, 34, 1554-1559, 2009.

Kulakoğlu, T., Dizel-Metanol Karışımı Kullanılan Bir Dizel Motorda Püskürtme Basıncının Performans ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2008.

Küçükşahin, F., Dizel Motorları, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2008.

Lin, C. Y. and Li, R. J., Engine Performance and Emission Characteristics Of Marine Fish-Oil Biodiesel

Produced From The Discarded Parts of Marine Fish, *Fuel Processing Technology*, 90 883–888, 2009.

Merc Kimya Endüstri Sanayi, Güvenlik Katalogu,1-7, 2009.

Mortimer, C. E., Modern Üniversite Kimyası, Cilt-2, *Çağlayan Kitap Evi*, İstanbul, 377-387, 1992.

Özer, S., Bütanol Kullanımının Dizel Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 20-34, 50-65, 2010.

Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., Kyritsis, D. C., Effects of Butanol–Diesel Fuel Blends on The Performance and Emissions of A High-Speed DI Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 51, 1989–1997, 2010a.

Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Hountalas, D. T., Kakaras, E. C., Giakoumis, E. G., Papagiannakis, R. G., Investigation of The Performance and Emissions of Bus Engine Operating on Butanol/Diesel Fuel Blends, *Fuel*, 89 (10), 2781-2790, 2010b.

Rakopoulos C. D., Dimaratos, A. M., Giakoumis, E. G., Rakopoulos, D. C., Investigating the Emissions During Acceleration of a Turbocharged Diesel Engine Operating with Bio-Diesel or n-butanol Diesel Fuel Blends, *Energy*, 35 (12), 5173-5184, 2010c.

Sekmen, Y., Karpuz Çekirdeği ve Keten Tohumu Yağı Metil Esterlerinin Dizel Motorda Yakıt Olarak Kullanılması, *Teknoloji Dergisi*, 10 (4) 295-302, 2007.

Sharma, P. and Khara, M., Modeling of Vehicular Exhaust-A Review, *Transportation Research*, 179-198, 2001.

Sürmen, A., Karamangil M. İ., Arslan, R., Motor Termodinamiği, *Aktüel Yayınları*, İstanbul, 170-180, 2004.

Szwaja, S. and Naber J., D., Combustion of n-butanol is a Spark-Ignition IC Engine, *Fuel*, 89, 1573-1582, 2010.

Şen, Z. and Şahin, A., Future Prospects of Fosil and Alternative Energy Sources, *Proceedings of The First International Energy and Environment Symposium*, 29-31, Trabzon, 1996.

Topgöl, T., Yücesu, H. S., Çınar, C. ve Koca, A., The Effects of Ethanol-Unleaded Gasoline Blends and Ignition Timing on Performance and Exhaust Emissions, *Renewable Energy*, 31 (15) 2534-2542, 2006.

Zhang, Y. and Boehman, A. L., Oxidation of 1-Butanol and a Mixture of n-heptane/1-butanol in a Motored Engine, *Combust Flame*, 157 (10) 1816-1824, 2010.

Qureshi, N., Saha, B. C., Cotta, M. A., Butanol Production From Wheat Straw by Simultaneous Saccharification and Fermentation Using Clostridium Beijerinckii: Part II—Fed-Batch Fermentation, *Biomass and Bioenergy*, 32, 176-183, 2008.

Qureshi, N., Saha, B. C., Dien, B., Hector, R. E., Cotta, M. A., Production of Butanol (a biofuel) From Agricultural Residues: Part I—Use of Barley Straw Hydrolysate, *Biomass and Bioenergy*, 34, 559–565, 2010.