

ATIK KARIŞTIRICI GEOMETRİSİNİN BİYOGAZ ÜRETİMİNE ETKİSİ

Abdulcelil BUĞUTEKİN¹, Mustafa YILMAZ², Ahmet Korhan BİNARK³

¹Adıyaman Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu, ADIYAMAN

²Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

³Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, İSTANBUL

abugutekin@adiyaman.edu.tr; myilmaz@eng.marmara.edu.tr; akorhan@marmara.edu.tr

Özet

Yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi de, atıkların değerlendirilmesiyle üretilen biyogazdır. Biyogaz üretiminin verimliliğini etkileyen birçok parametreler (atık cinsi, sıcaklık, karıştırma, pH, bekleme süresi) vardır. Bunlardan en önemlilerinden bir tanesi de atığın karıştırılmasıdır. Bu çalışmada; Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü laboratuvarlarında biyogaz üretim sınır şartlarını sağlayan, biyogaz üretim şartlandırıcısı imal edilerek, atık karıştırmanın biyogaz üretimine etkisi incelenmiştir. Karıştırma sistemi olarak 2 d/h ve 30 d/d'lı manyetik karıştırma sistemi tercih edilmiştir. Deneyleerde, karıştırıcısız (F₁), T profil kanatlı karıştırıcı (F₂) ve 6 kanatlı Rushton karıştırıcısı (F₃) kullanılmıştır. Aynı miktarda büyükbaş hayvan atığı fermenterlere konulmuş ve bu fermenterler aynı şartlarda 45 gün ve 36 °C lik sıcaklıkta biyogaz şartlandırıcısında tutulmuştur. 24 saatlik periyotlarla; biyogaz üretim miktarı, metan gazı yüzdesi ve pH değerleri ölçülmüş ve bu değerlerin profilleri elde edilmiştir. Deneyleerin sonucunda; Rushton karıştırıcılı fermenterin (F₃), karıştırıcısız fermenterden (F₁) % 30, T profil kanatlı karıştırıcıdan (F₂) % 15,4 daha verimli olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Biyogaz üretimi, geometri, Rushton karıştırıcı*

Abstract

One of renewable energy resources is biogas produced by processing waste product. There are many parameters (type of waste product, temperature, mixing, pH, waiting time, etc.) affecting the performance of biogas production. One of the important parameters is the waste product mixing. In this work, biogas production to become conditioned, providing boundary conditions of biogas production was built in the laboratories of the Technical Education Faculty of Marmara University. Effect of mixing on biogas production was investigated. As a mixing system, a magnetic mechanic mixing system having the properties of 2 min/h and 30rev/min was selected. Three different type mixers, without mixing (F₁), T profile blade type mixer (F₂) and 6-blade Rushton mixer (F₃) were used. Some amount of cattle waste was put into digesters and those digesters were stored in biogas to become conditioned at same conditions for 45 days and 36 °C at each 24 hour period, amount of biogas production, Methane percentage and pH values were measured and graphs of these data were evaluated. Results of experiments show that digester (F₃) having Rushton mixer more efficient (about 30 %) than digester (F₁) without mixing and was more efficient (about 15.4%) than digester (F₂) having T profile blade type mixer.

Key Words: *Biogas production, geometry, Rushton mixer*

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ve nüfus ile artan enerji ihtiyacı yenilenebilir kaynakları çok daha önemli yapmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de atık ürünün işlenmesiyle üretilmektedir. Biyogaz üretiminin performansını etkileyen birçok parametre (atık ürünün cinsi, sıcaklık, karıştırma, pH değeri, bekleme süresi vb.) bulunmaktadır. Bu önemli parametrelerden biri de atık ürününün karıştırılmasıdır. atığın karıştırılmasına göre yayın taraması yapıldığında aşağıda sunulacak olan çalışmalar karşımıza çıkmaktadır: Chan ve arkadaşların yaptıkları çalışmada deniz fosilinin lağım çamuru, pis su ve kentsel katı atıkların kimyasal parametrelerini, gaz üretimindeki toplam gaz miktarı, üretilen toplam biyogazın içindeki CH₄, CO₂ miktarı ve oranı 11 hafta boyunca tekrar dolaşım ve filtrelemenin aktif metan üretimine geçiş periyodunu kısaltabileceğini, deniz fosilinin lağım çamuru, pis su ve kentsel katı atık karışımı olan arazi doldurma hücresinin metan oluşumunu arttırdığını ve sistemdeki filtrasyon ve tekrar dolaşımın (sirkülasyon) oranının düşük miktarda ve kuvvette olmasının biyogaz üretim verimini arttıracaklarını belirlemişlerdir [1]. Lastela ve arkadaşları yarı katı organik atıklara farklı bakteriler aşıl原因arak, anaerobik ortamda, ayırma ızgaralı sistem, karıştırmalı, yükleme ünitesine sahip, biyogaz ayraçlı, biyogaz analiz ve arıtma cihazlı komple deney cihazında çalışma yapmışlardır [2].

Karim ve arkadaşları; Altı adet laboratuvar ölçekli anaerobik sindiricilerin karıştırma düzeneklerini yaparak hava pompası ile biyogaz çevirim oranının ve akış borusu yüksekliğinin performansa etkisini incelemişlerdir. Günlük sindiricilerdeki hayvan gübresinden elde edilen biyogazın ihtiva ettiği metan miktarını 0,40-0,45 lt olarak ölçmüşlerdir. Fakat biyogaz sirkülasyon oranının (karıştırma) yüksek olduğu periyotlarda metan üretiminin azaldığı, tüplerdeki farklı yükseklikteki akış borularının metan üretim miktarına etki etmediğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak biyogazın tekrar dolaşımını sağlayan mekanizmanın sindiricilerin içinde %15 oksijen oluşumuna, tüplerin ince hava geçirgenliklerinden ve hava pompasının sızıntılarından dolayı reaksiyonları olumsuz yönde etkilediğini saptamışlardır [3]. Süleyman ve arkadaşı: Organik atıkların oksijensiz sindirimi için 10 d/d karıştırma yapan ve mezofolik ortam sıcaklığı 3.5-3.8 °C olan bir sistem tasarımı yaparak modelleme yapmışlardır [4]. Khursheed Karim ve arkadaşları; laboratuvar ölçekli dört adet 3,73 lt' lik fermenterleri PVC' den imal ederek 35 °C'ta 16,2 hidrolik bekleme süresinde fermenterlere yüklenen büyük baş hayvan atıklarının farklı yöntemlerle karıştırarak, karıştırmanın biyogaz üretimine olan etkilerini incelemişlerdir. 1.

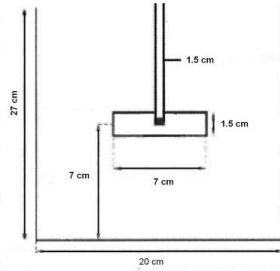
Fermenterde karıştırma sistemi bulunmamakta, 2. Fermenterde üretilen biyogaz, gaz pompası ile tekrar sisteme gönderilerek bir karıştırma sağlanmakta, 3. Fermenterde karıştırma işlemi için 62 mm çapındaki eksensel karıştırıcı kullanılmakta, ve 4. Fermenterde karıştırma bulamacın atık pompası sirkülasyonu ile yapılmaktadır [5]. A.Rodriguez ve arkadaşları; Domuz gübresinin 1 mm 'lik filtrelerden geçirdikten sonra karıştırmalı ve karıştırmaz (katmanlı) iki pilot fermenterde 35 °C 'de ve 60 gün bekleme süresinde birkaç kinetik model uygulayarak, birinci aşamada atığın içindeki mikro organizmaların büyüme limitlerini belirlemiş, ikinci aşamada da karıştırmanın kinetik parametrelere olan etkisini incelemişlerdir [6]. Ong ve arkadaşları; Büyükbaş hayvan atığının karıştırmalı ve karıştırmaz bir fermenterde, bulamacın üst/orta/alt kısımlarındaki biyogaz üretim miktarlarını incelemişlerdir [7]. Khursheed Karim ve arkadaşları, laboratuvar ölçekli 3,73 lt 'lik fermenterde 35 °C 'de, karıştırma etkisine karşılık atık direncine göre hayvan atıklarının anaerobik sindirimi hakkında çalışma yapmışlardır [8]. Brole ve arkadaşları; 100 lt kapasiteli yukarı akışlı biyogaz üretim reaktöründe, büyük baş hayvan gübresini karıştırmalı ve karıştırmaz olarak biyogaz üretim miktarı ve % CH₄ 'üretimini incelemişlerdir [9]. Keshtakar ve arkadaşları; anaerobik ortamdaki büyükbaş hayvan gübresinin ideal olmayan sürekli karıştırmalı ve akışlı reaktörlerde üretiminin matematik modellemesini yapmışlardır [10]. Vavilin ve arkadaşları; mezofolik ortamda evsel kati atıkların çok karıştırılması sonucu asitlenme olduğundan metanogenlerin olumsuz yönde etkilendiğini, bu yüzden düşük hızda karıştırmanın daha olumlu etki sağladığı sonucunu elde etmişlerdir [11]. Janzekovic ve arkadaşları, sıvı gübre içindeki kati madde oranı %5,05-%5,74 olan bulamacı 20 dakika özel bir karıştırıcı ile karıştırıldığı zaman kati maddelerin sıvının içinde dağıldığını, atığın havalandırıldığında çevreye verdiği kokunun zamanla azaldığını ve kimyasal özellik bakımından daha kaliteli olduğunu belirlemişlerdir [12]. Chen ve arkadaşları; bulamaçların, tüketilen gücün ve karıştırma düzeyine göre reolojik (akış) özelliklerini çok etkilediğini biyogaz üretiminde kullanılan atıkların non-Newtonian görünmelerine rağmen karıştırma ile bulamaç akış özellikleri arasında ilişkilendirme yapılabileceğini belirlemişlerdir [13]. Sadaka ve arkadaşları, 2 adet 4 litrelik fermeterlere kati oranı yüksek sığır gübrelerini günde 2 defa 10 tur karıştırma yaparak, karıştırmanın biyogaz üretimine olan etkilerini incelemişlerdir. Karıştırılmış ve karıştırılmamış atıkların uçucu kati madde oranı sırasıyla %9,6 ve % 7,3, karıştırılmış gübrenin kimyasal oksijen ihtiyacı % 37,9' a inmiştir. Karıştırılmış ve karıştırılmamış gübrelere elde edilen biyogaz miktarları karşılaştırıldığında, karıştırılmış gübreden % 33,3 daha fazla biyogaz üretildiğini tespit etmişlerdir [14]. Patni

ve arkadaşları, büyük baş hayvan, domuz gübrelere karıştırılması esnasında gübrenin içeriğindeki Hidrojen Sülfat (H_2S), Amonyak (CH_3), Karbondioksit (CO_2) ve Metan (CH_4) konsantrasyonlarındaki değişimleri incelemişlerdir [15]. Sievers ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada gübrenin işlenmesinde kimyasal pıhtılaşmanın etkili olduğunu, bunun yanında pıhtılaşmaya hem karıştırma yoğunluğu, hem de karıştırma süresinin de etkili olduğunu, atığı çok hızlı veya yavaş karıştırmanın süreci olumsuz etkilediğini belirlemişlerdir [16]. Kalia ve arkadaşları; yatay biyogaz üreticinde 20-23 °C sıcaklıklarda, 40 kg saf büyük baş hayvan gübresi ile %10 bulamaçla karıştırılmış büyük baş hayvan gübresinden 15 hafta boyunca bu iki sistemden biyogaz üretim sisteminden biyogaz üretim miktarını incelemişlerdir. Bulamacın karıştırıldığı sistemde üretiminin daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [17]. Amon ve arkadaşları, 35 °C sıcaklıkta 60 gün bekleme süresince 1 lt fermeterlere büyük baş hayvan ve mısır atıklarını her 10 dk' da 10 sn karıştırma yaparak biyogaz üretim oranlarını incelemişlerdir [18]. Keshtkar ve arkadaşları büyük baş hayvan gübresini 35 °C., 15 gün bekleme süresinde, ideal olan ve ideal olmayan atığın iki farklı bölgesinde sürekli akışlı karıştırıcının dinamik davranışını belirleyen bir matematik modeli geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, ideal olmayan bir karıştırıcının fermenterin performansını azalttığını, ideal karıştırma yapılan reaktörlerde metan verimi, atığın pH, bekleme süresi ve atığın karıştırma derecesine göre doğru orantılı olduğu, tamamı karıştırılmalı reaktörün reaksiyon yani bekleme süresini kısalttığını gözlemlemişlerdir [10].

Marmara Üniversitesinin Teknik Eğitim Fakültesi laboratuvarlarında gerçekleştirdiğimiz bu çalışmamızda biyogaz üretimi deneylerinde üç farklı tür karıştırıcı kullanılmıştır [19].

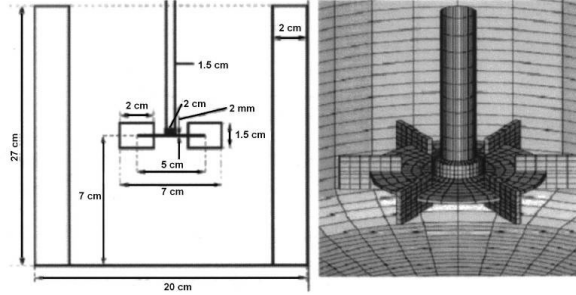
2. BİYOGAZ ÜRETİMİNDE FERMENTER KARIŞTIRMA SİSTEMLERİ

Fermantasyon materyalinin, üretici oluşturan tüm kısımlarda akıcılık özelliğine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, üreteç içersinde materyalin homojen dağılması esastır. Parçacık büyüklüğünün olabildiğince küçük olması da fermantasyon etkinliğini arttıran önemli bir faktördür. Üretecin karıştırılmadığı durumda taban ve üst kısımda bulunan materyalin çökme nedeniyle kuru madde içeriği orta kısma göre daha fazla olacaktır. Bu ise bakterilerin faaliyetini azaltacağı gibi kuru madde içeriği yüksek olan üst kısım, atığın iç kısımlarında oluşan gazın bulamaç dışına çıkışına engel olacaktır [19]. Yürüttüğümüz bu çalışmada F_1 fermenteri karşılaştırma için baz alınmış ve tüm fermenterler (F_1 , F_2 ve F_3) eşzamanlı ve aynı koşullarda birlikte kullanılmışlardır [20,...., 26]. F_2 ve F_3 Fermenterleri sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan F_2 fermenterinin boyutları [19].

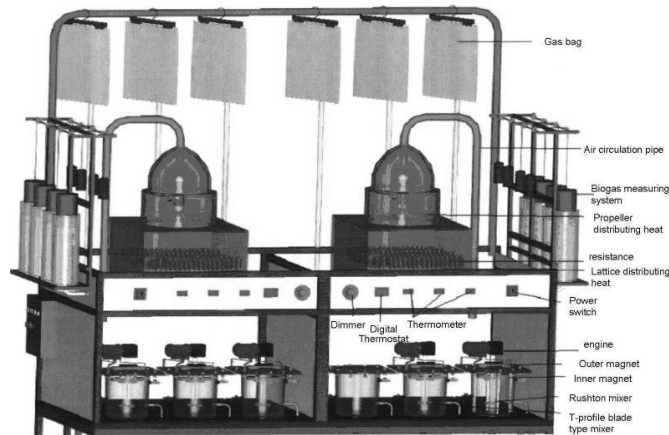
T kanat profilli karıştırıcılar daha düşük karışımın istendiği durumlarda kullanılmakta ve fermenter içersinde baffle bulunmamaktadır. Rushton profilli karıştırıcılar, genellikle gıdalar, pH, oksijen ve diğer kimyasallar içeren biyo reaktörlerde kullanılmaktadır.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan F_3 fermenterinin boyutları [19].

3. DENEY DÜZENEGİ ve DENEYLER

Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Enerji Eğitimi Laboratuvarında imal edilen biyogaz üretim deney cihazı Şekil 3'de gösterilmiştir. [19].



Şekil 3. Biyogaz üretim deney cihazı [19].

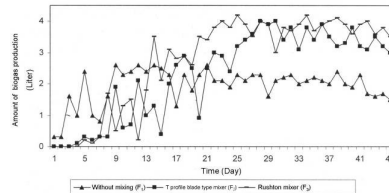
Deneylerde kullanılan atığın kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışma zamanı 2 dk/h ve dönme hızı 30 d/d olan bir mekanik manyetik karıştırma sistemi kullanılmıştır. Deneylerde F_1 , F_2 ve F_3 olmak üzere 3 farklı tip fermenter kullanılmıştır. Bir miktar sıgır gübresi aynı zamanda biyogaz depolamak için kullanılan ve 36 °C sıcaklıkta 24 saat/45 gün aynı şartlarda tutulan fermenterlere doldurulmuş ve bu süreç boyunca biyogaz üretim miktarı, Metan içeriği yüzdesi ve pH değerleri ölçülmüş ve bu bilgiler grafik olarak elde edilmiştir [19].

Tablo 1. Deneylerde kullanılan atığın kimyasal ve fiziksel özellikleri

Fiziksel ve kimyasal özellikleri		Sayısal Değerler
Toplam katı	(%)	12
Toplam katı	(g/L)	141,4
Uçucu katı madde oranı	(g/L)	90,1
Kimyasal Oksijen ihtiyacı	(g/L)	38,5
pH		6,5/7,5
Bekleme süresi	(gün)	45
Karıştırıcı Model		<ul style="list-style-type: none"> • Rushton karıştırıcı (6-kanatlı ve baffle'lı) • T-profilli karıştırıcı • Karıştırıcısız
Atığın ısı iletimi	(W/m K)	0,12-0,19 [27]
Atığın özgül ısısı	(kJ/kg °C)	4,2 [21, 28]
Karıştırma zamanı	(dk/h)	2
Sıcaklık	(°C)	35±1
Karıştırma süresi		Sürekli karıştırma
Karıştırıcı motor devri	(d/d)	30
Yoğunluk	(kg/m ³)	1090
Viskozite (35 °C 'de)	(kg/m s)	0,084

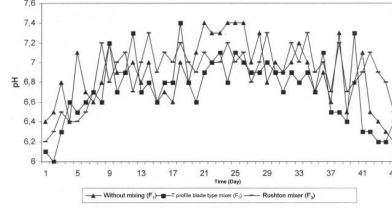
4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biyogaz üretim miktarı, biyogazın pH değeri ve Metan yüzdesindeki değişimler zamana bağlı olarak üç farklı karıştırıcı sistem için Şekil 4, 5 ve 6 de gösterilmiştir. Özellikle 13. günden sonra F_3 fermenterindeki biyogaz üretim miktarı (lt) ve Metan yüzdesi, aşağıdaki Şekillerde görüleceği üzere F_2 ve F_1 fermenterlerinde elde edilenlerden daha fazladır.

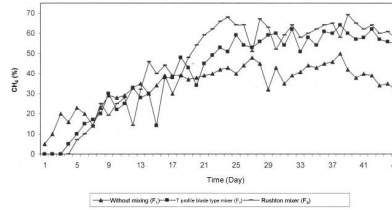


Şekil 4. 3 farklı karıştırıcı sistem için Biyogaz üretim miktarında zamana bağlı değişimler [19].

Deney sonuçları F_3 fermenterinin (Rushton tipi) diğer F_1 (karıştırıcısız) fermenterinden %30 ve F_2 (T kanat profilli karıştırıcı) fermenterinden %15,4 daha verimli olduğunu göstermiştir. Ayrıca F_2 fermenterinin F_1 fermenterinden %16,6 daha verimli olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 3 farklı karıştırıcı sistem için pH değerindeki zamana bağlı değişimler [19].



Şekil 6. 3 farklı karıştırıcı sistem için Metan yüzdesindeki zamana bağlı değişimler [19].

Biyogaz üretimindeki sınır şartlarının çok değişken olması, kullanılan atıkların çeşitliliği ve kıvamı biyogaz üzerinde çalışmaların devam ettirilmesi gerekliliğini düşündürmektedir. Bu sebeple araştırmaya açık alanlar aşağıda sıralanmıştır:

- Karıştırma hızının Biyogaz üretimine etkisi.
- Karıştırma tipinin örneğin sürekli veya süreksiz (kesintili) olması gibi Biyogaz üretim verimliliğine etkisi.
- Laboratuvar ölçekli veya büyük tesislerde Biyogaz üreteçlerinin geometrik şekil ve ebatlarının Biyogaz üretimine etkisi.
- Biyogazın sıvı halde depolanması.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir (Proje no. BSE-072/131102).

5. KAYNAKLAR

1. Chan,G.Y.S.; Chu,L.B.; Wong,M.H.: "Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment", Environmental pollution, 118, pp.393-399, 2002.
2. Lastela,G.;Testa,C.;Cornacchia,G.;Notornicola,M.;Voltasio,F.;Sharma,V.K.: "Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification", Energy Conversion and Management 43, pp. 63-75, 2002.
3. Karim, K.; Thomas, Klasson, K.; Hoffmann, R.; Drescher, S.R.; Depaoli, W.D.; Al-Dahhan, M. H.: "Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing", Bioresource Technology, vol:96,pp. 1607-1612, 2005.
4. Onat S.; Topaloğlu, B. : "A model for biogas production system", proceed of the 5th National Clean Energy Symposium, (in Turkish), pp:601-608, May 26-28, İstanbul, 2004.

5. Karim, K.; Hoffman, R.; Klasson, K.T.; Al-Dahhan, M.H.: "Anaerobic digestion of animal waste: Effect of Mode of Mixing" *Water Research*, vol:36, pp:3597-3606, 2005.
6. Andara, A.R.; Esteban, J.M.I.: "Kinetik study of anaerobic digestion of the solid fraction of piggery slurries" *Biomass-Bioenergy*, vol: 17, pp:435-443, 1999.
7. Ong, H.K.; Greenfeld, P.F.; Pullammanappallil, P.C.: "An operational strategy for improved biomethanation of cattle-manure slurry in an unmixed, single-stage, digester" *Bioresource Technology*, vol: 73 pp. 87-89, 2000.
8. Karim, K.; Hoffinan, R.; Klasson, K.T.; Al-Dahhan, M.H.: "Anaerobik digestion of animal waste :Waste strength versus impact of Mixing" *Bioresource Technology*, vol : 96 pp. 1771-1781, 2005.
9. Borole, A.P.; Klason, K.T.; Ridenour, W.; Holland, J.; Karim, K.; Al-Dahhan, M.H.: "Methane Production in a 100-L Upflow Bioreactor by Anaerobic Digestion of Farm Waste" *Applied Biochemistry and Biotechnology* Vol. 129-132, 2006.
10. Keshkar, A.; Meyssami, B.; Abolhamd, G.; Ghaforian, H.; Khalagi, A. M.: "Mathematical modeling of non-ideal mixing continuous flow reactors for anaerobic digestion of cattle manure" *Bioresource Technology*, vol:87, pp. 113-124, 2003.
11. Vavilin, V.A.; Angelidaki, L.: "Anaerobic Degradation of Solid Material: Importance of Initiation Centers for Methanogenesis, Mixing Intensity, and 2D Distributed Model" Published online 11 November, in Wiley InterScience, 2004.
12. Janzekovic, M.; Mursec, B.; Cusb, F.; Ploj, T.; Janzekovic, I.; Zuperl, U.: "Use of machines for liquid manure aerating and mixing" *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163, pp.744-750, 2005.
13. Chen, Y.R.; Hashimoto, A.G. "Impeller mixing of livestock manure slurries" *American Society of Agricultural Engineers*, pp.34, 1979.
14. Sadaka, S.; Engler, C.R.: "Effects of mixing on anaerobic composting of beef manure" *American Society of Agricultural Engineers*, V.2, pp.4993-5001, 2000.
15. Patni, N.K.; Clarke, S.P.; "Transient hazardous conditions in animal building due to manure gas released during slurry mixing" *Applied Engineering in Agriculture*, v.7 pp.478-484, 1991.
16. Sievers, D.M.: "Rapid mixing influences on chemical coagulation of manures" *Biological Wastes*, v.28, pp.103-114, 1989.
17. Kalia, Anjan K.; Singh, Shiv P.; "Effect of mixing digested slurry on the rate of biogas production from dairy manure in batch fermenter" *Energy Sources*, v. 23, pp. 711-715, October 2001.
18. Amon, T.; Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Zollitsch, W.; Mayer, M.; Gruber, L.: "Biogas production from maize and dairy cattle manure-Influence of biomass composition on the methane yield" *Agriculture, Ecosystems and Environment*, V.118, pp. 173-182, 2007.
19. Buğutekin, A.: "Investigation of biogas production from waste product", Doctorate Thesis instructed by Binark, A.K., M.U.F.B.E., 2007.
20. Kongoli, C.; E.; Bland, W.; L.: "Influence of Manure Application on Surface Energy and Snow Cover" *Journal of Environmental Quality*, vol:31, pp:1166-1173, 2002.
21. Axaopoulos, P., Panagakakis, P., Tsavdaris, A., Georgakakis, D.: "Agricultural University of Athens, Agricultural Engineering Department, Laboratory of Farm Structures", Greece Available online 9 January 2001.
22. Yapici K., "Numerical investigation of stirred tank hydrodynamic" In partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in the department of chemical engineering, The Middle East Technical University, September, 2003.
23. Davidson M., K.; Sushil S.; Eggleton C., D.; Marrten M., R.: "Using Computational Fluid Dynamics Software to Estimate Circulation Time Distributions in Bioreactors" *Biotechnol. Prog.* Vol. 19, pp. 1480-1486, 2003.
24. Campolo M.; Sbrizzai F.; Soldati A.: "Time-dependent Low structures and Lagrangian mixing in Rushton-impeller baffled-tank reactor" *Chemical Engineering Science*, v.58, pp. 1615-1629, 2003.
25. Hitomi D.; Kato Y.; Kubo T.; Okuzaki S.; Sugihama H.: "Finite Element Analysis of a Flow Induced by a Rushton in an Baffled Stirred Vessel" *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol.39, No.3, pp.275-283, 2006.
26. Schafer M.; Karasozen B.; Uludag Y.; Yapici K.; Ugur O.: "Numerical method for optimizing stirrer configurations" *Computers and Chemical Engineering*, v.30 pp. 183-190, 2005.
27. Shuler, Kargi.: "Selection scale-up operation and control of bioractors" *ChE 3BK3*, Chapter 10, October, 20, 2004.
28. Ebadian, M.A.; "Improved Mixing and Sampling Systems for Vitrification Melter Feeds" U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy Federal Energy Technology Center, 1998.