

# Biyodizel ve Karışımlarının Kullanıldığı bir Dizel Motorda Performans ve Emisyon Analizi

## Analysis of Performance and Emmissions in a Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Blends

Ahmet Necati ÖZSEZEN <sup>a,\*</sup>, ve Mustafa ÇANAKÇI <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 41380, Kocaeli

<sup>b</sup> Kocaeli Üniversitesi, Alternatif Yakıtlar Araştırma-Geliştirme ve Uygulama Birimi, 41040, Kocaeli

Geliş Tarihi/Received : 23.12.2008, Kabul Tarihi/Accepted : 28.01.2009

### ÖZET

Bu çalışmada, atık palmye yağı kökenli biyodizel ve petrol kökenli dizel yakıtı (PKDY) ile karışımlarının, bir dizel motordaki performans ve emisyon karakteristikleri üç boyutlu haritalar üzerinden analiz edilmiştir. Biyodizel ve karışımlarının performans ve emisyon karakterlerini belirlemek amacıyla, motor tam yük ve değişik devir testlerine tabi tutulmuştur. Analiz sonucunda, karışımdaki biyodizel oranı arttıkça PKDY'ya göre özgül yakıt tüketiminde artış olduğu, motorun döndürme momentinde ise azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Emisyon analizi sonucunda ise, karışımdaki biyodizel oranı ile ilişkili olarak PKDY'ya kıyasla yanmamış hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve duman koyuluğu emisyonlarında iyileşmeler olduğu, bununla birlikte karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) ve azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonlarının motor devrine göre kararlı bir yapı sergilemediği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler :** *Atık palmye yağı, Biyodizel, Dizel motor, Performans, Emisyon.*

### ABSTRACT

In this study, the performance and emission characteristics of biodiesel based waste palm oil and its blends with petroleum based diesel fuel (PBDF) was analyzed by means of three dimensional maps. In order to determine the engine performance and exhaust emission characteristics, the engine was exposed with full load and varied speed tests. In the result of analyze, it was seen that the brake specific fuel consumptions increased with the increase of biodiesel percentage in the fuel blend, but brake torque decreased depending upon biodiesel percentage in the fuel. In the result of emission analyze, it has determined that biodiesel and its blends has provided significant improvements in HC, CO and smoke opacity emissions. However, the stable behaviors in NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions of biodiesel and its blends did not seen in terms of the engine speed.

**Keywords :** *Waste palm frying oil, Biodiesel, Diesel engine, Performance, Emission.*

### 1. GİRİŞ

Oksijenli yakıtların alternatif dizel yakıtı olarak veya fosil kökenli yakıtlara karıştırılarak kullanılması, içten yanmalı motorlu araçlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını azaltmada, her zaman gündemde olan bir konu olmuştur. Aslında, ilk olarak Rudolf Diesel icat ettiği dizel motorda yakıt olarak Afrika kökenli yer fıstığı yağını kullanmasına rağmen, günümüze kadar enerji içeriği daha yüksek ve daha ucuz olan fosil kökenli yakıtlar, dizel motorlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksijenli yakıtların egzoz emisyonlarını azaltmadaki başarısı ve artan çevre

bilinci biyodizel olarak adlandırılan yağ asitlerinin dizel motorlarında kullanımını 1980'li yılların başında tekrar gündeme getirmiştir. Bitkisel yağlar bazı kritik zamanlarda (1930-1940, 1973 petrol krizi gibi) sadece acil durumlar için dizel motorlarda kullanılmıştır (Kann, 2002). Fakat bitkisel yağların PKDY'ya kıyasla viskozitelerinin ve moleküler ağırlığının daha yüksek olması, zayıf yakıt atomizasyonuna; içeriğinde gliserin bulundurması, silindir içerisinde tortulara, yapışkan maddelere, karbon birikimini neden olmaktadır. Bu durum, bitkisel yağ kullanılan motorlarda ciddi problemler oluşturmuştur. Bitkisel, hayvansal veya

\* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail adress: nozsezen@kocaeli.edu.tr (N. Özsezen)

**Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan yakıtların özellikleri.**

TS EN 14214				
Özellik	Birim	Alt Üst Sınır	Biyodizel	PKDY
Yakıtın kapalı formülü	-	-	$C_{18,08}H_{34,86}O_2$	$C_{14,16}H_{25,21}$
Ortalama molekül ağırlığı	g/mol	-	284,17	195,50
Alt ısı değer	kJ/kg	-	38730	42930
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup> , 15°C	860–900	875	840,3
Kinematik viskozite	mm <sup>2</sup> /s, 40°C	3,5–5,0	4,401	3,177
Parlama noktası	°C	120 min	70,6	61,5
Sülfatlanmış kül içeriği	% kütlesele	0,02 maks	0,0004	0,0015
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	-	+10	-14
Karbon kalıntısı	% kütlesele	0,30 maks	0,0004	0,067
Setan sayısı	-	51 min	60,4	56,5
Partikül madde	mg/kg	24 maks	9,03	4,14
Bakır şerit korozyonu	3 saat, 50°C	No.1 maks	No.1A	No.1A
Serbest gliserol	% kütlesele	0,02 maks	0,01	-
Toplam gliserol	% kütlesele	0,25 maks	0,06	-
Ester içeriği	%	96,5 min	96,5	-
İlk kaynama noktası	°C	-	331	164,7
%90 elde edilen sıcaklık	°C	-	348	351,1

**Tablo 2. Test motorunun teknik özellikleri.**

Motor	1,8 VD Dizel
Yanma Odası Şekli	Ön Yanma Odalı
Tipi	4 zamanlı, su soğutmalı
Silindir Sayısı	4
Silindir Çap/Strok	80,26 / 88,9 mm
Sıkıştırma Oranı	21,47: 1
Püskürtme Pompası	Mekanik distribütör pompa
Püskürtme basıncı	130 bar
Enjektör Delik Çapı	0,2 mm
Maksimum Güç	38,8 kW (4250 d/d)
Azami Moment	105,5 Nm (2400 d/d)

**Tablo 3. Egzoz emisyon cihazları ve hata oranları.**

Ölçüm ekipmanları ve teknolojileri	Emisyon	Hata
Kane-May Quintox KM9106 (Elektrokimyasal)	NO <sub>x</sub>	±5 ppm < 100ppm ±% 5 > 100ppm
	CO	% 0,001 (hacimsel)
Bilsa MOD 500 (Infra-red)	CO <sub>2</sub>	% 0,01 (hacimsel)
	HC	1 ppm
Bosch RTM 430 (Bosch teknolojisi)	Duman koyuluğu	% 0,1 koyuluk derecesi

atık bitkisel yağların dizel motorunda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi için PKDY'a yakın özelliklere sahip bir yakıtla dönüştürülmesi gerekmektedir (Çanakçı ve Özsezen, 2005). İlk olarak, 1938 yılında Walton yayınladığı çalışmada, yağdaki mono-di-tri-gliseridlerin ayrıştırılması sonucunda elde edilen yağ asitlerinin yakıt olarak kullanılmasını önermiştir (Graboski v.d., 1998). Zaman içerisinde yapılan deneysel çalışmalar ile bitkisel yağ esterlerinin (biyodizel) dizel motorlarda uzun süreli olarak kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüştür (Çanakçı ve Van Gerpen., 2003).

Biyodizelin özellikleri kullanılan yağ kaynağına ve üretiminde kullanılan alkol tipine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum her biyodizel için farklı tutuşma, yanma ve emisyon değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Genel olarak, biyodizelin oksijen içeriği; yanma bölgelerinde gerekli oksijeni sağlayarak, HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Özellikle PKDY'nın aromatik bileşikler ve kükürt içermesi, is ve partikül emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Birçok araştırmacı (Asaumi v.d., 1992; Betts v.d., 1992; Rosenthal v.d., 1993; Xiao v.d., 2000;) 2 numaralı dizel yakıtına eklenen

aromatiklerin yüzdesi ile orantılı olarak partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Biyodizelin hemen hemen hiç aromatik ve sülfür bileşiği içermemesi poliaromatik hidrokarbon (PAH) ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Literatürde genel eğilim biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile HC, CO ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlanır iken  $NO_x$  emisyonlarında % 5-20 oranında bir artış olduğu yönündedir (Özsezen v.d., 2008; Çanakçı ve Van Gerpen., 2003; Dorado v.d., 2003; Schumacher v.d., 2001; Gomez v.d., 2000; Senatora v.d., 2000; Sharp v.d., 2000; Clark v.d., 1999; Scholl v.d., 1993). Bununla birlikte bazı çalışmalarda (Peterson v.d., 1996; McDonald v.d., 1995) biyodizel kullanımı ile  $NO_x$  emisyonunda bir değişim olmadığı veya 2 numaralı dizel yakıtına göre daha düşük olduğu raporlanmıştır. Bazı araştırmacılar da biyodizel kullanımı ile  $NO_x$  emisyonundaki artışa sebep olarak, biyodizelin yakıt özelliklerini göstermişlerdir. Signer v.d., (1996), yakıtın yoğunluğundaki % 3,5'lük artışın  $NO_x$  emisyonunda % 3-4 oranında artışa sebep olduğunu ifade etmiştir. Peterson v.d., (2000), biyodizelin yapısındaki çift bağlı yağ asitleri ile ilişki olarak  $NO_x$  emisyonlarında değişim gözlemlenmişler ve iyot sayısını 7,88'den 129,5 çıkardıklarında  $NO_x$  emisyonlarında % 29,3 artış tespit etmişlerdir. McCormick v.d. (2003) yaptıkları çalışmada da Peterson ve arkadaşlarını, destekleyecek nitelikte bulgular görmüşlerdir.

Ön yanma odalı (endirekt püskürtmeli) (EDP) dizel motorların, iki temel özelliği; yakıt kalitesine bağımlı olmaması ve karışım oluşumu bakımından direkt püskürtmeli (DP) motorlara kıyasla daha homojen bir yapı sergilemesidir. Bu özellikler dikkate alınarak, bu çalışmada test motoru olarak ön yanma odalı bir dizel motor kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, atık palmiye yağından üretilen biyodizel ve karışımlarını, ön yanma odalı dizel motordaki performans ve emisyon karakterlerini, üç boyutlu haritalar üzerinden analiz etmektir.

## **2. MATERYAL VE METOT**

Testlerde kullanılan palmiye kökenli atık kızartma yağı, Kocaeli Uzay Gıda (Frito-Lay) Cips Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Atık Palmiye yağından ester elde edilme işlemi, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yakıt Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Özsezen ve Çanakçı, 2008). PKDY ise ticari bir firmadan satın alınmıştır. Biyodizel ve PKDY'nin yakıt özellikleri TÜBITAK-MAM Enerji Enstitüsü tarafından tespit edilmiştir. Tablo 1'de testlerde kullanılan biyodizel ve PKDY'nin özellikleri ile birlikte, TS EN 14214 standart değerleri verilmektedir.

Deneyler BMC marka ön yanma odalı bir dizel motorda gerçekleştirilmiştir. Test motorunun teknik özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

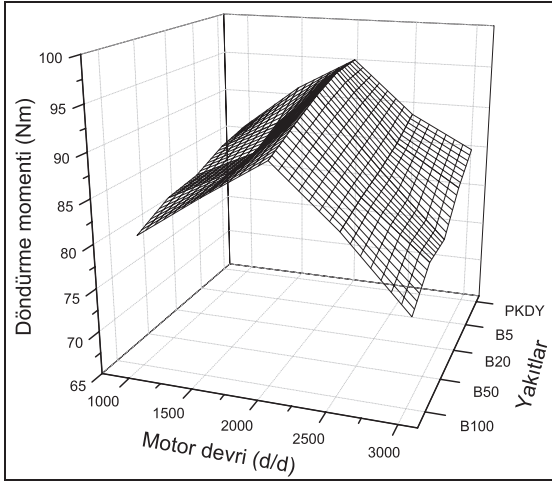
Test sisteminde, motorun yüklenmesi için hidrolik dinamometre, yüklenme anındaki değerleri okuyabilmek için, 1 gr hassasiyetinde, 0-200 kg aralığında ölçüm yapabilen, dijital göstergeli yük hücresi kullanılmıştır. Yakıt tüketimi, 1 gr hassasiyetinde, 0-20 kg aralığında ölçüm yapabilen, dijital terazi ve süreölçer kullanılarak tespit edilmiştir. Motor devri, manyetik devir algılayıcısı vasıtasıyla ölçülmüştür. Test sisteminde, hava tüketimini ölçmek için, emme manifoldu hattına ISO 5167 (1980) standardına uygun, orifis çapı 45 mm olan, flanşlı-keskin köşeli tip orifis plakası yerleştirilmiştir. Orifis plakasının giriş ve çıkış basınç farkını ölçmek için 0,1 mmH<sub>2</sub>O hassasiyetinde, 0-70 mmH<sub>2</sub>O çalışma aralığında ölçüm yapabilen eğik manometre kullanılmıştır. Test sisteminde, 1 °C hassasiyetli, K-tipi termokapullar kullanarak beş farklı noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Dijital sıcaklık algılayıcıları ile ölçülen sıcaklıklar; motor yağı, egzoz, yakıt, radyatör giriş ve çıkış sıcaklığıdır. Bağıl nem ve ortam sıcaklığını ölçmek için bir higrometre, ortam basıncını ölçmek için analog göstergeli barometre kullanılmıştır. Egzoz emisyon ölçümlerinde kullanılan cihazlar Tablo 3'de verilmektedir.

Hem PKDY hem de biyodizel (B100) deneyleri için motorda herhangi bir ayar veya değişiklik yapılmamıştır. Tüm testler motor kararlı hale geldikten sonra gerçekleştirilmiştir. Motorun egzoz sıcaklığı kararlı hale ulaştıktan sonra, B100, B50, B20, B5 ve PKDY kullanılarak, 500 d/d aralıklar ile 1000 d/d'dan başlayarak 3000 d/d'ya kadar tam yükte, performans ve emisyon değerleri ölçülmüştür. Bu çalışmada, B5; hacimsel olarak % 5 biyodizel + % 95 PKDY, B20; % 20 biyodizel + % 80 PKDY, B50; % 50 biyodizel + % 50 PKDY karışımını göstermektedir.

## **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

### **3. 1. Performans Analizi**

İçten yanmalı motorlarda genelde döndürme momenti ve özgül yakıt tüketimi verileri kullanılarak performans analizi yapılmaktadır. Şekil 1'de değişik devirlerde döndürme momentinin yakıt türüne göre değişimi gösterilmektedir. Şekil 1 incelendiğinde, karışımdaki biyodizel yüzdesi arttıkça motorun döndürme momentinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20, B5, kullanımı ile PKDY'a göre döndürme momentinde, sırasıyla % 7,2, % 5,6, % 4,3, % 2 azalma olmuştur. Maksimum döndürme momenti 2000 d/d'da, PKDY için 95,2 Nm, B5 için 94,9 Nm, B20 için 93,6 Nm, B50 için 91,8 Nm, B100 için 89,9 Nm olarak ölçülmüştür.



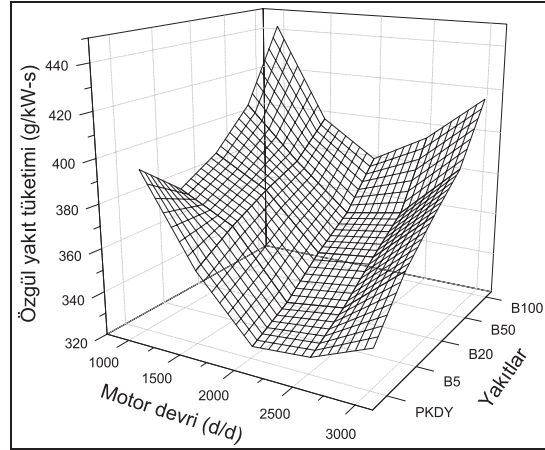
**Şekil 1. Döndürme momentinin motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.**

Şekil 2'de değişik devirlerde, özgül yakıt tüketiminin motor devri ve yakıt türüne göre değişimi gösterilmektedir. Maksimum döndürme momentinin üretildiği 2000 d/d'da, tüm yakıtlar için minimum özgül yakıt tüketimi ölçülmüştür. Bu durum, özgül yakıt tüketiminin, döndürme momenti ile ters orantılı olmasından kaynaklanmaktadır.

2000 d/d'daki motor testinde özgül yakıt tüketimi, PKDY için 325,50, B5 için 334,70, B20 için 348,81, B50 için 360,13, B100 için 380,36 g/kW-saat olarak hesaplanmıştır. Biyodizelin özgül yakıt tüketimi, tüm motor devirlerinde PKDY'ya göre daha yüksek çıkmıştır. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5'in özgül yakıt tüketimi, sırasıyla % 16,8, % 9,4, % 5,8, % 2,2 PKDY'ya kıyasla daha fazladır. Ortalama değerlere bakıldığında, biyodizelin karışım içerisindeki yüzdesi ile ilişkili olarak özgül yakıt tüketiminde artış olduğu görülmektedir. Biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasının temel nedeni olarak, biyodizelin enerji içeriğinin PKDY'ya göre % 9,6 daha düşük olması (bkz. Tablo 1) gösterilebilir.

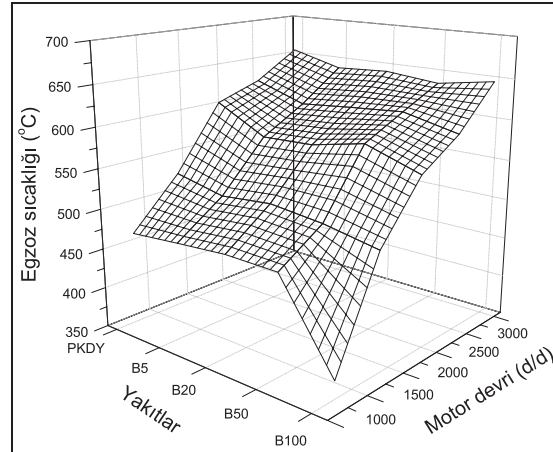
Ayrıca, biyodizelin yoğunluğunun PKDY'ya göre daha yüksek olması, hacimsel olarak püskürtülen yakıt miktarının kütleli olarak daha fazla çıkmasına neden olmaktadır. Yapılan testlerde tüm yakıtlar için maksimum yakıt tüketimi, 1000 d/d'da ortaya çıkmıştır. Düşük motor hızlarında döngüsel hava hareketlerinin yavaş olmasından dolayı hava-yakıt karışım reaksiyon hızı yavaşlamaktadır. Bu yüzden, PKDY'ya göre yüksek kaynama noktasına sahip olan biyodizel, 1000 d/d'da maksimum özgül yakıt tüketimi (442,24 g/kW-saat) göstermiştir.

Egzoz gaz sıcaklığı, test edilen yakıtların yanma periyodundaki sıcaklıklarının bir göstergesi olduğundan, emisyon değerlerinin analiz edilmesinde önemli bir parametredir. Şekil 3'de, egzoz sıcaklığının motor devri ve yakıt türü ile değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 2. Özgül yakıt tüketiminin motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.**

Testlerde maksimum egzoz sıcaklığı 3000 d/d'da, PKDY için 655,9 °C, B5 için 635,8 °C, B20 için 642,7 °C, B50 için 638,7 °C, B100 için 646,6 °C olarak ölçülmüştür. Şekil 3'de görüldüğü gibi, B100'ün 1000 d/d'daki ölçüm değeri hariç egzoz sıcaklıkları arasında önemli bir fark yoktur. 1000 d/d'da B100 kullanımı sırasında maksimum yakıt tüketimi gerçekleştiğinden, yakıt buharlaşmasının egzoz supabının açılma zamanına kadar sürdüğü tahmin edilmektedir. Biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile egzoz sıcaklığının düşmesinde diğer önemli etken, yakıtların farklı maksimum yük değerlerine sahip olmasıdır (bkz. Şekil 1).

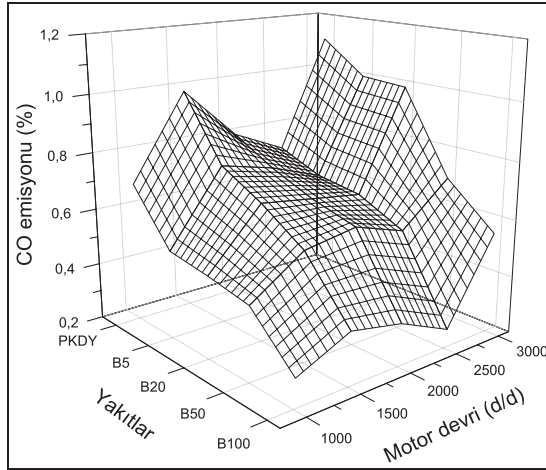


**Şekil 3. Egzoz sıcaklığının motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.**

### 3. 2. Emisyon Analizi

CO emisyonu motorda kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade ettiği için önemli bir parametredir. Ayrıca, CO sınırlaması emisyon standartlarının temel parametrelerindedir. Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni hava-yakıt oranının düşük olmasıdır (Abdel-Rahman, 1998). Yakıt özellikleri, püskürtme karakteristikleri, motor yükü, hava-yakıt oranını önemli derecede etkilediğinden, CO oluşumu bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Şekil 4'de, CO emisyonunun motor devri ve yakıt türüne göre değişimi gösterilmektedir.

Şekil 4 incelendiğinde, PKDY'den B100 kullanımına doğru gidildikçe CO emisyonunda azalma olduğu dikkati çekmektedir. Tüm devirlerde B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla elde edilen CO emisyonu, PKDY kullanımına göre azalma göstermiştir. Bu durum, biyodizel ve karışımlarının özgül yakıt tüketiminin PKDY'ya oranla daha yüksek olmasına rağmen gerçekleşmiştir. Biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile CO emisyonundaki azalmanın temel nedeni biyodizelin içeriğindeki oksijendir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi ile ilişkili olarak CO emisyonunda azalma olması biyodizel kullanımı ile silindir içerisindeki hava-yakıt reaksiyonlarının arttığını göstermektedir. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile ölçülen CO emisyonunda PKDY'ya göre sırasıyla % 56,8, % 32,7, % 20,2 ve % 15,4 azalma meydana gelmiştir. Tüm yakıtlar için maksimum CO emisyonu 3000 d/d'da ölçülmüştür. Motor devri yükseldikçe volumetrik verim azaldığından, silindir içerisinde artık egzoz gazı yüzdesi artmaktadır. Dizel motorlar hava fazlalığı ile çalışan motorlar olduğundan, en düşük ve en yüksek motor devirleri haricinde CO emisyonu yataya yakın bir eğri sergilemiştir. 1500 d/d'daki test şartlarında, tüm yakıtlar için hava-yakıt oranı, 1000, 2000, 2500 d/d'da yapılan testlere nazaran daha düşük olduğu için, bu devirde hafifçe CO oluşumunda artış ortaya çıkmıştır. Tablo 4'de motor devrine göre hava-yakıt oranlarının değişimi verilmektedir.



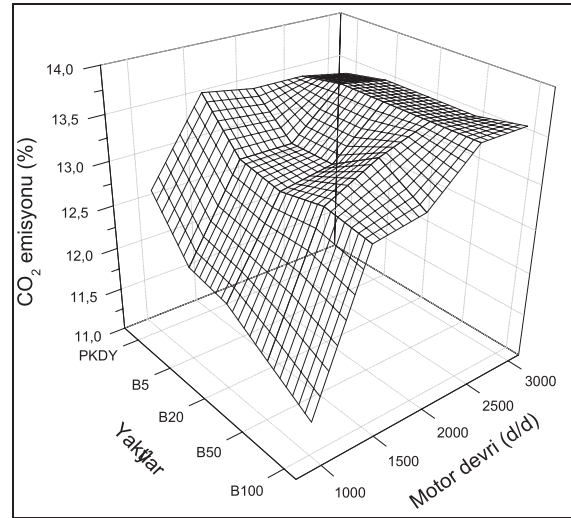
Şekil 4. CO emisyonun motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.

Bugün dünyanın en önemli çevre sorunu olan küresel ısınmada temel etkenlerden biri, artan CO<sub>2</sub> emisyonunun atmosferde sera etkisi göstermesidir. Agarwal ve Das (2001), Körbitz (1999), Peterson ve Hustrulid (1998) gibi araştırmacılar, biyodizel kullanımı ile atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonunun fotosentez çevrimine katıldığını düşünmektedirler. Egzoz ürünleri arasında bulunan CO<sub>2</sub> tam yanmayı ifade ettiği içinde önemli bir parametredir. Şekil 5'de, karbon dioksit yüzdesinin motor devri ve yakıt türü ile değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4. Motor devrine göre hava-yakıt oranları.

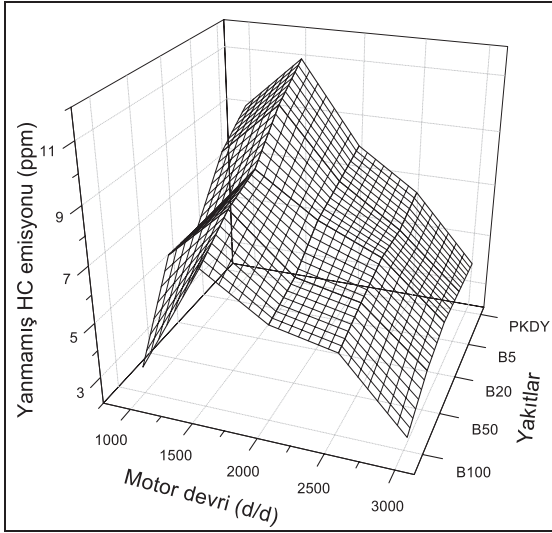
	Motor devri d/d				
	1000	1500	2000	2500	3000
PKDY	15,31	14,17	15,31	15,18	14,65
B100	15,99	13,45	14,06	13,62	12,82
B50	15,94	14,05	14,29	14,27	13,03
B20	16,91	13,94	14,61	15,43	13,74
B5	16,48	14,02	15,01	15,42	14,04

Şekil 5'de görüldüğü üzere PKDY'dan B100 kullanımına doğru gidildikçe CO<sub>2</sub> emisyonunda 1000, 1500, 2000 d/d'da azalma olurken 2500 ve 3000 d/d'da artış gözlemlenmiştir. Saf biyodizel kullanımı ile 1000, 1500, 2000 d/d'da PKDY'ya oranla sırasıyla % 10,2, % 4,4 ve % 3 azalma görülürken, 2500, 3000 d/d'da ise sırasıyla % 0,7, % 1,5 artış olmuştur. Motor devri arttıkça volumetrik verim azaldığından PKDY'nın tam yanma eğilimi azalmıştır (bkz. Tablo 4). Bununla birlikte, motor devri arttıkça, biyodizelin içeriğindeki oksijeninin silindir içerisindeki oksijen-yakıt reaksiyonlarına önemli derecede katkı sağladığı düşünülmüştür. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonunda PKDY'ya oranla sırasıyla % 3, % 2,1, % 2,3 ve % 2 azalma gözlenmiştir.



Şekil 5. CO<sub>2</sub> yüzdesinin motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.

CO emisyonun da olduğu gibi egzoz gazları arasında yanmamış HC emisyonlarının bulunması kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi ifade etmektedir (Heywood, 1988). Şekil 6'da yanmamış HC emisyonun, motor devri ve yakıt türüne göre değişimi gösterilmektedir.



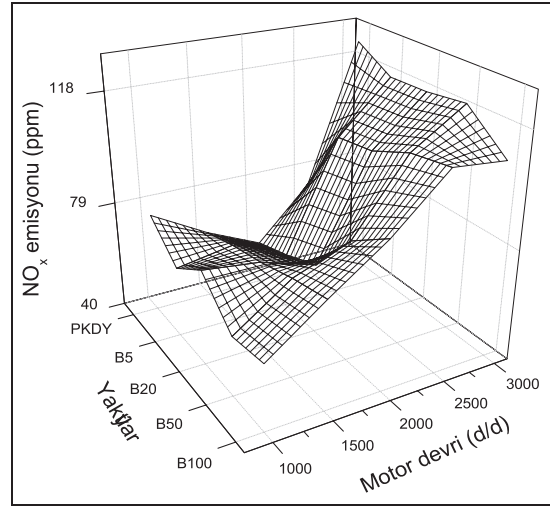
**Şekil 6. HC emisyonun, motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.**

Yanma ürünleri arasında yanmamış HC'lerin bulunmasının nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi veya ortamda oksijenin yetersiz olmasından dolayı yakıtın okside olamaması veya yarı oksitlenmesidir (Challen ve Baranescu, 1999).

Tam yük şartlarında, tüm devirlerde biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla elde edilen yanmamış HC emisyonu PKDY'ya göre daha düşük seviyededir. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile HC emisyonunda PKDY'ya kıyasla sırasıyla % 40,3, % 24,7, % 18,2 ve % 7,8 azalma olmuştur. Oranlardan anlaşıldığı üzere, yanmamış HC emisyonu karışımdaki biyodizel yüzdesi arttıkça azalmıştır. Biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile yanmamış HC emisyonundaki azalmanın temel nedeni olarak, biyodizelin içeriğinde bulunan oksijenin zengin yakıt-hava karışım bölgelerinde yeterli oksitlenmeyi sağlaması gösterilebilir. Düşük motor hızlarında tüm yakıtların yüksek seviyede yanmamış HC emisyonu üretmesi, bu hızlarda özgül yakıt tüketiminin maksimum seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 4'de görüldüğü üzere 1500 d/d'da tüm yakıtlar için hava-yakıt oranı düşmüştür. Bu durum, 1500 d/d'da tüm yakıtlar için yanmamış HC emisyonunun maksimum düzeyde oluşmasına neden olmuştur. Artan motor hızı ile birlikte tüm yakıtlar için HC emisyonunda bir azalma olmuştur. Devir arttıkça; hava hareketleri (türbülans), silindir basıncı ve sıcaklığı da artmaktadır. Bu etkenler yüksek devirlere gidildikçe HC'lerin tam veya kısmi oksitlenmesini artırdığından, yanmamış HC emisyonlarında bir azalma meydana gelmiştir. Dizel motorlarda yanma odasının tipi ve şekli emisyon miktarını önemli derecede etkilemektedir. EDP dizel motorların, DP dizel motorlara nazaran daha az yanmamış HC emisyonu ürettiği bilinmektedir (Abdel-Rahman, 1998). Bu çalışmada da görülmüştür ki, hem PKDY hem de biyodizel kullanımı sırasında üretilen yanmamış HC emisyonu oldukça

çalışma düşük seviyededir. Ayrıca test yapılan dizel motorun sıkıştırma oranının yüksek olması (bkz. Tablo 2), egzoz sıcaklıklarının 500-650 °C arasında çıkmasına neden olmuştur. Bu nedenle silindir içerisindeki yanmamış hidrokarbonların egzoz çıkışına doğru oksidasyona uğradığı da düşünülebilir.

Yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Atmosferdeki nemin  $NO_x$  emisyonlarını azaltıcı yönde bir etkisi olduğu bilinmektedir. Bu yüzden SAE (2001) tarafından tanımlanan nem düzeltme faktörü kullanılarak gerçek  $NO_x$  değerleri hesaplanmıştır. Tam yük ve değişik devirlerde düzeltme faktörü ile çarpılarak elde edilen azot oksitlerin değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir.

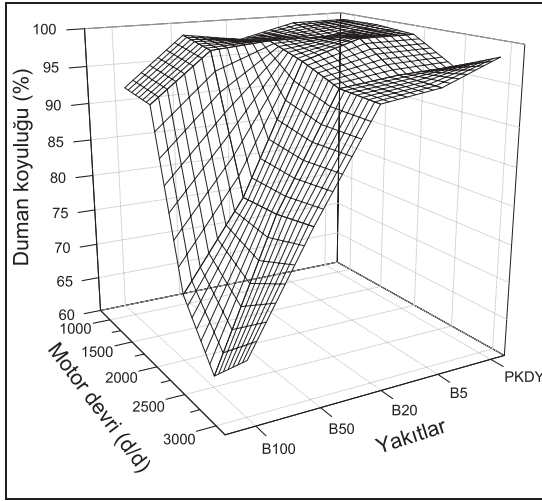


**Şekil 7.  $NO_x$  emisyonun motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.**

Şekil 7 incelendiğinde, genel olarak tüm yakıtlar için motor devri arttıkça  $NO_x$  emisyonunda artış olduğu dikkati çekmektedir. Bununla birlikte, her bir motor devri için inceleme yapıldığında, biyodizel kullanımı ile HC ve CO emisyonunun oluşumunda PKDY'ya oranla her devirde azalma olurken, her devirde  $NO_x$  emisyon oluşumu daha kompleks bir yapı sergilemiştir. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımıyla ölçülen  $NO_x$  emisyonunda PKDY'ya göre sırasıyla % 14,7, % 13,2, % 8,9 ve % 3,8 artış gözlemlenmiştir. Biyodizelin özgül yakıt tüketiminin PKDY'ya göre daha fazla olması ve içeriğindeki oksijenin yakıtta zengin bölgelerde gerekli oksitlenmeyi sağlaması, yanma bölgelerinin sayısını artırmıştır. Böylece, yüksek ortam sıcaklığının elde edildiği bölge sayısı artmış ve daha yüksek azot oksit oluşumu meydana gelmiştir.

Oksijenin yetersiz olduğu yanma bölgelerinde uzun zincirli HC moleküllerin termal olarak kırılması sonucu partikül ve is (duman koyuluğu) emisyonları oluşmaktadır (Schmidt ve Van Gerpen, 1996). Biyodizelin moleküler yapısında oksijen içeriği duman koyuluğunu etkileyen en önemli faktördür. Duman koyu-

luğunun motor yükü ve yakıt türü ile değişimi Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Duman koyuluğunun motor devri ve yakıt türüne göre değişimi.

Şekil 8 incelendiğinde, PKDY'den B100 kullanımına gidildikçe duman koyuluğu değerlerinde özellikle yüksek devirlerde önemli azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Bir dizel motorun ömrü boyunca 1500 ile 3000 devir arasında çalıştığı düşünülecek olursa, biyodizel kullanımı ile duman koyuluğundaki bu düşüşün ekolojik denge için oldukça önemli olduğu görülmektedir. Tüm motor devirlerinin ortalaması alındığında, B100, B50, B20 ve B5 kullanımı ile duman koyuluğunda PKDY'ye göre sırasıyla % 22,5, % 11, % 2,2 ve % 0,9 azalma olmuştur. 1000 ve 1500 d/d'da tüm yakıtların özgül yakıt tüketiminin fazla olması ve silindir içerisindeki döngüsel hava hareketlerinin yavaş olması duman koyuluğunun yüksek seviyeye çıkmasına neden olmuştur. Her iki yakıt kullanımında da duman koyuluğunun, en düşük ve en yüksek devirlerde maksimum seviyeye çıkmasındaki en önemli etken, test edilen motorun turboşarj gibi ek hava sirkülasyonunu sağlayacak teknolojiye sahip olmamasıdır. Motor devri arttıkça PKDY, B5 ve B20'nin duman koyuluğunda hafif bir azalma gözlenirken, B100 ve

B50'nin duman koyuluğu önemli oranda azalmıştır. Bu durumun temel nedeni, biyodizelin oksijen içeriğinin yanma bölgelerinde gerekli oksijeni sağlayarak silindir içerisindeki oksitlenme miktarını artırmasıdır. Ayrıca, biyodizelin hemen hemen hiç aromatik bileşik içermemesi partikül ve is emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Günümüzde tartışılan bir konuda olsa, PKDY'nin aromatik bileşikler içermesi is ve partikül emisyonlarının oluşmasına neden olduğu düşünülmüştür.

#### 4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, atık palmiye yağından üretilen biyodizel ve PKDY ile karışımları, aynı devir ve tam yük şartlarında ön yanma odalı bir dizel motorda test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile motor performansında hafif bir düşme meydana geldiği görülmüştür. Karışım içerisinde biyodizelin artan yüzdesi ile ilişkili olarak döndürme momentinde azalma olduğu, özgül yakıt tüketiminde ise artış olduğu tespit edilmiştir. Yine, karışımdaki biyodizelin yüzdesi ile ilişkili olarak CO, yanmamış HC ve duman koyuluğu emisyonlarında, PKDY oranla azalma meydana gelir iken, aynı ilişki CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyon oluşumlarında görülememiştir. Aslında, teorik olarak (kimyasal denge açısından) beklenen aynı ilişkinin CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonları içinde geçerli olmasıdır. Emisyonlarda meydana gelen kararsızlıkların biyodizelin motor testlerinin tam yük şartlarında yapılmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, performans karakterlerinin görülebilmesi açısından testlerin tam yük şartlarında yapılması önemlidir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2003/79 ve 2004/24 numaralı projelerle desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, A.A. 1998. On the emissions from internal-combustion engines: A Review", International Journal of Energy Research. (22), 483-513.
- Agarwal, A.K., Das, L.M. 2001. Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines, J. Eng. Gas Turbines Power. 123 (2), 440-447.
- Asaumi, Y., Shintani, M., Watanabe, Y. 1992. Effects of fuel properties on diesel engine exhaust emission characteristics, SAE Tech. Paper, No. 922214.
- Betts, W.E., Floydsand, S.A., Kvinge, F. 1992. The influence of diesel fuel properties on particulate emissions in european cars, SAE Tech. Paper, No. 922190.
- Çanakçı, M., Özsezen, A.N. 2005. Evaluating waste cooking oils as alternative diesel fuel. G.U. Journal of Sci. 18 (1), 81-91.
- Çanakçı, M., Van Gerpen, J.H. 2003. Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil bi-

- odiesel, Transactions of the ASAE. 46 (4), 937-944.
- Challen, B., Baranescu, R. 1999. Diesel Engine Reference Book, Second Edition. s. 79-120 Butterworth Heinemann.
- Clark, N.N., Lyons, D.W. 1999. Class 8 truck emissions testing: Effects of test cycles and data on biodiesel operation, Transactions of the ASAE. (42), 1211-1220.
- Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., Gimenez Lopez, F.J. 2003. Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil, Fuel. 82 (11), 1311-1315.
- Gomez Gonzales, M.E., Howard-Hildige, R., Leahy, J.J., O'Reilly, T.O., Supple, B., Malone, M. 2000. Emission and performance characteristics of a 2 liter toyota van operating on esterified waste cooking oil and mineral diesel fuel, Environmental Monitoring and Assessment. (65), 13-20.
- Graboski, M.S., McCormick, R.L. 1998. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines, Prog. Energy Combust. Sci. (24), 125-164.
- Heywood, J.B., 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals, 491-558 s. McGraw-Hill, New York, USA.
- Kann, J., Rang, H., Kriis, J. 2002. Advances in biodiesel fuel research, Proc. of the Estonian Academy of Sci., Chemistry. 51 (2), 75-117.
- Körbitz W. 1999. Biodiesel production in Europe and North American, an encouraging prospect, Renewable Energy. 16 (1-4), 1078-1083.
- McCormick, R.L., Alvarez, J.R., Graboski, M.S. 2003. NO<sub>x</sub> solutions for biodiesel, Report No. NREL/SR-510-31465, NREL.
- McDonald, J.F., Purcell, D.L. McClure, B.T., Kittelson, D.B. 1995. Emissions characteristics of soy methyl ester fuels in an idi compression ignition engine, SAE Tech. Paper, No. 950400.
- Özsezen, A.N., Çanakçı, M. 2008. Atık Kızartma Yağından Elde Edilen Metil Esterin Ön Yanma Odalı Bir Dizel Motorda Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 23 (2), 395-404.
- Özsezen, A.N., Canakçı, M., Türkcan, A., Sayın, C. 2008. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters, Fuel. 88 (4), 629-636.
- Peterson, C.L., Hustrulid, T. 1998. Carbon cycle for rapeseed oil biodiesel fuels, Biomass and Bioenergy. (14), 91-101.
- Peterson, C.L., Reece, D.L., Thompson, J.C., Beck, S.M., Chase, C. 1996. Ethyl ester of rapeseed used as a biodiesel fuel-a case study, Biomass and Bioenergy. 10 (5-6), 331-336.
- Peterson, C.L., Taberski, J.S., Thompson, J.C., Chase, C.L. 2000. The effect of biodiesel feedstock on regulated emissions in chassis dynamometer tests of a pickup truck, Trans. of the ASAE. (43), 1371-1381.
- Rosenthal, M.L., Bendinsky, T. 1993. The effects of fuel properties and chemistry on the emissions and heat release of low-emission heavy duty diesel engines, SAE Tech. Paper, No. 932800. SAE Handbook, 2001. Society of Automotive Engineers, Vol. 1, 1304-1306 s. Inc., Warrendale, MI.
- Schmidt, K., Van Gerpen, J.H. 1996. The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions, SAE Tech. Paper, No. 961086.
- Scholl, K.W., Sorenson, S.C. 1993. Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine, SAE Tech Paper, No. 930934.
- Schumacher, L.G., Marshall, W., Krahl, J., Wetherell, W.B., Grabowski, M.S. 2001. Biodiesel emissions data from Series 60 DDC engines, Trans. of the ASAE. 44 (6), 1465-1468.
- Senatore, A., Cardone, M., Rocco, V., Prati, M.V. 2000. A comparative analysis of combustion process in DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel, SAE Tech. Paper, No. 2000-01-0691.
- Sharp, C.A., Howell, S., Jobe, J. 2000. The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines - Part I: Regulated emissions and performance, SAE Tech. Paper, No. 2000-01-1967.
- Signer, M., Heinze, P., Mercogliano, R., Stein, H.J. 1996. European program on emissions, fuels and engine technologies (epefe) heavy duty diesel study, SAE Tech. Paper, No. 961074.
- Xiao, Z., Ladommatos, N., Zhao, H. 2000. The effect of aromatic hydrocarbons and oxygenates on diesel engine emissions, Proc. of the Ins. of Mech. Eng., Part D 214, 307-332.



# Biyogaz Üretiminde Basıncın Etkisi

## Effect of Pressure on Biogas Production

Ahmet ERYAŞAR ve Günnur KOÇAR\*

Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Biyokütle Enerjisi Araştırma Grubu, 35100, İzmir

Geliş Tarihi/Received : 15.10.2008, Kabul Tarihi / Accepted : 25.02.2009

### ÖZET

Biyogaz sistemlerinin kurulu olduğu tesislerde, biyogazın üretimi ve tüketimi eş zamanlı gerçekleşmektedir. Bu yüzden tüketimin olmadığı zamanlarda üretilen biyogazın depolanması gerekmektedir. Kırsal kesime yönelik uygulamalarda genellikle 1-1,5 kPa değerlerine sahip, düşük basınçlı gazometreler tercih edilmekte, gerektiğinde sisteme basınçlandırıcı ilave edilmektedir. Gaz iletiminin ve kullanımının gerektirdiği basınç, ek bir basınçlandırıcı kullanılmadan biyogaz üretimi sonucunda doğal yollarla sağlandığında, reaktör içerisinde nispeten yüksek bir basınç ortamı söz konusu olmaktadır. Bu çalışmada, farklı düşük basınçların, sığır atığının anaerobik fermentasyonu üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. 19,6 kPa, 9,5 kPa ve 1,5 kPa basınçlarda, 1 lt hacimli kesikli beslemeli tip, üç paralelli, dokuz adet reaktörle yürütülen fermentasyon denemesi, 35 °C'de 60 gün devam etmiştir. Elde edilen deneysel veriler  $P < 0,05$  anlamlılık düzeyinde LSD testine tabi tutulmuş, metan üretim miktarı bakımından, farklı basınçlarda çalıştırılan reaktörler arasında anlamlı bir farklılık olmadığı gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler :** *Biyogaz, Biyogaz depolama sistemleri, Gazometre, Basınç etkisi.*

### ABSTRACT

In facilities in which biogas systems are installed biogas is not produced and consumed simultaneously. Therefore, biogas produced when there is no consumption should be stored. Low pressure gasometers with 1- 1,5 kPa value are preferred in the rural area and when needed pressurizer is added to the system. When the pressure which gas production and usage require is provided by natural ways without usage of an added pressurizer, a respectively high pressure atmosphere can be seen. In this study, the effects of different low pressures on anaerobic fermentation of cattle manure were experimentally analyzed. Fermentation experiment which was carried out with 9 reactors with fed-batch type, 3 parallels in pressures of 19.6 kPa, 9.5 kPa and 1.5 kPa continued 60 days at 35 °C. The acquired experimental data was subjected to LSD test in  $P < 0.05$  significance level and it was observed that there is no significant difference between reactors operated with different pressures in terms of methane production.

**Keywords :** *Biogas, Biogas storage systems, Gasometer, Effect of pressure.*

### 1. GİRİŞ

Organik maddelerin anaerobik fermentasyonu sonucunda oluşan biyogaz, içerdiği  $CH_4$  nedeniyle ısı değeri yüksek, yanıcı bir gazdır. Mekan ısıtma, sıcak su hazırlama, pişirme, aydınlatma, mekanik iş ve elektrik üretimi gibi LPG ve doğal gazın kullanıldığı tüm uygulamalarda biyogaz kullanılabilir. Biyogaz üretimi, belirli ve sabit fermentasyon şartlarında süreklilik göstermektedir. Oysa özellikle orta ve küçük ölçekli biyogaz tesislerinin bulunduğu kırsal bölgelerde, biyogazın

kullanım miktarı gün içinde ve mevsimsel olarak önemli miktarlarda değişmektedir. Biyogazın sadece sıcak su hazırlama, ısıtma ve pişirme amaçlı kullanıldığı küçük ölçekli tesislerde, gece boyunca üretilen biyogazın depolanması gerekmektedir (Datong, 1989). Elektrik üretiminin gerçekleştirildiği tesislerde de, meydana gelecek pik yükleri karşılayabilmek için, tüketimin en az olduğu zaman dilimlerinde üretilen biyogazın depolanması sistem tasarımında göz önüne alınmalıdır (Anon., 2000a). Uygulamalardan elde edilen deneyimler,

\* Yazışılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail adress: gunnur.kocar@ege.edu.tr (G. Kocar)

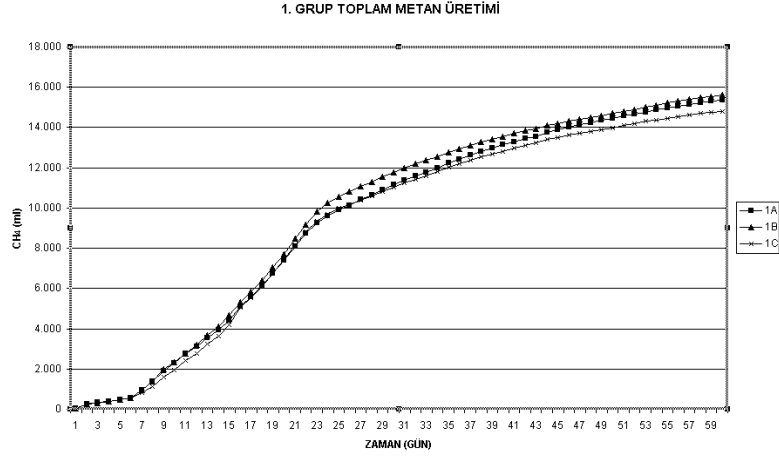
küçük ve orta ölçekli biyogaz tesislerinde gaz depolama sistemlerinin, günlük üretilen biyogazın % 40-60'ını depolayabilecek hacimde olması gerektiğini göstermektedir (Vijayalekshmy, 1985; Sasse, 1988; Werner v.d., 1989; Marchaim, 1992; Anon., 1999). Literatürde genellikle gaz depo hacminin, üretilen günlük biyogaz miktarı veya yarısı kadar olması gerektiği belirtilmektedir (Wase ve Forster, 1984; Tiwari v.d., 1996).

Sabit kubbeli biyogaz reaktörlerinde, ayrı bir gaz depolama tankı kullanılmadığı durumlarda, reaktörün üst kısmı gaz depolama amacıyla kullanılmaktadır. Bu hacim genellikle reaktör hacminin 1/5 - 1/8'i olarak projelendirilir (Werner v.d., 1989). Boşaltma ağız ile reaktördeki fermente malzeme seviyesi arasında oluşan hidrolik basınç, biyogazın kullanımı için gerekli basınçlandırmayı sağlar. Bu basınç gaz kullanımının oranına göre değişkenlik göstermektedir. Hareketli kubbeli biyogaz reaktörlerinde ise gaz depolama tankı reaktörün üst kısmına entegre edilmiştir. Bu reaktörlerde gaz basıncı sabittir ve hareketli kubbenin ağırlığıyla ayarlanabilmektedir. Küçük biyogaz tesislerinde gaz depolama sisteminin ayrı olarak kullanımı, özellikle reaktör ve gaz kullanım yerinin arasındaki mesafe 50-100 m'nin üzerinde olduğunda gerekli olmaktadır. Bu tip tesislerde düşük basınçlı gaz depolama sistemleri tercih edilmektedir. Gaz sızdırmazlığının genellikle su ile sağlandığı, üst kısmı hareketli, iç içe geçmiş iki silindirden oluşan hareketli kubbeli biyogaz depolama tankı en sık rastlanan sistemlerdendir. Bu sistemlerde gaz iletimi ve kullanımı için gerekli basınç, hareketli kısmın ağırlığıyla ayarlanmaktadır ve sabittir (Werner v.d., 1989). Gaz torbası şeklinde, genellikle kauçuk ve vinil malzemedan yapılan biyogaz depoları da küçük tesislerde tercih edilmektedir. Bu depolarda gerekli basınç, üretim malzemesinin elastikiyetinden faydalanarak sağlandığı gibi, depo üzerine ilave ağırlık konarak da elde edilebilmektedir (Gustavsson, 2000; Anon., 2000b). Biyogazın % 60-80'lik kısmını oluşturan CH<sub>4</sub>, LPG ve propan gibi düşük basınçlarda sıvılaştırılamamaktadır. Özellikle taşıtlarda kullanım söz konusu olduğunda, kısa mesafeler için, elde edilen biyogaz 100-1000 kPa düzeyine basınçlandırılarak, LPG ve propan tanklarında depolanabilmektedir (Werner v.d., 1989). Fakat özellikle uzun mesafeler söz konusu olduğunda, 28-35 MPa basınç düzeyinde yüksek basınçlı gaz depolarında sıvılaştırılarak depolanması mümkündür (Jenangi, 1981). Burada önemli olan, biyogazın içerdiği CO<sub>2</sub> nin, CH<sub>4</sub> oranı

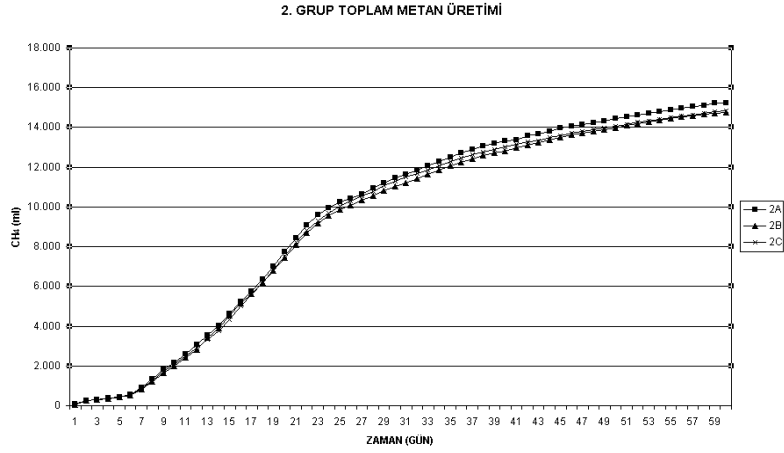
minimum % 95 olacak şekilde giderilmesinin gerekliliğidir (Monnet, 2003; Gustavsson, 2000; Bayhan ve Zablocki, 1991; Camargo, 1986). Yatırım maliyeti, enerji tüketimi ve güvenlik önlemleri, bu uygulamaların çoğunlukla büyük sistemlerde gerçekleştirilebilmesine neden olmaktadır.

Biyogazla çalışan cihazlarda gerekli gaz giriş basıncı, genellikle 8 kPa'dan düşük olmaktadır (Walsh v.d., 1989). Gaz giriş basıncı, biyogazla çalışan ocaklarda 0,5 - 2 kPa, lambalarda 1-2 kPa, LPG ve propana göre dizayn edilmiş ticari ısıtıcılarda 3 - 8 kPa aralıklarında değişmektedir (Sasse, 1988; Werner v.d., 1989). Biyogazın üretildiği ve kullanıldığı yerin birbirinden uzak olması durumunda, taşıyıcı borularda oluşan basınç kayıplarının da yenilmesi gerekli olmaktadır. Sistem içerisinde ayrı bir gaz basınçlandırma cihazının olmaması durumunda, gerekli basınç reaktör içerisinde biyogaz üretiminden doğal yollarla sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, reaktör içerisinde oluşacak gaz basıncının biyogaz üretimi üzerine etkileri göz önüne alınmalıdır. Reaktör içerisinde oluşacak basıncın anaerobik bakterilere ve dolayısıyla biyogaz üretim verimine etkisi söz konusudur. Literatürde konuyla ilgili olarak 0,75-1,5 kPa mutlak basınç aralığının, biyogaz üretimi için ideal olduğu ve bunun üzerindeki basınçlarda üretimin zorlaşacağı belirtilmektedir (Arnott, 1985). Fakat özellikle büyük reaktörlerin alt kısmında bulunan metan bakterileri oldukça büyük hidrolik basınç altında faaliyetlerini sürdürmektedir ve bir performans düşüklüğü rapor edilmemiştir (Chynoweth and Isaacson, 1987). Yine bazı çalışmalarda, biyogaz üretiminin engellenmeden devam edebileceği basınç sınırı 120 kPa (gösterge) olarak verilmiştir (Nijaguna, 2002). Diğer bir çalışmada, reaktör içerisinde oluşacak 3,75 kPa negatif basıncın, termofilik fermentasyonda, metan üretimini % 5 arttırdığı belirtilmiştir (Chynoweth and Isaacson, 1987). Özellikle reaktör içerisindeki basınç değişimlerinden, toksik etki yaratacağı için kaçınılması gerektiği vurgulanmaktadır (Vavilin v.d., 1995). Basınç yükseldiğinde metana göre 40 kez daha fazla çözünebilme özelliğine sahip CO<sub>2</sub>'nin sıvı içerisindeki konsantrasyonu artmaktadır. Bu yüzden biyogaz içerisindeki metan oranı da yükselmektedir (Alvarez v.d., 2006).

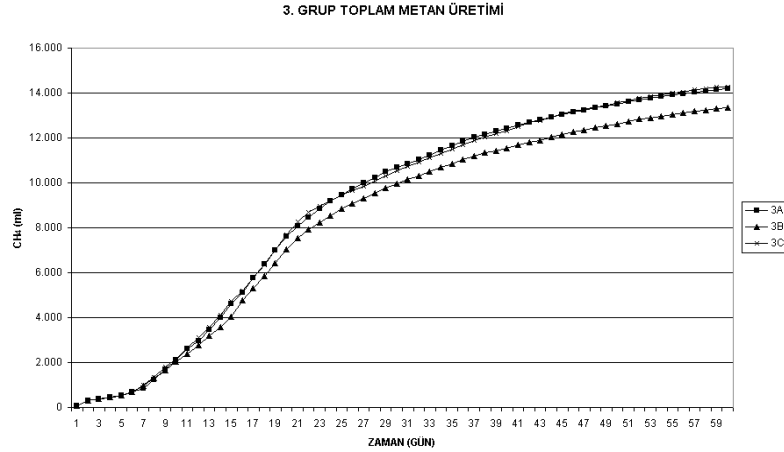
Bu çalışmada, elde edilen biyogazın ayrı bir basınçlandırıcı olmadan reaktör çalışma basıncıyla kullanıldığı sistemler göz önüne alınmış, kurulan bir deney düzeneğiyle farklı basınçların, sıgır atığının mezofilik anaerobik fermentasyonu üzerine etkileri araştırılmıştır.



Şekil 2. 1. Grup için 1A, 1B ve 1C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı.



Şekil 3. 2. Grup için 2A, 2B ve 2C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı.

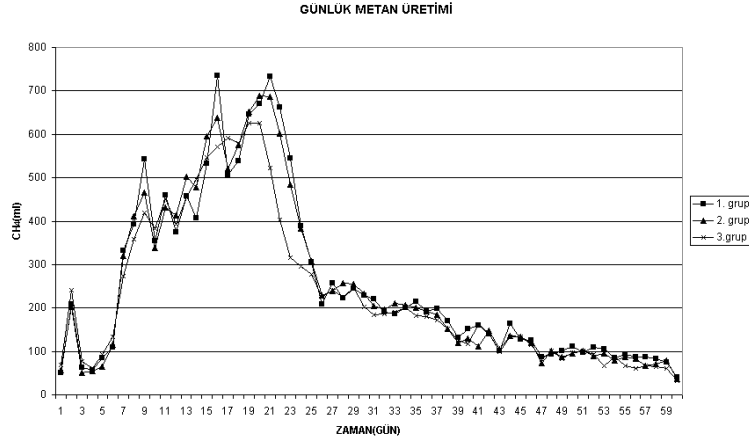


Şekil 4. 3. Grup için 3A, 3B ve 3C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı.

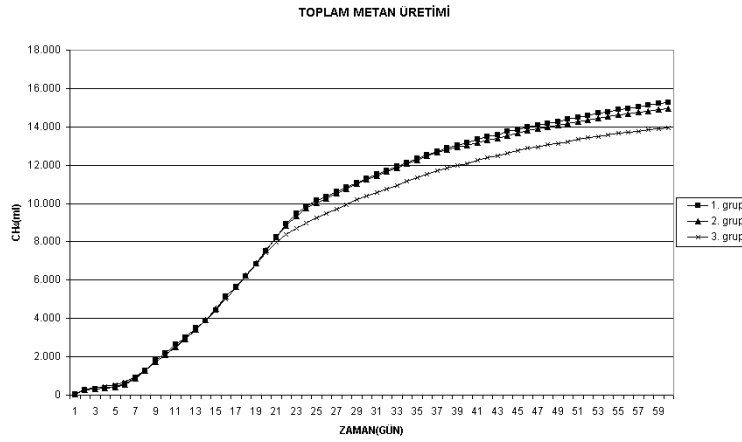
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneyde dokuz adet 1lt hacimli cam şişeden oluşan reaktörler kullanılmıştır. Üç ayrı basınç düzeyi için üç paralel reaktörde denemeler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, sıcaklık kontrollü, yalıtımlı odada kurulmuş ve mezofilik sıcaklık bölgesinde (35 °C) çalışmalar yürütülmüştür. Deneyde besleme materyali olarak, Yaşar Holding'e bağlı Çamlı Yem Besicilik Sanayi ve Tic. A.Ş.' den temin edilen taze sığır atığı su-

landırılarak kullanılmıştır. Kullanılan atığın toplam katı madde oranı(TK) % 21, toplam kuru maddede uçucu katı madde oranı (UK) % 78'dir. Besleme için TK % 10 olacak şekilde sulandırma yapılmıştır. Üretilen biyogazın depolanmasında ve üretim miktarının ölçülmesinde yine dokuz adet 2,5 lt hacimli ölçeklendirilmiş cam şişelerden yararlanılmıştır. Basınçlandırma, her grup için ayrı seviyelere yerleştirilmiş su toplama üniteleriyle sağlanmıştır. Su toplama üniteleri, gazometrelerin bulunduğu bölmeden yüksekliği

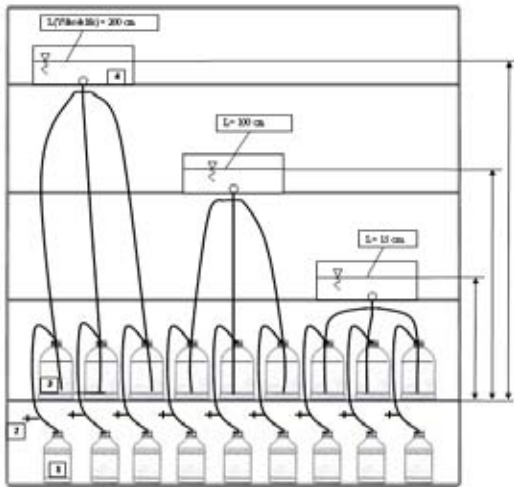


Şekil 5. 1., 2. ve 3. grupların günlük metan üretim miktarı.



Şekil 6. 1., 2. ve 3. grupların toplam metan üretim miktarı.

sırasıyla 200, 100 ve 15 cm olacak şekilde yerleştirilen üç ayrı plastik depodan oluşturulmuştur. Gaz ve su bağlantıları 6 mm çapında şeffaf plastik hortumlarla sağlanmıştır. Reaktörler ve gazometreler arasında, gaz örnekleme için portlar yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneği (1) Reaktör (2) Gaz örnekleme portu (3) Gazometre (4) Su toplama kabı.

Reaktörler kesikli beslemeli tip olarak çalıştırılmış ve herbiri 800 ml hacimde doldurulmuştur. Deneme 60 gün boyunca 35 °C'de, mezofilik sıcaklık bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyogaz miktarı, ölçekli gazometrelerde oluşan su seviyesi ölçülerek, günlük olarak kaydedilmiştir. Karıştırma günde bir defa manuel olarak yapılmıştır.

Reaktörlerden alınan biyogazın içeriği gaz kromatografi metodu ile belirlenmiştir. Analiz için, Agilent 6890N gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Gaz analizleri, gazometrelerin her boşaltılışında tekrarlanmıştır. Günlük ve toplam biyogaz ve metan üretimi, standart sıcaklık ve basınç şartlarına (0 °C ve 1 atm) göre düzelterek hesaplanmıştır. Deney sonunda elde edilen fermente atıkların TK madde oranları, 103 °C'de etüvde sabit ağırlığa ulaşılan kadar bekletilerek, UK madde oranları da 600 °C'de kül fırınında yarım saat yakılarak kütleli olarak hesaplanmıştır. Tartımlarda 0,1 mg hassasiyette Precisa XB220 marka terazi kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Denemede kullanılan reaktörler, çalışma basınçlarına göre üç gruba ayrılmıştır:

1. Grup:  $\approx$  19,6 kPa (mutlak)
2. Grup:  $\approx$  9,8 kPa (mutlak)
3. Grup:  $\approx$  1,5 kPa (mutlak)

Her grupta üç paralel reaktör bulunmaktadır. Denemeler sonucunda elde edilen toplam metan miktarları, her grup için Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir. 1. gruptaki 1A, 1B ve 1C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı sırasıyla, 15.361 ml, 15.607 ml ve 14.786 ml'dir. Bu reaktörlerden elde edilen fermente atığın TK madde oranları yine sırasıyla, % 5,8, % 5,2 ve % 5,4 olarak bulunmuştur. 2. grup için metan üretim değerleri 2A, 2B ve 2C reaktörleri için sırasıyla, 15.240 ml, 14.765 ml ve 14.830 ml olarak gerçekleşmiştir. Aynı reaktörler için fermente atık TK madde oranları ise, % 6,7, % 6,2 ve % 6,5 olmuştur. Metan üretiminin diğer gruplara göre biraz daha düşük seyrettiği 3. grup 3A, 3B ve 3C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarları ise yine sırasıyla, 14.206 ml, 13.343 ml ve 14.268 ml'dir. TK madde oranları aynı sırayla, % 6,9, % 6,7 ve % 6,8 olarak gerçekleşmiştir.

Her grup için paralel reaktörlerin metan üretim ortalamaları alınarak çizilen karşılaştırmalı günlük ve toplam metan üretim grafikleri, Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. Günlük metan üretim grafiği(Şekil 5) incelendiğinde, her grubun 20-21. günlerde bir pik değere ulaştığı ve daha sonra metan üretiminin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 6'dan da izlenebileceği gibi, 1., 2. ve 3. grup için toplam metan üretim değerleri sırasıyla, 15.251 ml, 14.945 ml ve 13.939 ml olarak gerçekleşmiştir.

Anlamlılık seviyesinin  $P < 0,05$  olarak kabul edildiği LSD(least significant difference) testinin uygulanması sonucunda, gruplar arasında metan üretimi bakımından anlamlı bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, istatistiksel olarak anlamlı olmamasına rağmen, en düşük sistem basıncına sahip( $\approx$  1,5 kPa) 3. grubun üretim değerlerinin, diğer gruplara göre daha düşük seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, 1,5 kPa mutlak basınç üzerindeki basınçların, metan üretimini zorlaştırdığı şeklindeki literatür bilgisince desteklenmemektedir. Toplam biyogaz üretiminde, basınca göre düzeltilmemiş ham değerler incelendiğinde, 1. grup, 2. grup ve 3. grup için ortalama değerler, sırasıyla, 22.903 ml, 24.928 ml ve 25.493

ml olarak gerçekleşmiştir. Yine aynı gruplar için, toplam biyogaz üretim ortalamaları alındığında biyogaz içerisinde metan oranları 1., 2. ve 3. grup için sırasıyla, % 62,6, % 61,5 ve % 60,5 olarak bulunmuştur. Bu fark büyük ihtimalle,  $CO_2$ 'in  $CH_4$ 'e göre suda daha fazla çözünmesi ve bu çözünmenin basınç artışıyla fazlalaşmasından kaynaklanmaktadır (Krich v.d., 2005). Bu da, 1,5 kPa basınç değerini metan üretiminde sınır değer alan yorumların, bu etkiler göz önüne alınmadan yapıldığını düşündürmektedir (Eryaşar ve Koçar, 2006).

### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biyogazın depolanması, özellikle üretim ve tüketim zamanlarının çakışmamasından dolayı önemlidir. Yüksek basınçlı depolama, biyogazın ve özellikle içerdiği metan gazının özelliklerinden dolayı yüksek maliyet ve ek güvenlik önlemleri gerektirmekte, bu yüzden de çiftlik tipi diyebileceğimiz, küçük ve orta ölçekli kırsal kesim biyogaz tesislerinde kullanımı verimli olmamaktadır. Bu tip tesislerde genellikle düşük basınçlı biyogaz depolama sistemleri kullanılmaktadır. Fakat, gerek üretim ve kullanım ünitelerinin birbirinden uzak olmasından dolayı gaz iletim hatlarında oluşan basınç düşümleri, gerekse biyogazla çalışan bazı cihazların nispeten yüksek giriş basıncı gerektirmesi, ek bir basınçlandırıcı ünite ihtiyacı doğurmaktadır. Bu duruma alternatif olarak, biyogaz üretimi nedeniyle reaktörde oluşan doğal basıncın kullanılması, yatırım ve işletim maliyetlerini düşürücü bir etki yaratabilecektir. Bu çalışmada, farklı düşük basınçlarda sığır gübresinin anaerobik fermentasyonu incelenmiş, gaz iletimi ve kullanımı için yeterli olabilecek basınç değerlerinde, metan üretimi yönünden olumsuz bir etkinin oluşmadığı gözlenmiştir. Bu veriler ışığında, sistem içerisinde ek bir basınçlandırıcı kullanılmadan, sadece gazometre üzerinde çeşitli modifikasyonlarla gerekli basıncın sağlanmasının mümkün ve maliyet düşürücü etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Alvarez, R., Villca, S., Lide'n, G. 2006. Biogas production from llama and cow manure at high altitude generation and for farm machine fuel, *Biomass and Bioenergy*. (30), 66–75.
- Anonymous, 1999. Biogas Digest Volume II- Biogas - Application and Product Development, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- Anonymous, 2000a. Anaerobic Digestion of Farm and Food Processing Residues, British Biogen, [www.mrec.org/biogas/adgpg.pdf](http://www.mrec.org/biogas/adgpg.pdf)
- Anonymous, 2000b. AT Information: Biogas, [http://www5.gtz.de/gate/techinfo/biogas/AT\\_biogas.html](http://www5.gtz.de/gate/techinfo/biogas/AT_biogas.html).
- Arnott, M. 1985. The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Peace Corps, Information Collection and Exchange, Reprint R-48.
- Bayhan, M., Zablocki, M. 1991. Biogas as fuel in agricultural engines, *13. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, Konya.
- Camargo, E.B. 1986. Biogas clean-up and utilization, *Wat. Sci.Techn.* (18), 143-150.
- Chynoweth, D.P. and Isaacson, R. 1987. Anaerobic digestion of biomass, springer; 1 edition, 282 p.
- Datong, Z. 1989. An analysis of domestic biogas storage installations in China, *Biomass*. (20), 61-67.
- Eryaşar, A. ve Koçar, G. 2006. Biyogaz depolama sistemleri ve farklı düşük basınçların biyogaz üretimi üzerine etkileri, III. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 24-25-26 Mayıs 2006, Muğla.
- Gustavsson, M. 2000. Biogas technology-solution in search of its problem – a study of small-scale rural technology introduction and integration", Göteborg University, Göteborg.
- Jenangi, L. 1981. Producing methane gas from effluent, Adelaide University Diploma in Agricultural Production, [www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf](http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf).
- Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J.P., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. 2005. Biomethane from Dairy Waste: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California, [http://www.calstart.org/info/publications/Biomethane\\_from\\_Dairy\\_Waste\\_Full\\_Report.pdf](http://www.calstart.org/info/publications/Biomethane_from_Dairy_Waste_Full_Report.pdf)
- Marchaim, U. 1992. Biogas processes for sustainable development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN: 92-5-103126-6.
- Monnet, F. 2003. An introduction to anaerobic digestion of organic wastes, <http://www.remade.org.uk/documents/reports/An%20Introduction%20to%20Anaerobic%20Digestion%2027153953177.pdf>.
- Nijaguna, B.T. 2002. Biogas Technology, New Age International Publishers. New Delhi. p. 289.
- Sasse, L. 1988. Biogas plants, a publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A division of the Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Tiwari, G.N., Usmani, J.A., Chandra, A. 1996. Determination of period for biogas production, *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37 (2), 199-203.
- Vavilin, V.A., Vasiliev, V.B., Rytov, S.V. 1995. Modelling of gas pressure effects on anaerobic digestion, *Bioresource Technology*. (52), 25–32.
- Vijayalekshmy, M.V. 1985. Biogas technology-an information package, Tata Energy Research Institute, Bombay
- Walsh, J.L., Ross, C.C., Smith, M.S., Harper, S.R. 1989. Utilization of biogas, *Biomass*. (20), 277-290.
- Wase, D.A.J., Forster, C.F. 1984. Biogas-fact or fantasy, *Biomass*. (4), 127-142.
- Werner, U., Stöhr, U., Hees, N. 1989. Biogas plants in animal husbandry, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.