

Süt Endüstrisi Arıtma Çamuru Pirolizinde Sıcaklığın ve Parçacık Boyutunun Sentez Gaz Oluşumuna Etkisi

H. Kurtuluş ÖZCAN^{*1}, Atakan ÖNGEN¹, Emine ELMASLAR ÖZBAŞ¹

¹İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul

Geliş tarihi: 02.02.2016

Kabul tarihi: 14.03.2016

Özet

Süt endüstrisi atıksu arıtma çamurları genel itibariyle yüksek miktarda organik içeriğe sahiptir. İhtiva ettikleri kalorifik değer bu çamurların alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilmelerine olanak sağlamaktadır. Günümüzde faydalanılabilir enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve artan enerji ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalmasından dolayı alternatif enerji kaynakları için yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Piroliz, biyokütleden enerjiyle birlikte katı (biyo çar) sıvı (biyo yağ) gaz (sentez gaz) ürünlerin üretildiği en önemli termokimyasal proseslerden birisidir. Bu çalışmada, süt endüstrisi arıtma çamuru pirolizinde farklı hammadde boyutunun (<0,5 cm, 1-5 cm, 5-10 cm) ve sıcaklığın (500°C, 750°C) sentez gaz oluşumuna etkisi incelenmiştir. Çalışmada, en yüksek kalorifik değere sahip sente gaz, 1-5 cm hammadde boyutu ve 750°C sıcaklıkta, 4394 kcal/m³ ile elde edilmiştir. Elde edilen sentez gaz miktarları ve ısı değerleri, süt endüstrisi atıksu arıtma çamurlarının alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabileceği öngörüsünü desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler: Piroliz, Arıtma çamuru, Atıktan enerji, Sentez gaz

Effect of Temperature and Particle Size on Dairy Industry Treatment Sludge Pyrolysis

Abstract

Dairy industry wastewater treatment sludge consists of high organic content. The calorific value of wastewater treatment sludge ensures the use of these wastes as an alternative energy resource. New technologies and alternative energy resources have been researched due to ever-increasing need for

* Yazışmaların yapılacağı yazar: H. Kurtuluş ÖZCAN, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul. hkozcan@istanbul.edu.tr

energy and limited available energy resources in the world. Pyrolysis is one of the thermochemical technologies for converting biomass into energy and chemical products consisting of liquid bio-oil, solid biochar, and syngas. This study investigated the change in synthesis gas compounds obtained from the pyrolysis of dairy industry wastewater sludge according to the temperature (500°C, 750°C) different particle size (<0,5 cm, 1-5 cm, 5-10 cm). The highest calorific value of synthesis gas obtained from the tests was calculated as 4394 kcal/m³ with 1-5 cm particle size and at 750°C. Synthesis gas concentration and calorific values obtained from dairy industry waste water sludge supported that this waste could be used as an alternative energy resource.

Keywords: Pyrolysis, Treatment sludge, Waste-to-energy, Syngas

1. GİRİŞ

Piroliz, bir diğer adıyla karbonizasyon, oksijen yokluğunda organik materyallerin ısı ile kimyasal bozunması olarak tanımlanmaktadır. Bilinen en yaygın piroliz prosesi odun kömürü üretimidir. Pratikte, tamamen oksijensiz ortam sağlayabilmek mümkün olamayacağından pirolitik sistemler temelde stokiometrik olarak belirlenen oksijen miktarından daha az miktarda oksijenle yürütülmektedir. Bu bağlamda, yakma ve piroliz arasında 2 temel farklılık bulunmaktadır. Birincisi, yanma reaksiyonları ısıya açığa çıkaran (ekzotermik) süreçlerken, piroliz ısıya ihtiyaç duyan (endotermik) süreçtir. İkinci farklılık ise, yanma ürünleri olarak CO₂, su ve kül elde edilirken piroliz sonucunda katran, yağ, zift ve yakıt gaz eldesi mümkündür [1,2].

Piroliz sonucu elde edilen katı ürünler çar, kül ve biyoyakıttır. Char genellikle piroliz katı ürünlerinin en önemlisidir. Piroliz sonucu elde edilen ürünlerin kimyasal kompozisyonunu piroliz şartları belirlemektedir. Genellikle pirolizde sıcaklığın artmasıyla katı ürün oluşumu azalmaktadır. Katı ürünler ısı ve elektrik üretiminde, gazlaştırma işlemleri için hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca, piroliz işlemi ile üretilen katı ürünler aktifleştirilip aktif karbona dönüştürülmektedir [3]. Piroliz sonrası elde edilen bu yan ürünler yanma işlemi için yakıt olarak kullanılabilirler. Ayrıca, piroliz ile elde edilen yakıt ürünlerinde, yanma ürünlerinde gözlenen sülfür gibi kirleticilerin ihtivası daha düşüktür [4]. Piroliz yararlı enerji (yakıt) ve kimyasal maddelerin üretimi için bağımsız bir

işlem olarak da kullanılabilir. Piroliz, kömür, biyokütle gibi hammaddelere uygulanabileceği gibi, farklı kaynaklardan gelen ve çok değişken miktarlarda ve özelliklerdeki katı atıklar için de uygulanabilecek bir enerji dönüşüm sürecidir [5-7].

Piroliz yöntemleri; ısıtma hızı, biyokütlenin alıkonma süresi ve sıcaklık gibi işlem koşullara bağlı olarak ayrılır. Piroliz işlemi genel olarak üç farklı şekilde yürütülür. Bunlar; yavaş piroliz (geleneksel), flaş piroliz ve hızlı pirolizdir. Her piroliz işlemi sonucunda katı, sıvı ve gaz ürün çıkar ama çıkan ürün oranı olarak bir birinden farklılık göstermektedir [8,9]. Piroliz sıcaklığı başta olmak üzere ısıtma hızı, basınç, parçacık boyutu, piroliz ortamı, katalizör, reaktör geometrisi ve reaksiyon süresi piroliz verimlerini etkileyen parametrelerdir [10]. Sıcaklık piroliz işlemi hem ürün verimi hem de ürün bileşimi açısından etkileyen en önemli faktördür. Sıcaklık ile elde edilen ürün arasında yakın bir ilişki vardır. İşlemin sıcaklık düzeyi arttıkça sıvı ve gaz ürün daha fazla elde edilirken, katı ürün oranında azalma görülür. Piroliz işlemi, sıcaklık değerlerine göre üç safha olarak değerlendirilebilir; birinci safha 100-300°C sıcaklık uygulandığı safhadır ve katı ürünler daha fazla elde edilir. İkinci safha ise 500°C'ye kadar sıcaklık uygulandığı aşamadır bu seviyede elde edilen sıvı ürünlerin miktarı artmaktadır. Üçüncü safha ise 700°C'den yüksek piroliz sıcaklığına ulaşılır ve bu safhadan sonra gaz şeklinde çoğunlukla H₂, CO ve CH₄ elde edilir [11].

Arıtma çamurları atıksuların yapısında bulunan, kendiliğinden çökebilen maddelerin atık sudan

ayrılması veya çeşitli arıtma prosesleri sonucu ortaya çıkan çökelen/yüzdürülen katı maddeleri ifade etmektedir. Arıtma çamurları kaynaklandığı atıksulara bağlı olarak çok farklı fizikokimyasal özelliklerde olabilirler [12]. Arıtma çamurlarının yönetimi ve değerlendirilebilirliği bir çok çalışmacının ilgisini çekmektedir. Evsel atıksu çamurları ya da süt endüstrisi gibi organik madde içeriği yüksek endüstrilerden kaynaklanan arıtma çamurları klasik berteraf yöntemlerine nazaran farklı şekillerde değerlendirilebilmektedir. Günümüzde entegre süt ve süt ürünleri tesislerinin sayısı artmış ve bunun sonucu olarak da bu sanayiden kaynaklanan atıksu miktarı artmıştır. Süt endüstrisi atıksuları yüksek oranda biyolojik parçalanabilir özelliğe sahiptirler ve fiziksel-kimyasal, biyolojik metotlar ile arıtılabilmektedir. Aerobik prosesler, özellikle de aktif çamur tesisleri, süt endüstrisi atıksularının arıtımında sıkça kullanılmaktadır [13]. Bu nedenle bu tesislere ait arıtma çamurları yüksek oranda C ve H içeriğine sahip olmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı bu materyallerin termal yollarla berterafı avantajlı olmaktadır [14]. Modern atık yönetimi prensiplerinde atıkların geri kazanımı ve enerji eldesi öncelikli olmaktadır. Bu bağlamda süt endüstrisi atıksu arıtma çamurları gibi yüksek organik madde içeriğine sahip atıksulardan enerji eldesi modern atık yönetim sisteminin bir parçasıdır.

Bu çalışmada, süt endüstrisi atıksu arıtma tesisi çamurlarının sabit yataklı reaktörde piroliz yöntemiyle değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla farklı sıcaklık ve numune boyutları deneyerek bu parametrelerin oluşan sentez gaz kompozisyonuna etkisi incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür incelendiğinde, piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal yöntemlerin atık yönetiminde sıkça kullanıldığı görülmektedir. Bu işlemler daha çok kömürün gazlaştırılması için kullanılsa da, farklı atık türlerinin pirolizine ve gazlaştırılmasına dair bir çok çalışma bulunmaktadır [15-17]. Arıtma çamurları içerdiği yüksek oranda karbonlu bileşikler dolayısıyla piroliz işlemine uygun

atıklardır. Bu nedenle bir çok araştırmacı hem evsel nitelikli arıtma çamurlarının hem de çeşitli endüstrilerden kaynaklanan çamurların termokimyasal berterafını çalışmışlardır. Han ve arkadaşları [18] çalışmalarında evsel nitelikli arıtma çamurlarının pirolizinde sentez gaz oluşumunu incelemişlerdir. Farklı sıcaklıklar için (500°C, 700°C ve 900°C), sentez gaz kompozisyonunda H₂, CO, CH₄ ve CO₂ bileşenlerinin hacimsel yüzdelere ölçmüşlerdir. Ayrıca pirolizden elde edilen sentez gazın kalorifik değerini de belirlemişlerdir. Çalışmada H₂ ve CH₄ açısından zengin sentez gazın 700°C üzerinde elde edildiğini bulmuşlardır.

Liu ve arkadaşları [19] endüstriyel kaynaklı arıtma çamurlarının pirolizini incelemişlerdir. Çalışmada kimya ve kereste endüstrisinden temin edilen arıtma çamurları kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen bulgulara göre piroliz prosesinde materyallerin temel bozunma aralığı 200°C ile 600°C arasında olmaktadır. Ayrıca piroliz prosesi ile yaklaşık olarak %40 oranında hacimsel atık azaltımı olduğu belirtilmiştir.

Yuan ve arkadaşları [20] çalışmalarında, evsel nitelikli arıtma çamurlarından elde edilen biochar maddesinin karakterizasyonunu yapmış ve bu maddenin tarımsal uygulamalardaki kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada 300°C ile 700°C arasında değişen sıcaklıklarda piroliz işlemi uygulanmıştır. Piroliz reaksiyonlarında oksijensiz ortamı sağlamak adına 1 L/dk akış hızında azot gazı kullanmışlar ve biochar oluşumunun artan sıcaklığa bağlı olarak azaldığını ortaya koymuşlardır.

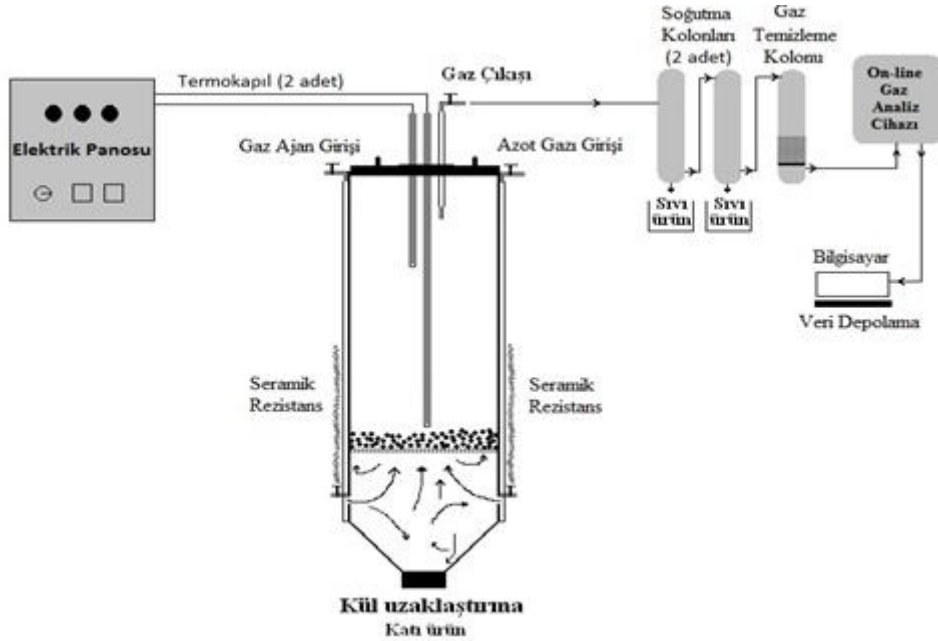
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada süt endüstrisine ait susuzlaştırılmış atıksu arıtma çamuru numunesi kullanılmıştır. Çamur numuneleri <0,5 cm; 1-5 cm; 5-10 cm şeklinde 3 boyutta ayrılmış, ve her birine 500 ve 750°C'de piroliz işlemi uygulanmıştır. Piroliz deneyleri 2 L hacimli sabit yataklı çelik reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaktör, yardımcı olarak

kullanılan gazların (kuru hava, azot vb.) girişine imkan verecek iki adet gaz girişi hattına ve üretilen gazın çıkmasına olanak sağlayan bir adet çıkış hattına sahiptir. Reaktör ağzından gaz kaçağı

olmasını engellemek için saf grafit veya grafit-kurşun sarmal contalar kullanılmıştır (Şekil 1). Piroliz deneylerinde sürükleyici gaz olarak N_2 kullanılmıştır.



Şekil 1. Piroliz reaktörü ve analiz sisteminin şematik gösterimi

3.2. Analitik Yöntem

Piroliz süresince oluşan gazın içerisindeki CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , ve O_2 miktarları hacimsel yüzde olarak ölçülmüştür. Sentetik gaz ölçümleri için ABB marka AO2020 model sürekli gaz analizörü kullanılmıştır. Bu analizler sonucunda elde edilen ölçüm değerleri gaz analiz cihazından veri aktarım kablosu aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve kaydedilmiştir. Elementel analiz deneylerinde, Truspec CHN-S elementel analiz cihazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan arıtma çamuru örneklerinin fiziksel ve kimyasal bazı özelliklerini belirlemek için, nem içeriği, kül içeriği, yanma kaybı ve katı madde içeriği deneyleri standard metotlara göre yürütülmüştür [21, 22].

Çalışmalar sonucunda elde edilen sentez gazların ısı değerlerinin hesaplanması için gaz kompozisyonu içerisinde bulunan CO , H_2 ve

CH_4 'e ait üst ısı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Isıl değer hesaplamaları Çizelge 1'de verilen ısı değerlerinin yardımıyla matematiksel olarak hesaplanmıştır [23].

Çizelge 1. Bazı gazların üst ısı değeri

Gazlar	Yoğunluk (kg/m^3)	MJ/m^3	$kcal/m^3$
CO	1,25	12,64	3020
CH_4	0,71	39,82	9520
H_2	0,08	12,77	3050

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

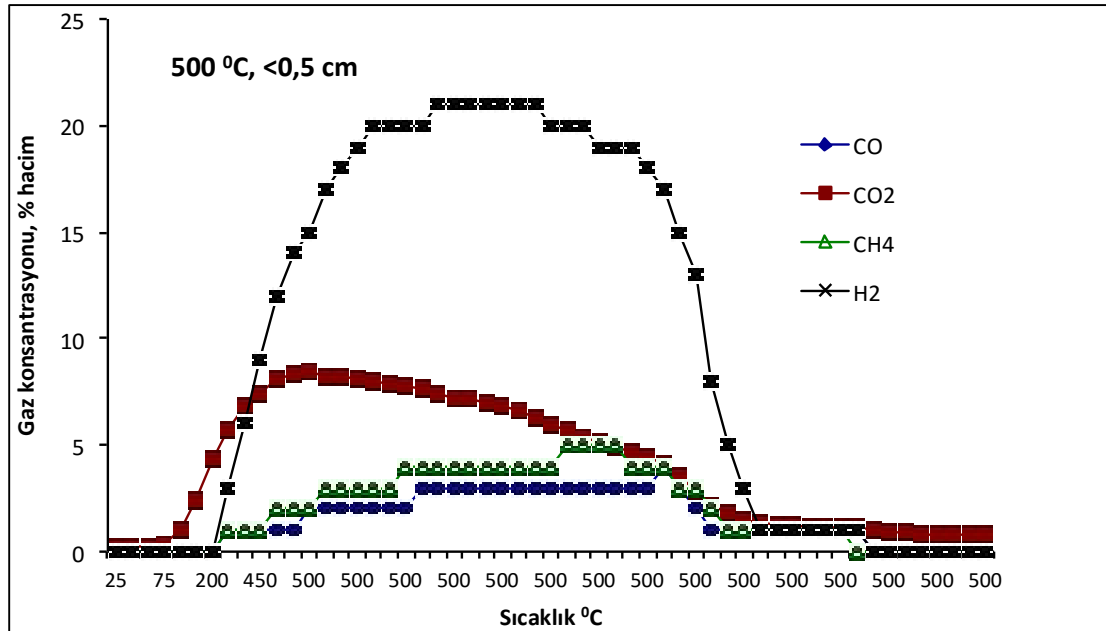
Çalışmanın birinci kısmında, deneylerde kullanılacak süt endüstrisi atıksu arıtma çamurunun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla elementel analiz, nem oranı, kül miktarı, yanma kaybı, ve

katı madde miktarı belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de sunulmuştur. Birçok biyokütle kaynağı piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal proseslere uygun olmasına rağmen, ideal olarak hammaddenin nem içeriği %5-35 aralığında olması istenir. Çizelge 2 incelendiğinde; arıtma çamuru örneklerinin nem içeriğinin %19,85 olduğu görülmektedir. Ayrıca %79,5 kül içeriğine sahip olması örneklerin yüksek miktarda organik içeriğe sahip olduğunun bir göstergesidir. Kalorifik değeri yüksek sentez gaz, daha çok karbon ve hidrojen içeriğe sahip yakıtlardan elde edilmektedir. Bu nedenle, piroliz denemelerine başlamadan önce ham arıtma

çamurunu numunesinin elementel analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda numunenin %47,87 karbon ve %8,19 hidrojen içerdiği tespit edilmiştir (Çizelge 2). Bu değerler süt endüstrisi arıtma çamuru örneklerinin piroliz yöntemi için uygun bir hammadde olduğunun bir diğer göstergesidir. Parçacık boyutunun piroliz işlemine etkisini belirleyebilmek adına, üç farklı boyutta ve iki farklı sıcaklıkta deneyler yürütülmüştür. 500°C sıcaklıkta, <0,5 cm, 1-5 cm ve 5-10 cm boyutlu örnekler için elde edilen sentez gaz kompozisyonun zamansal değişimleri Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Ham arıtma çamurunun fiziko-kimyasal özellikleri

Kimyasal Analiz, % ağırlık					
Nem	Kül	Yanma Kaybı	Katı Madde		
19,85	79,5	20,4	95,3		
Elementel Analiz, %					
		C	H	N	S
		47,87	8,19	3,99	-

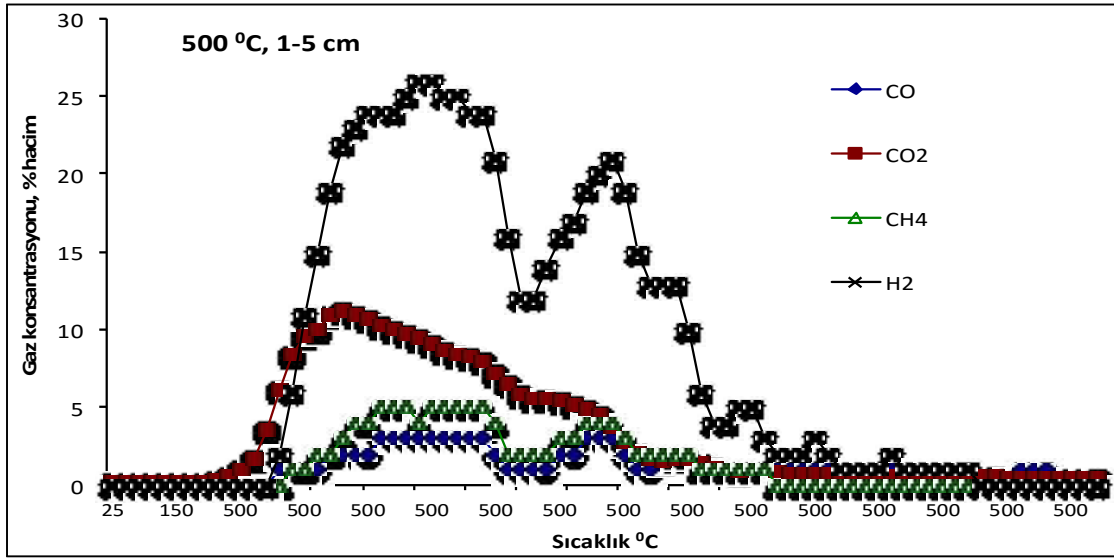


Şekil 2. 500°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (Tanecik boyutu <0,5 cm)

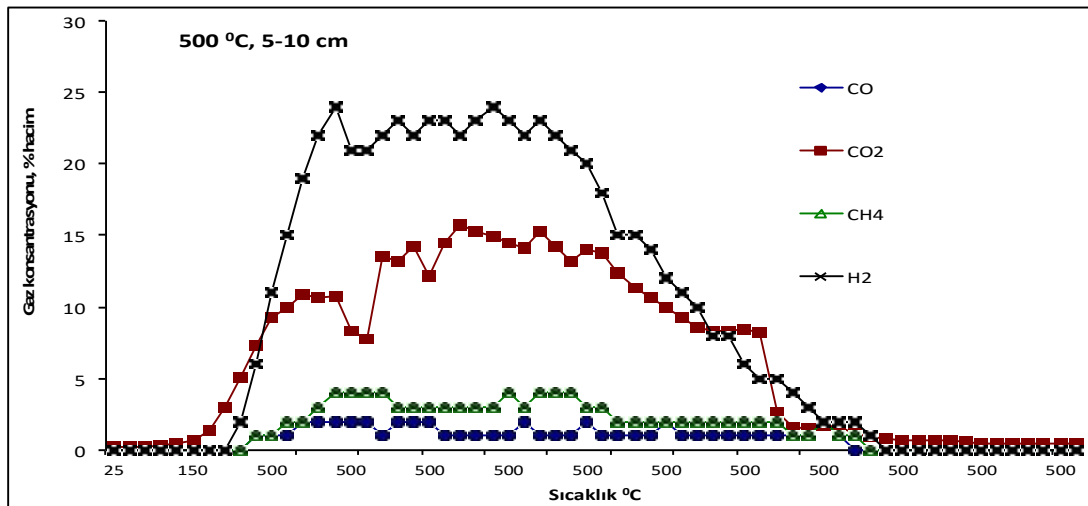
Şekil 2 ve Şekil 3 incelendiğinde; arıtma çamuru örneklerinin termal bozunumunda <0,5 ve 1-5 cm örnekleri için benzer gaz kompozisyonunun olduğu görülmektedir. Her iki parçacık boyutu için 250-300°C civarında sentez gaz oluşumu gözlemlenmeye başlamış ve 500°C sıcaklığa ulaşıldığında sentez gaz bileşenleri maksimum seviyelerine ulaşmıştır. <0,5 boyutunda, H₂ yüzdesi, 450-500°C sıcaklıkları arasında

%19-21 ile maksimum değerine ulaşırken, aynı sıcaklık aralığında, ısıl değer açısından önem taşıyan CH₄ ve CO gazlarının yüzdeleri sırasıyla %5 ve %3 olarak tespit edilmiştir. 1-5 cm örnekleri için elde edilen H₂ değerlerinin en yüksek seviyesi %26 olarak ölçülmüştür (Şekil 3).

CH₄ ve CO ise <0,5 örnekleri ile benzer şekilde sırasıyla %5 ve %3 olarak ölçülmüştür.



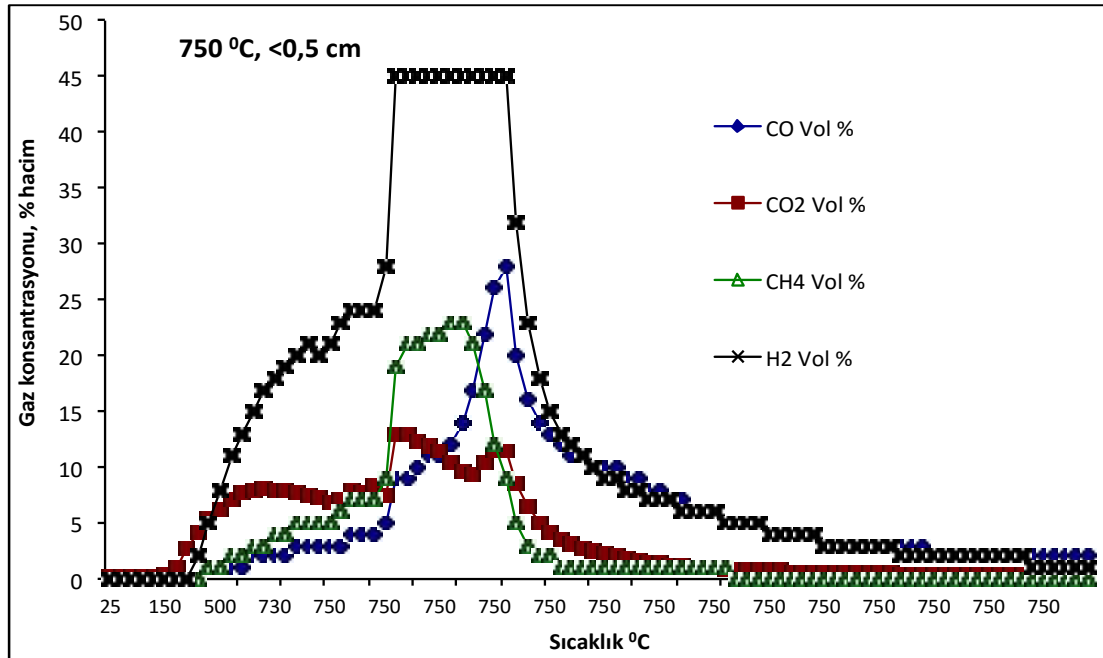
Şekil 3. 500°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (tanecik boyutu 1-5 cm)



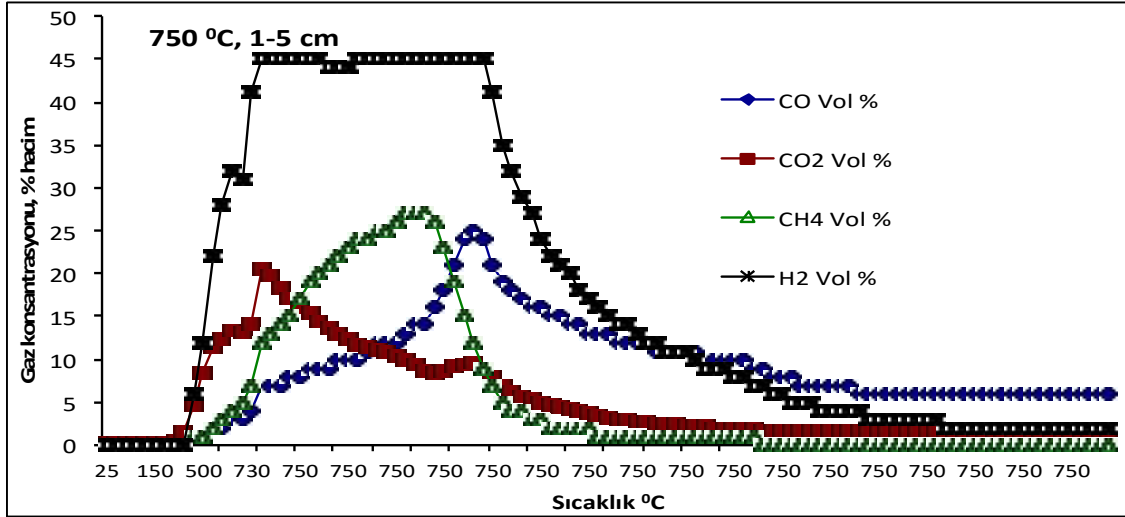
Şekil 4. 500°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (tanecik boyutu 5-10 cm)

5-10 cm boyutlu örneklerin pirolizinden elde edilen sentez gaz bileşimi incelendiğinde, diğer iki parçacık boyutundan farklı olarak H₂ değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir (Şekil 4). H₂ değerinin en yüksek seviyesi bu deneyde %24 olarak ölçülmüştür. CH₄, bu denemede %4 olarak tespit CO ise, %2 olarak ölçülmüştür. Bu verilerin ışığında, 500°C de yapılan piroliz deneylerinde parçacık boyutunun değişiminin sentez gaz kompozisyonunu etkilediği anlaşılmaktadır. Sentez gazın CH₄, H₂ ve CO bileşenlerinin yüksek olması doğal olarak ısı değeri arttırmaktadır. Bu doğrultuda, 500°C pirolizlerde elde edilen sentez gazın en yüksek ısı değeri, 1359 kcal/m³ ile 1-5 cm parçacık boyutunda hesaplanmıştır. Diğer ısı değerleri ise 5-10 cm parçacık boyutu için 1173,2 kcal/m³, <0,5 parçacık boyutu için 1176 kcal/m³ olarak bulunmuştur. En yüksek ısı değeri, 450-500°C sıcaklık aralığında elde edilmiştir. Sıcaklığın piroliz ürünlerine olan etkisini incelemek amacıyla aynı parçacık boyutları için 750°C’de denemeler yapılmıştır. Bu denemelere ait sentez gazların sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de

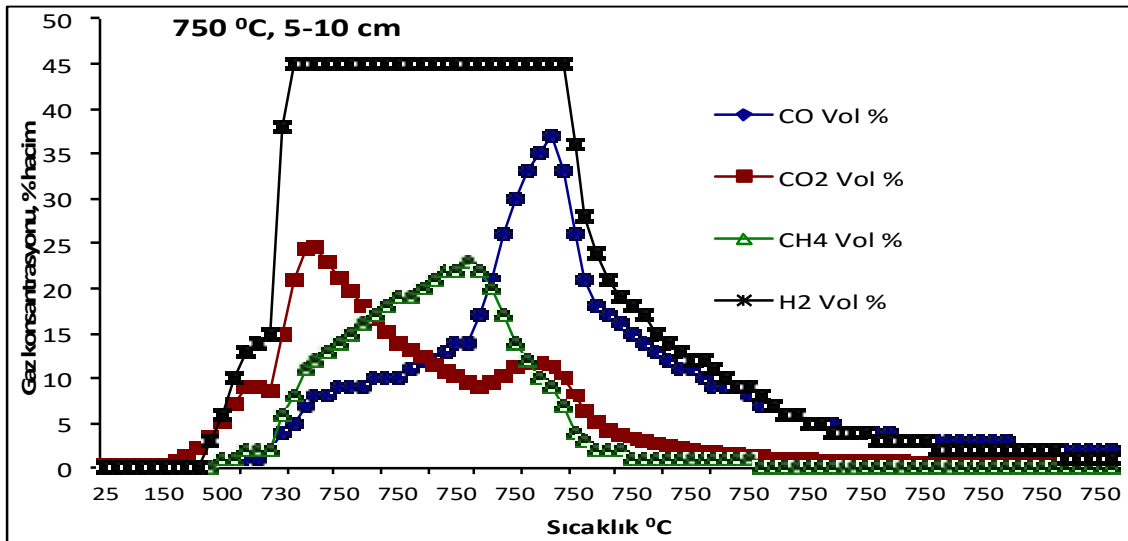
sunulmuştur. 500°C’de yapılan pirolizlere benzer olarak, bu deneylerde de 250°C civarında numunenin bozunmaya başladığı belirlenmiş, özellikle 500°C ve üzerindeki sıcaklıklarda sentez gaz miktarlarının giderek arttığı ve 700-750°C aralığında maksimum mertebelere ulaştığı gözlenmiştir. Şekil 5 incelendiğinde <0,5 cm parçacık boyutu için H₂ gazının oluşumunun 300°C den sonra hızla arttığı ve 750°C’de %45 ile maksimum seviyesine ulaştığı görülmektedir. CH₄ ve CO gazları da benzer bir artışla 750°C’de en yüksek değerlerine ulaşmışlardır. CH₄ ve CO gazlarının bu deneylerde ölçülen en yüksek değerleri sırasıyla %23 ve %28’dir. Şekil 6 ve Şekil 7’de sunulan 1-5 cm ve 5-10 cm parçacık boyutlarından elde edilen sentez gaz bileşimi de <0,5 parçacık boyutundan elde edilen gaz bileşimiyle benzerlik göstermektedir. H₂, CH₄ ve CO kompozisyonları incelendiğinde bütün parçacık boyutları için H₂’nin en yüksek değeri %45 olarak hesaplanmıştır. 1-5 cm parçacık boyutu için, CH₄ ve CO gazlarının maksimum yüzdeleri sırasıyla %27 ve %25, 5-10 cm için %23 ve %37 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. 750°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (Tanecik boyutu <5 cm)



Şekil 6. 750°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (Tanecik boyutu 1-5 cm)



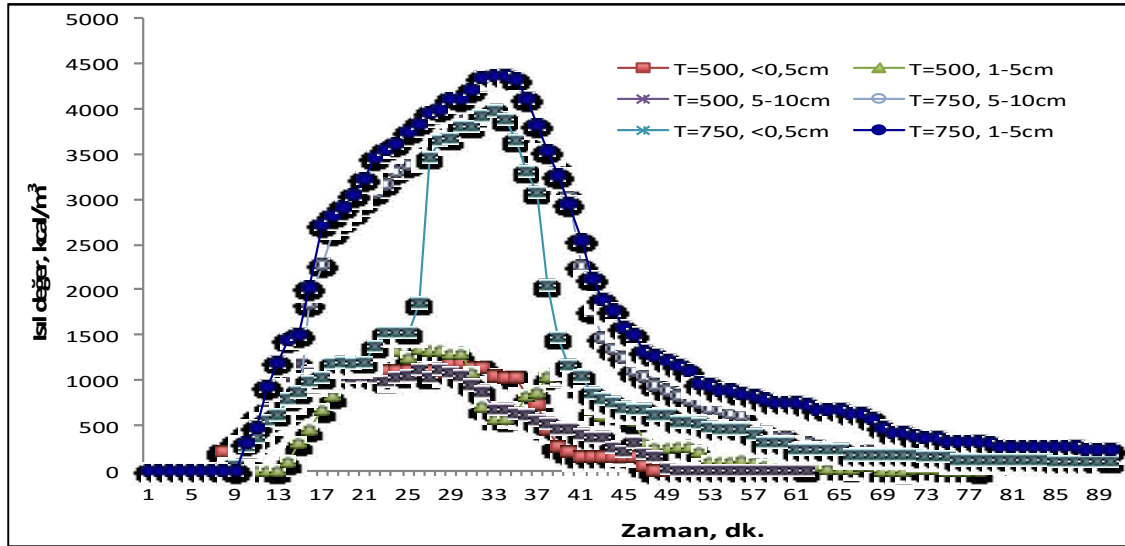
Şekil 7. 750°C piroliz işlemine ait sentez gaz analiz sonuçları (Tanecik boyutu 5-10 cm)

750°C'de yapılan pirolizden elde edilen sentez gazların ısı değerleri incelendiğinde, bütün parçacık boyutları için 4000 kcal/m³ civarında olduğu görülmektedir. 500°C ile kıyaslandığında bu değerler oldukça yüksektir. 750°C'de ulaşılan en yüksek ısı değerleri <0,5 cm boyutunda 4014 kcal/m³, 1-5 cm için 4394 kcal/m³ ve 5-10 cm için 4016 kcal/m³ olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresince yürütülen tüm denemeler sonucunda elde edilen gaz formlarının yüzdelere kullanarak her

deneme için ısı değerleri hesaplanmıştır Şekil 8'de gösterilmiştir. Deneylerde 20 ve 35. dakikalar arasında reaksiyonların olgunlaştığı ve örneğin uçucu kısmının önemli oranının reaktörden uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Isı değerleri incelendiğinde 750°C'de maksimum ısı değerleri ulaşıldığı tespit edilmiştir. Hesaplanan ısı değerlerine göre sistemden en yüksek verimin 750°C'de 1-5 cm boyutunda taneciklerle alındığı tespit edilmiştir. 750°C'de <0,5 cm boyutundaki

taneciklerle 5-10 cm boyutundaki taneciklerde ısı değerlerinin birbirine yakın seviyelerde olduğu hesaplanmıştır. 500°C’de yürütülen piroliz deneylerinde parçacık boyutunun artmasının deney sonrasında elde edilen katı kalıntı miktarını arttırdığı ve sentez gaz verimini düşürdüğü görülmektedir (Çizelge 3). Söz konusu sıcaklıklarda yürütülen piroliz deneylerinde en az katı kalıntı ve en yüksek sentez gaz verimine 1-5 cm parçacık boyutunda ulaşılmıştır. 750°C’de

yürütülen deneyler incelendiğinde, parçacık boyutunun elde edilen sentez gaz ve diğer ürünleri (sıvı, katı) çok fazla etkilemediği görülmektedir (Çizelge 3). 750°C sıcaklık için 500°C’ye nazaran daha az katı ve daha fazla gaz ürün elde edilmiştir. Bu durum artan sıcaklıkla birlikte organik maddenin daha yüksek oranda sistemden uzaklaştığının ve sıcaklığın parçacık boyutuna nazaran sentez gaz ve diğer ürünlerin oluşumuna daha etkili olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 8. Piroliz süresine bağlı olarak ısı değerlerinin değişimi

Çizelge 3. Piroliz deneyleri sonucunda elde edilen sıvı ve katı ürün miktarı

Piroliz Şartları	Hammadde (g)	Sıvı Ürün (g)	Katı Ürün (g)	Sentez Gaz (g)
<0,5 cm, 500°C	100	25	30	45
1-5 cm, 500°C	100	16	35	49
5-10 cm, 500°C	100	26	34	40
<0,5 cm, 750°C	100	22	26	52
1-5 cm, 750°C	100	20	27	53
5-10 cm, 750°C	100	22	25	53

4. SONUÇ

Süt endüstrisi arıtma çamuru pirolizinde sıcaklık ve parçacık boyutu için optimum işletim şartlarının belirlenmesi ve proses verimi üzerinde yapılan bu

çalışmaya göre, arıtma çamuru kekinde tanecik boyutu arttıkça ısı değerinde düşüş görülmektedir. Tanecik boyutu ve sıcaklığın elde edilen sentez gaz bileşimine etkisi incelendiğinde, sıcaklığın etkisinin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Her

ne kadar parçacık boyutu sentez gaz oluşumunu etkilese de, yeterli sıcaklığı ulaşıldığında, parçacık boyutunun elde edilen gaz kompozisyonuna olan etkisinin sıcaklığa nazaran daha az olduğu görülmüştür (Şekil 8). Yürütülen iki farklı sıcaklıkta elde edilen sentez gazlar için elde edilen en yüksek ısı değerleri, 500°C için 1359 kcal/m³, 750°C için 4394 kcal/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçla piroliz sıcaklığının ısı değeri üzerine olan etkisi net olarak gözlenmiştir.

Bu çalışmayla süt endüstrisi atıksu arıtma çamurunun önemli ölçüde ısı değeri sahip olduğu ve termal proseslere uygun bir atık olduğu ortaya konulmuştur. Enerjinin geri kazanımı ve atıklardan enerji eldesi her geçen gün önemini arttırmaktadır. Özellikle arıtma çamurlarının yönetimi konusunda termal yöntemlerin uygulanmasıyla, özellikle organik içeriği yüksek olan arıtma çamurları çevresel bir sorun olmaktan öte alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Böylelikle çevresel bir sorunun çözümüyle birlikte ekonomik kazanç da sağlanmış olacaktır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından Desteklenmiştir (Proje numarası: 26108).

6. KAYNAKLAR

1. Ridout A., Carrier M., Collard F.X., Görgens J., 2016. Energy Conversion Assessment of Vacuum, Slow and Fast Pyrolysis Processes for Low And High Ash Paper Waste Sludge, *Energy Conversion and Management*, 111: 103–114
2. Toraman Y., Topal H., 2003. Katı Atık ve Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesinde Alternatif Termal Teknolojiler ve Uygulamaları Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(1):19-33
3. Özcan H.K., Öngen A., Elmaslar Özbaş E., Sivri N., Pangaliyev Y., 2015. Atık Lastiklerden Termokimyasal Yöntemlerle Katı ve Sıvı Ürün Eldesi, 7. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi, Gaziantep, Türkiye, 14-16 Ekim 2015.
4. Öngen A., 2011. Endüstriyel Atıklardan Termokimyasal İşlemlerle Sentez Gaz (Syngas) Üretimi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. Ganesapillai M., Manara, P., Zabaniotou A., 2016. Effect of Microwave Pretreatment on Pyrolysis of Crude Glycerol-Olive Kernel Alternative Fuels, *Energy Conversion and Management* 110: 287–295.
6. Chen W., Shi S., Zhang J., Chen M., Zhou, X., 2016. Co-pyrolysis of Waste Newspaper with High-Density Polyethylene: Synergistic Effect and Oil Characterization, *Energy Conversion and Management*, 112: 41–48.
7. Haydarya J., Susa D., Gelinger V., Cacho F. 2016. Pyrolysis of Automobile Shredder Residue in a Laboratory Scale Screw Type Reactor, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4: 965–972
8. Pangaliyev Y., 2014. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerden Piroliz/Gazlaştırma ile Değerlendirilebilir Ürün Eldesi, Master Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
9. Chhiti Y., Kemiha M., 2013. Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review, *The International Journal of Engineering And Science*, 2 (3), 75-85.
10. Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P., 2016. Effect of Process Parameters on Production Of Biochar From Biomass Waste Through Pyrolysis: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 467-481.
11. Basu, P., 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis, Elsevier, ISBN: 978-0-12-374988-8
12. Aşık B.B., Katkat A.H., 2004. Gıda Sanayi Arıtma Tesisi Atığının (Arıtma Çamuru) Tarımsal Alanlarda Kullanım Olanakları Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 18(2): 59-71.
13. Gürtekin E., 2009. Ardışık Kesikli Reaktörde Süt Endüstrisi Atıksularının Biyolojik Arıtımı, Selçuk Üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Dergisi, 24(1): 1-6.
14. Han R., Zhao C., Liu J., Chen A., Wang H., 2015. Thermal Characterization and Syngas Production from the Pyrolysis of Biophysical

- Dried and Traditional Thermal Dried Sewage Sludge, *Bioresource Technology*, 198: 276–282.
15. Omoriyekomwan J.E., Tahmasebi A., Yu J., 2016. Production of Phenol-rich Bio-oil During Catalytic Fixed-bed and Microwave Pyrolysis of Palm Kernel Shell, *Bioresource Technology*, 207: 188–196
 16. Chen W., Shi S., Zhang J., Chen M., Zhou X., 2016. Co-pyrolysis of Waste Newspaper with High-Density Polyethylene: Synergistic Effect and Oil Characterization, *Energy Conversion and Management* 112: 41–48.
 17. Bartocci P., D'Amico M., Moriconi N., Bidini G., Fantozzi F., 2015. Pyrolysis of Olive Stone for Energy Purposes, *Energy Procedia*, 82: 374-380.
 18. Han R., Zhao C., Liu C., Chen A., Wang H., 2015. Thermal Characterization and Syngas Production from the Pyrolysis of Biophysical Dried and Traditional Thermal Dried Sewage Sludge, *Bioresource Technology*, 198: 276-282.
 19. Liu G., Song H., Wu J., 2015. Thermogravimetric Study and Kinetic Analysis of Dried Industrial Sludge Pyrolysis, *Waste Management*, 41: 128–133.
 20. Yuan H., Lu T., Huang H., Zhao D., Kobayashi N., Chen Y., 2015. Influence of Pyrolysis Temperature on Physical and Chemical Properties of Biochar made from Sewage Sludge, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112: 284–289.
 21. SM 2540 E, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, Franson.M.H., American Public Health Association, ISBN:0-87553-235-7.
 22. SM 2540 B, 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, Franson.M.H., American Public Health Association, ISBN:0-87553-235-7.
 23. Waldheim L, Nilsson T., 2001. Heating Value of Gases From Biomass Gasification. Report prepared for: IEA Bioenergy Agreement, Task 20 - Thermal Gasification of Biomass, Report no: TPS-01/16, TPS Termiska Processer AB.

