

BELEDİYE ATIKLARINDAN DÜZENLİ DEPOLAMA SAHALARINDA BİYOGAZ VE ENERJİ ÜRETİMİ

Turgay Kankılıç*

turgaykankilic@gmail.com

Hüseyin Topal

Doç. Dr.,

Gazi Üniversitesi,

Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara

htopal@gazi.edu.tr

ÖZ

Günümüzde temel enerji kaynaklarının ömürlerinin belirlenmesiyle enerji tasarrufu, tüm ülkelerin ortak hedefi olmuştur. Yenilenebilir enerji üzerinde yoğunlaşan yönetimler bu yönde teşviklerle çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu çalışmada amaç, kentsel atıklardan enerji üretim teknolojilerinin değerlendirilmesinin bir incelenmesidir. Belediye atıklarından enerji üretmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu teknolojiler temelde düzenli depolama gazı üretme ve anaerobik çürütmedir. Bu metotlar kullanılarak çöp gazı (biyogaz) üretimi yapılabilir ve en uygun yakma teknolojileri kullanılarak ısı enerjisi üretilir. Bu enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürerek elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilir. Bu çalışmada, dünyada depo gazı üretimi ve depo gazının kullanılmasıyla ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada, tasarlanan atık ısı kazanı ve buhar türbini ile gaz motoru milinden üretilen 2x1,2 MWe elektrik enerjisinin yanında, baca gazlarından 512 kWe elektrik enerjisi üretilebileceği belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin elektrik verimi ise %43,1 olarak hesaplanmıştır. Ülkemizde depo gazı üretimi ve kullanımı yönünde araştırma yapılmış ve bu araştırmalar değerlendirilmiştir. Sonuçta, bu türde gaz motoru kullanan işletmelerde atık ısının elektrik üretiminde kullanılmasının avantajları ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik çürütücü, belediye atıkları, biyogaz, enerji kazanımı, elektrik üretimi

PRODUCTION OF SOLID BIOGAS AND ENERGY IN SANITARY LANDFILL FROM MUNICIPAL WASTE

ABSTRACT

Energy saving by lives to determining the present primary energy resources has emerged as the common target of all countries. The government are continuing their work focuses on renewable energy, with incentives in this direction. The aim of this study is to evaluate energy generation technologies from urban waste. Several technologies are available to convert waste into energy. Basically, this methods are production of landfill gas, and anaerobic digestion. A production of solid waste gas is made with this way. Using the most suitable combustion technologies heat energy is generated. The mechanical energy conversion power generation is performed. In this study, the world is made literature relates to the use and to production of landfill gas. In this study, design of waste heat boiler was calculated 2x1.2 MWe energy with production of energy that was found 512 kWe. Design of waste heat boiler was determined electricity energy efficiency that was found % 43.1. Research conducted in our country in terms of production and utilization of landfill gas, and this research were evaluated. In conclusion, heat of waste gas should be used for the production of the electricity in energy production sectors from landfills.

Keywords: Anaerobic digester, municipal waste, biogas, energy recovery, electrical energy production

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 09.07.2015

Kabul tarihi : 01.10.2015

Kankılıç, T., Topal, H. 2015. "Belediye Atıklarından Düzenli Depolama Sahalarında Biyogaz ve Enerji Üretimi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 669, s.58-69.

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşan sera gazları, küresel iklim değişiklikleri meydana getirmekte ve çevre için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Dünyada sera gazı ve antropojenik metan gazı emisyonlarının dağılım oranlarına bakıldığında metan %16'sını oluşturmaktadır. Her ne kadar CO₂ oranı %55 olarak görülse de karbondioksit oranla metan 25 defa daha etkili olmasından dolayı metan gazı miktarının azaltılması büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla, metanın enerji kaynağı olarak kullanılması diğer enerji kaynaklarının tüketilmesini önlemekte ve sera etkisini azaltmaktadır [1].

Belediye atıklarından düzenli depolama ile veya oksijensiz (anaerobik) çürütme yöntemleriyle elde edilen biyogaz (LFG) kojenerasyon sistemlerinde, içten yanmalı motor kullanılarak yakılması sonucu enerji üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, motor egzoz gazı atık ısı kazanlarında kullanılarak buhar elde edilmesi ve buharın türbin-jeneratör grubunda elektrik enerjisine dönüştürülmesi irdelenmiştir.

Atıkların arazide depolanması, atık bertaraf yöntemlerinin en eskisi ve en çok kullanılanıdır. Katı atıkların gelişigüzel atılması maalesef ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevre ve insan sağlığı açısından çok sayıda olumsuzluklar taşıyan bu bertaraf şeklinin sakıncalarından bazıları; çöplerden çıkan kötü kokuların çevredekileri rahatsız etmesi, çöplerin rüzgârla etrafa dağılarak görüntü kirliliğine sebep olması, sinek, fare gibi insan sağlığını olumsuz etkileyen canlıların barınma ve üreme yeri olması, çöplerden çıkan sızıntı sularının yeraltı ve yerüstü sularını kirletmesi, çöplükte açığa çıkan metan gazından dolayı sık sık yangın çıkması ve metan gazının patlama riskini taşıması olarak sayılabilir. Düzenli depolama ise basit olarak katı atıkların, sızdırmazlığı sağlanmış büyük alanlara dökülmesi, sıkıştırılması ve üzerinin örtülerek tabii biyolojik reaktör haline getirilmesi olarak tanımlanabilir [2].

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Doğanın korunması için çöplük gazlarının yakılması zorunludur. Bu, bir gaz yakma bacasında, kazanda, bir gaz motorunda veya bu üçünün kombinasyonundan oluşan bir sistemde gerçekleştirilebilmektedir [3].

Çöp gazlarının, gaz yakma bacasında yakılması, enerjinin imha edilmesi anlamına geliyor ki, bu pek mantıklı bir çözüm değildir. Gazların

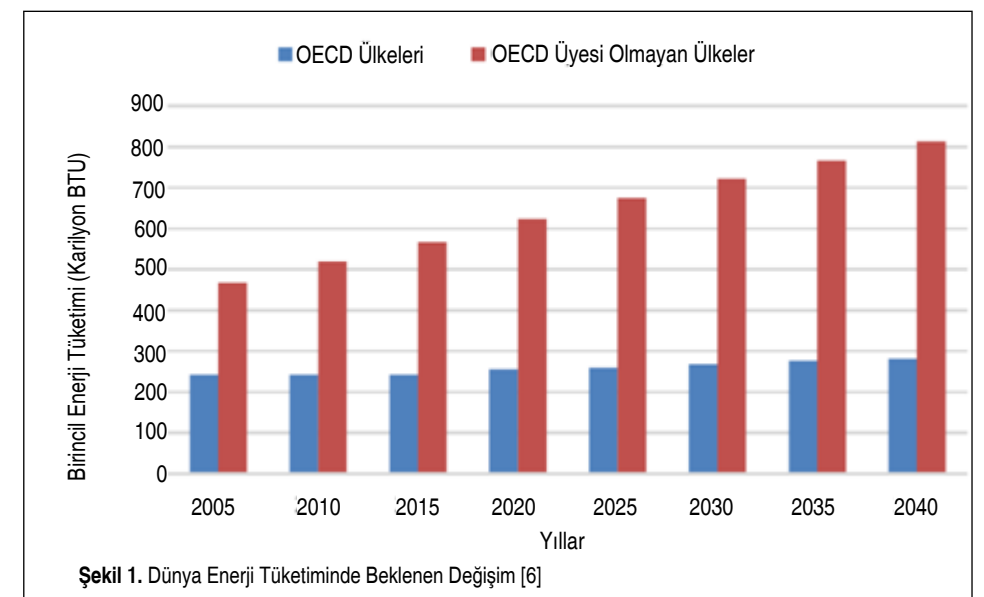
kazanlarda yakılması da genelde pek geçerli bir çözüm değildir; çünkü çöplükler, üretilen ısıyı değerlendirebileceğimiz max. 1500 metre uzaklıkların ötesindedir [3].

Kıvılcım ateşlemeli (Otto) gaz motoru aracılığıyla çöp toplama sahalarında elektrik enerjisi üretilmektedir. Elektrik, hem ısıdan daha değerli bir enerjidir hem de kolayca uzun mesafelere taşınabilmektedir. Elektrik üretiminin yanında, motorun atık ısılarının değerlendirilmesi durumunda ise daha da büyük bir yarar sağlanmaktadır [3].

Gaz motorlu bileşik üretim sistemine giren enerjinin %65'i ısı yoluyla kaybolur. Isı geri kazanım eşanjörleri ile bu atığın %80'i geri kazanılır. Böylece, örneğin %35 verimle çalışan jeneratörün toplam verimi %87'ye ulaşır. Ancak bir bileşik santralde değerlendirilmesi gereken ana konu, toplam verimin yüksekliğinden çok ısıya göre 5-7 katı daha pahalı bir enerji olan elektrik veriminin yüksekliğidir [4].

Bir atık ısı enerji geri kazanma tesisinin verimi, atmosfere bırakılan gaz miktarı ve sıcaklığı ile direkt ilgilidir. Verimi yükseltmek için atık gazın sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Basit çevrimli (Simple-Cycle Generation) Gaz Turbo-Jeneratörlerinden atmosfere ortalama 450-530°C'de bırakılan gazlar, bir atık ısı kazanından geçirilir ve 100-150 °C seviyelerine düşürülerek ilave ısı ve/veya elektrik enerjisi elde edilir. Bu suretle, toplam çevrim verimi %30'lardan %45-75'ler mertebesine yükseltilmiş olur [5].

Teknolojik gelişmeler, dünya nüfusundaki artış, insanların refah seviyesindeki artış gibi sebeplerle dünyada enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Şekil 1'de, Amerikan Enerji Ajansı (APEA) verilerine göre, 2005 ve 2040 yılları arasında OECD ülkelerindeki enerji tüketiminin fazla değişmeyeceği beklenmesine rağmen, OECD üyesi olmayan ülkelerin enerji tüketimi

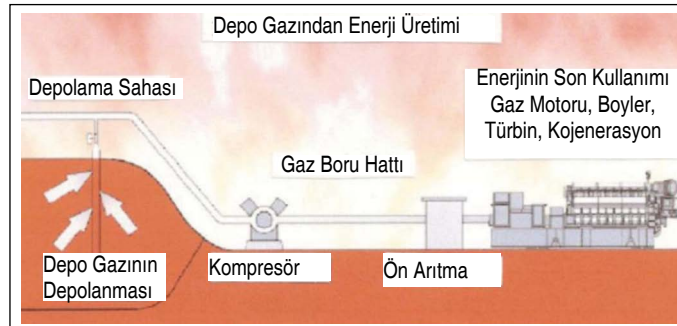


Şekil 1. Dünya Enerji Tüketiminde Beklenen Değişim [6]

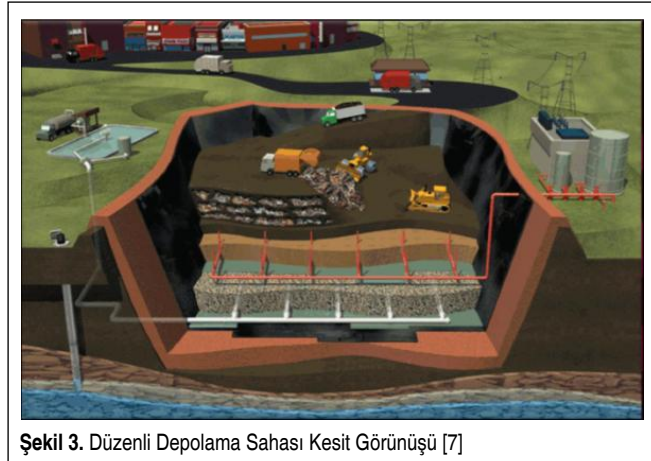
minde yaklaşık %75'lik bir artış (2005 yılında 467×10^{15} BTU (British Thermal Unit), 2040 yılında 813×10^{15} BTU) beklenmektedir [6].

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) verilerine göre, enerji sektörüne üçte ikisi OECD dışı ülkelerde olmak üzere, toplam 42,2 trilyon dolar yatırım yapılacağı tahmin edilmekte olup, bu yatırımların 6,5 trilyon dolarının ise yenilenebilir enerji sektörüne yapılması beklenmektedir [6].

Depo gazından enerji geri kazanımı için dört ana yol mevcuttur. Bunlar; direkt ısıtma, elektrik üretimi, boru hattı kalitesinde gaz saflaştırma ve kimyasal besleme stok yöntemidir [7]. Depo gazından enerji üretim sisteminin genel gösterimi Şekil 2'de verilmiştir [7].



Şekil 2. Depo Gazından Enerji Üretim Sistemi [7]



Şekil 3. Düzenli Depolama Sahası Kesit Görünüşü [7]

Düzenli bir depolama sahasının kesit görünüşü Şekil 3'te verilmiştir.

Biyogaz üç evrede oluşur [8, 9, 10, 11, 12]. Bunlar;

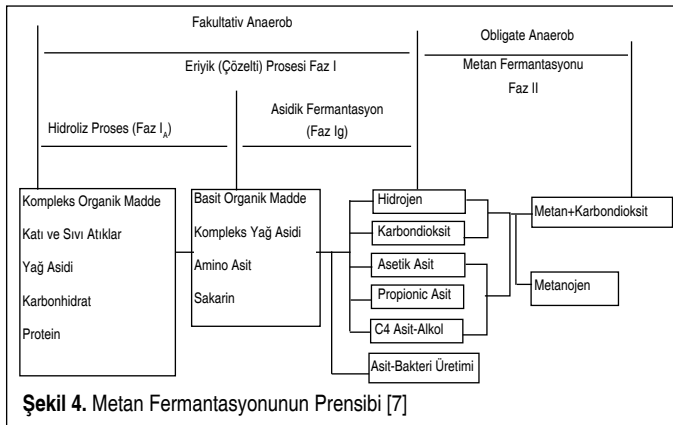
- Hidroliz
- Asit Oluşturma
- Metan Oluşum

Hidroliz Aşaması: İlk aşamada, mikroorganizmaların salgıladıkları enzimler ile çözünür halde bulunmayan maddeler çamur içerisinde çözünür hale dönüşürler. Uzun zincirli kompleks karbonhidratları, proteinleri, yağları ve lipitleri kısa

zincirli yapılara dönüştürürler. Bu basit organiklere dönüşüm sonucunda birinci aşama olan hidroliz tamamlanmış olur [9].

Asit Oluşturma Aşaması: Çözünür hale dönüşmüş organik maddeleri asetik asit, uçucu yağ asitleri, hidrojen ve karbondioksit gibi küçük yapıli maddelere dönüşür. Bu aşama, anaerobik bakteriler ile gerçekleştirilir. Bu bakteriler metan oluşturucu bakterilere uygun ortam oluştururlar. Metan fermentasyonunun prensibi Şekil 4'te gösterilmiştir [7].

Metan Oluşumu Aşaması: Anaerobik olan mikroorganizmalar metan üreten mikroorganizmalar olarak adlandırılırlar. Bu aşamada metan oluşumu hız kazanırken asit oluşum hızı gittikçe azalır. Organik asitler ve H_2 gazından CH_4 ve CO_2 oluşumu sonucunda depo alanındaki pH 6,8-8,0 civarına gelir. Yükselen pH ile birlikte bazı inorganik bileşikler daha fazla çözünemezler ve çözeltide kalırlar. Bunun sonucunda sızıntı suyundaki ağır metal konsantrasyonu zamanla düşer. Depo gazı oluşum hızı bu fazda düşer. Zira çoğu nütrient, daha önceki fazlarda sızıntı suyu ile uzaklaştırılmıştır ve depo alanında kalan substratlar biyolojik olarak yavaş ayrışan yapıdadırlar. Başlıca depo gazı bileşenleri olan CH_4 ve CO_2 bu aşamada tam olarak gelişir. Az miktarlarda N_2 ve O_2 gazı da görülür.

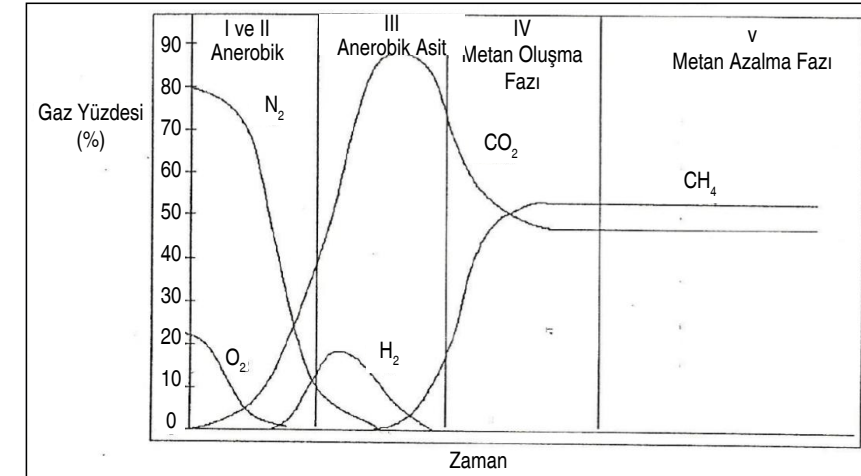


Şekil 4. Metan Fermantasyonunun Prensibi [7]

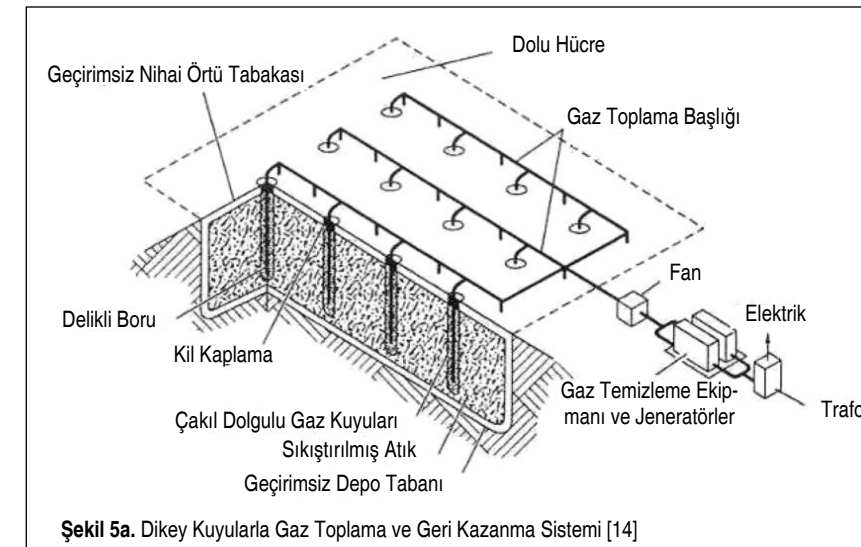
Düzenli depolama sahaslarında meydana gelen ayrışma ve gaz oluşum safhaları Şekil 5'te verilmiştir. Ancak, atıkların biyolojik ayrışması burada gösterildiği gibi her zaman sırayla gerçekleşmeyebilir. Bazı safhalar gerçekleşmezken bazıları da aynı anda meydana gelebilir [13].

Depolanan atığın bileşenlerine ve tane boyutlarına, ayrışabilir organik maddelerin özelliğine, ortamın pH'ına ve ortamdaki nem düzeyine bağlı olarak değişir [13].

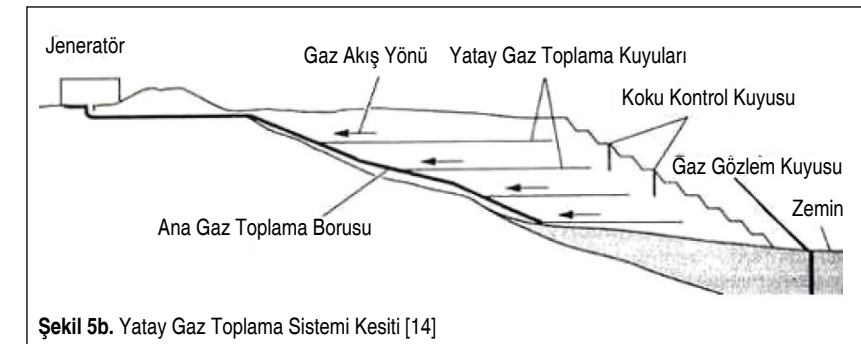
Depo gazı, büyük miktarlarda bulunan ana gazlar ve daha az miktarlardaki eser gazlardan oluşur. Ana gazlar, katı atıklar içerisindeki organik maddelerin biyolojik olarak ayrışması sonucu oluşur. Eser haldeki gazlar çok düşük miktarlarda bile toksik olup, halk sağlığı açısından tehlike arz eder. Depo gazında bulunan bileşenler ve depo gazının özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir [7].



Şekil 5. Depo Gazlarının Zamanla Değişimi ve Gaz Oluşumu Esnasında Görülen Fazlar (I: İlk Uyum Fazı, II: Geçiş Fazı, III: Asit Fazı, IV: Metan Fazı, V: Olgunlaşma Fazı) [13]



Şekil 5a. Dikey Kuyularla Gaz Toplama ve Geri Kazanma Sistemi [14]



Şekil 5b. Yatay Gaz Toplama Sistemi Kesiti [14]

Depo gazı, dikey gaz toplama sistemi (Şekil 5a) ve yatay toplama sistemi (Şekil 5b) olmak üzere iki yolla toplanır. Örnek olarak, dikey gaz toplama sistemi inşası için tavsiye edilen kriterler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Organik ve inorganik maddelerin, oksijenin yokluğunda mikroorganizmaların yardımıyla parçalanarak CO_2 , CH_4 , H_2S ve NH_3 gibi nihai ürünlere dönüşmesi olayı anaerobik çürütme olarak tanımlanabilir. Anaerobik arıtma, ilk olarak, sadece çamurların çürütülmesi amacıyla kullanılmaya baş-

Tablo 1. Depo Gazında Bulunan Bileşenler ve Depo Gazının Özellikleri [7]

Bileşen	Yüzde (Kuru Hacimde)
Metan	45-60
Karbondioksit	40-60
Azot	2-5
Oksijen	0,1-1,0
Sülfür, Menkaptan vb.	0-1,0
Amonyak	0,1-1,0
Hidrojen	0-0,2
Karbonmonoksit	0-0,2
Eser Bileşenler	0,01-0,6
Özellik	Değer
Sıcaklık (°C)	68-88
Özgül Ağırlık	1,02-1,06
Nem Muhtevası	Doygun
Isı Değeri (kJ/m³)	14900-20500

Not: Gerçek yüzde dağılımı depolama sahası yaşı ile değişmektedir.

lanmış; ancak atık sular da aerobik arıtmaya kıyasla avantajlarının keşfedilmesinden sonra bu alanda da yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle enerji maliyetlerinin önemli bir problem olduğu günümüzde, aerobik arıtmaya nazaran daha az enerji gerektirmesi ve hatta proses sonucu ortaya çıkan metanın enerjiye dönüştürülebilmesi anaerobik arıtmanın daha da yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur [16].

Anaerobik sistemlerin önemli olumsuz tarafı atık suda sülfat bileşiklerinin olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Sülfatların indirgenmesi veya proteinlerin parçalanması sonucu ortaya çıkan H_2S , hem toksik, hem de korozif niteliktedir. Ayrıca, gazdaki H_2S , istenmeyen kötü kokulara neden olmaktadır. Biyogazın yakılması durumunda H_2S 'in SO_2 'ye oksitlenmesi ile koku problemi azalmaktadır. Ancak, bu durumda da hava kirletici parametre olan SO_2 meydana gelmektedir. Bu nedenle, anaerobik arıtmada H_2S oluşumu her zaman kontrol altında tutulmalıdır [16]. Aerobik ve anaerobik arıtma sistemlerinde enerji mukayesesi Tablo 3'te gösterilmiştir.

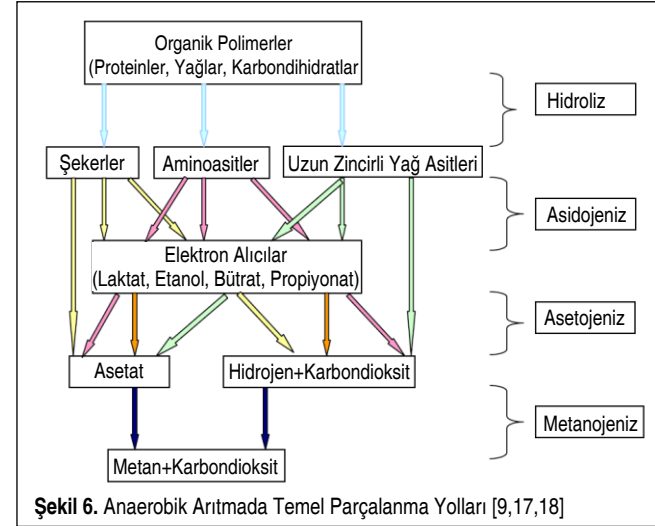
Tablo 2. Düşey Gaz Toplama Sistemi İnşası İçin Tavsiye Edilen Kriterler [15]

Parametre	Önerilen Kriterler
Kuyu Derinliği	Dolgu Yüksekliğinin %75'i veya Sızıntı Suyu Seviyesi Derinliği
Delikli Kısım	Tabandaki 1/3-2/3'lük Kısım Yüzeyle İtibaren Asgari 7,5 m veya Sonradan Başlamalı
Gaz Borusu	Ø7,5-10 cm, PVC veya HDPE, teleskopik bağlantılı
Kuyular Arası Mesafe (Merkezden İtibaren)	Ana Toplama Sistemi: 60-150 m, Çevresel Toplama Sistemi: 30-75 m
Kuyu yoğunluğu	~2.000-8.000 m ² 'de Bir Adet
Minimum Gaz Toplama Borusu Eğimi	%3
Kuyu (Sondaj) Çapı	30-90 cm Standart (En Sık Uygulanan: Ø60, 75 ve 90 cm)

Tablo 3. Aerobik ve Anaerobik Arıtma Enerji Mukayesesi [16]

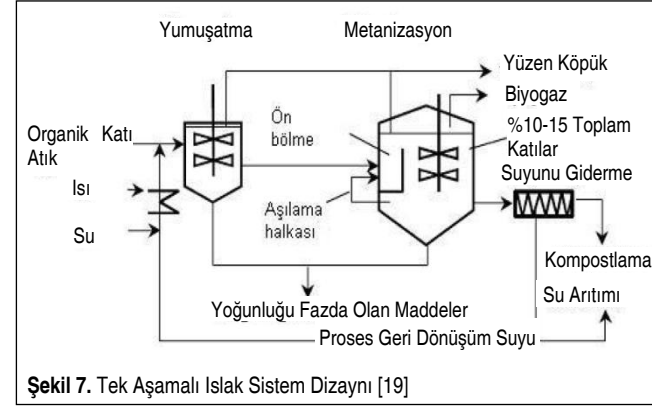
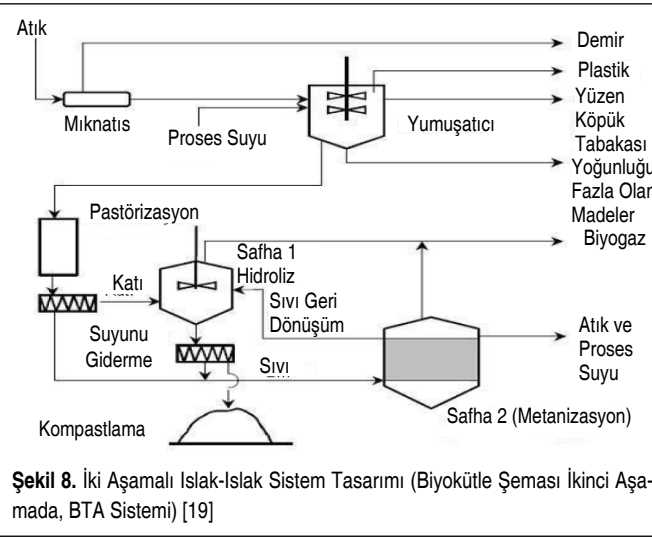
Enerji	Enerji Değerleri (Kj/Gün)	
	Anaerobik	Aerobik
Havalandırma ^{a, b}		-1,9 x 10 ⁶
Metan Üretimi ^{c, d}	12,5 x 10 ⁶	
Su Sıcaklığını 30 °C'e Çıkarmak	-2,1 x 10 ⁶	
Net Enerji (Kj/gün)	10 x 10 ⁶	-1,9 x 10 ⁶

- ^a Oksijen ihtiyacı = 0,8 kg/kg KOİ giderilen
^b Metan üretimi = 1,52 kg O₂/kWh ve 3600 kJ = 1 kWh
^c Metan üretimi = 0,35 m³/kg KOİ giderilen
^d Metanın enerji muhtevası = 35,846 KOİ/m³ (0 °C ve 1 atm)



Anaerobik parçalanma birçok adımdan oluşmaktadır. Anaerobik arıtmanın basitleştirilmiş temel adımları Şekil 6'da gösterilmektedir. Anaerobik arıtmaya etki eden temel faktörler; sıcaklık, pH, nutrientler, C/N oranı, toksisite ve hidrolik bekleme süresidir.

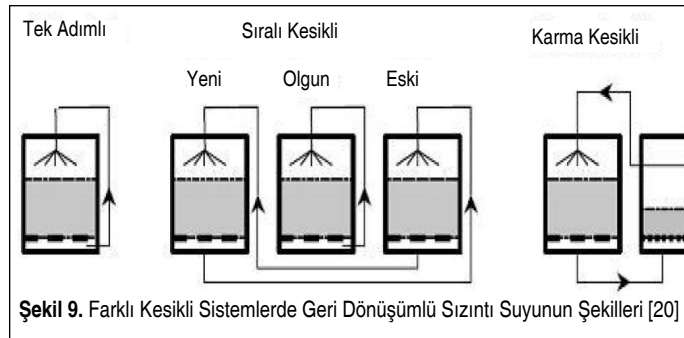
Katı atıklar için en yaygın olan anaerobik çürütücüler, biyolojik, teknik performansı ve dayanıklılığına bağlı olarak karşılaştırılarak seçilir. Anaerobik çürütücüler tek aşamalı, iki

**Şekil 7.** Tek Aşamalı Islak Sistem Dizaynı [19]**Şekil 8.** İki Aşamalı Islak-İslak Sistem Tasarımı (Biyokütle Şeması İkinci Aşamada, BTA Sistemi) [19]

aşamalı ve kesikli sistemler olmak üzere 3 gruba ayrılır (Şekil 7, 8, 9).

Bir başka yakıtın (Genellikle doğalgaz, ancak aynı zamanda kömür veya akaryakıt da olabilir.) yerine depo gazını kullanan mevcut endüstriler; otomotiv, kimya, gıda işleme, eczacılık, çimento ve tuğla imalatı, atık su arıtması, tüketici elektroniği ve ürünlerinin üretimi, kâğıt ve çelik üretimi tesisleridir.

Gaz motorları; düşük devirli, otto çevrimli, çok silindri ve 50-3500 kW güç aralığında çalışan sistemdir ve ısı üretimleri güç çıkışının 1-1,5 katı kadar olmaktadır. Gaz motorları; do-

**Şekil 9.** Farklı Kesikli Sistemlerde Geri Dönüşümlü Sızıntı Suyunun Şekilleri [20]**Resim 1.** Gaz Motoru (Anonim)**Resim 2.** Duman Borulu Atık Isı Kazanı (Anonim)**Resim 3.** Su Borulu Atık Isı Kazanı (Anonim)

ğalgaz, propan veya biyogaz ile çalışabilmektedir. Azot oksit emisyonu düşük olduğundan çevre dostudur. Gaz motoru Resim 1'de gösterilmektedir.

İçten yanmalı motorlar depo gazı uygulamalarında, kullanı-

mı en yaygın dönüşüm teknolojileridir. Otomobil motorlarına benzeyen sabit motorlar, orta kalitede gazı kullanarak elektrik üretmektedir. Kapasiteleri 30-2000 kW arasında değişen içten yanmalı motorlar, depolama sahalarında tipik olarak 700 kW-1,4 MW kapasitesindedir [21].

Sanayide yoğun olarak kullanılan ısı enerjisinin büyük bir kısmı, yanma gazlarıyla bacadan ve proses kayıplarıyla (yüzey kayıpları ve akışkan kayıpları vs.) çevreye atılmaktadır. Atık ısı kazanlarındaki teknolojik gelişmelerle egzoz gazları proses kayıplarını gidermek ve ısı ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılmaya başlanmıştır. Ancak ülkemizde gaz motorlarının egzoz gazları vasıtasıyla elektrik üretimi yok denecek kadar

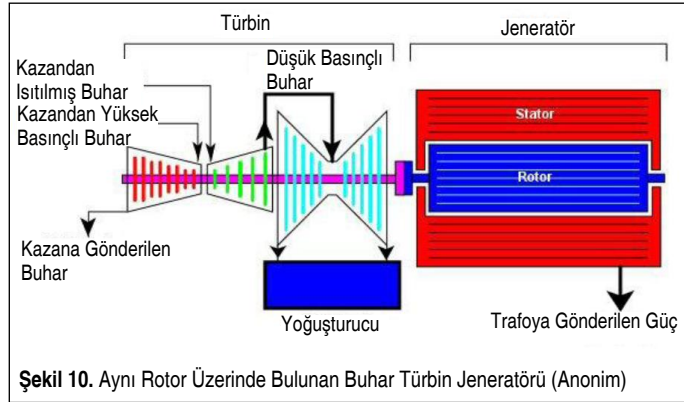
azdır. Bu amaçla, tipik bir depo gazı ve enerji üretim tesisinin enerji bilançosu burada incelenmektedir.

Atık ısı kazanlarında ısı transferi taşınım ile olmaktadır. Atık ısı kazanlarının projelendirilmesinde ve seçiminde duman gazlarının sıcaklığı, basıncı, içindeki kurum ve toz miktarları, üretilmek istenen buharın basıncı ve sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Atık ısı kazanları, duman borulu ve su borulu olmak üzere iki tipte imal edilmektedir (Resim 2) [22].

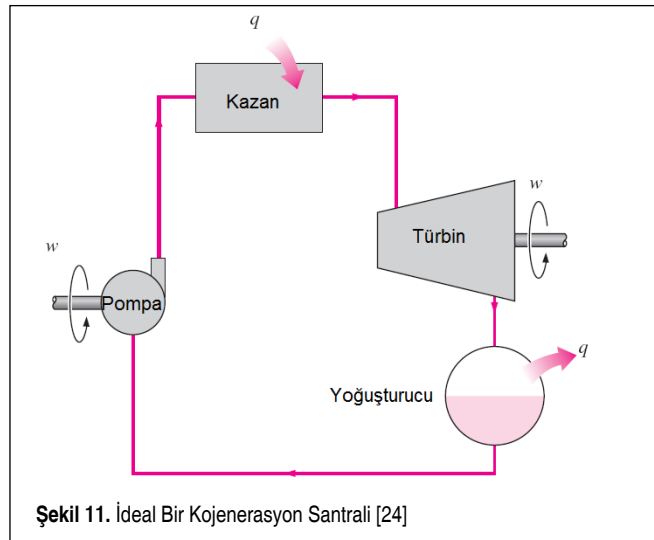
Duman Borulu Atık Isı Kazanları: Genellikle düşük sıcaklıktaki atık ısıları değerlendirmek için ve duman gazlarının temiz olması (toz ve kurum miktarı en fazla 1 gr/m³) halinde, sıcak su ve düşük basınçlı sanayi ve konut buharı üretmek için kullanılır. Bu tip kazanların boruları normal buhar kazanların borularından daha küçük çaplı ve eksenleri arasındaki uzaklık daha azdır (Resim 2) [22].

Su Borulu Atık Isı Kazanları: Atık ısının yüksek basınç ve sıcaklıkta buhar üretimine imkân vermesi halinde kullanılır. Her türlü atık gaza göre (partikül temizlik şartı aranmaksızın) imal edilebilirler (Resim 3) [22].

Buhar türbinlerinde kazandan çıkan yaş buhar, kurutulmak ve kızdırılmak üzere süper ısıtıcıya gider. Burada tamamen



kuru buhar haline gelen buhar, türbine bir stop valften geçerek gelir. Türbine gelen buhar, ilk keys üzerinde olan nozullara gelir. Nozullarda hızı saniyede 1000-1500 metreye kadar ulaşan buhar daha sonra rotor şafta bağlı hareketli kanatlara gelir (Şekil 10 ve Resim 4). Bu kanatlara çarpan buhar, üstündeki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirir ve rotoru çarpmanın



etkisiyle çevirir. Kademeli olarak da yapılan türbinlerde amaç birim hacimde maksimum güç elde etmektir [23].

Elektrik enerjisi, uygun elektrik makineleri kullanılarak doğru veya alternatif akım şeklinde üretilir. Alternatif akım üreten makinelere, senkron, jeneratör ya da alternatör denilir.

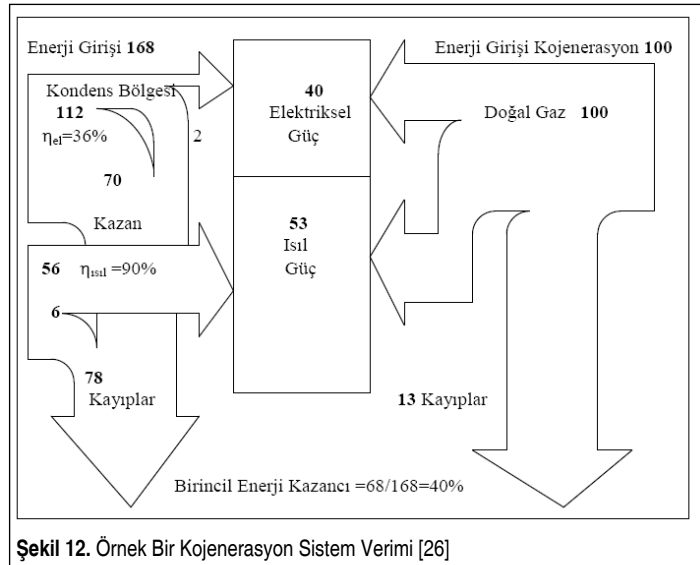
Isıl işlem gereksinimlerini karşılarken elektrik de üreten sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlere kojenerasyon sistemleri adı verilir. Bu sistemlerde elektrik enerjisi üretirken açığa çıkan egzoz atık enerjisinden maksimum faydayı sağlamak amaçlanır. Motor veya türbinlerde eş zamanlı olarak, elektrik ve ısı enerjileri üretilmektedir. Birincil enerji kaynağı dediğimiz doğalgaz, fuel oil, likit gaz, dizel ve biyogazın yüksek verimle enerjiye dönüştürülmesinden ötürü, sistemlerin kısa sürede yatırımı geri ödemesi söz konusu olmaktadır [24].

Bir kojenerasyon santralinde, buhar türbinli çevrim (Rankine), gaz türbinli çevrim (Brayton), hatta bileşik gaz buhar çevrimi kullanılabilir. Buhar türbinli bir ideal kojenerasyon santralinin genel çizimi Şekil 11'de gösterilmiştir [24].

Kojenerasyon elektrik üretim tesisleri, bir sanayi tesisi ile entegre olarak çalışan, buhar, sıcak gaz gibi çürük proseste kullanılan veya sanayi atıklarını, yan ürünlerini elektrik üretiminde kullanarak aynı zamanda sanayi tesisinin elektrik enerjisinin ihtiyacını karşılayan tesislerdir.

Kojenerasyon santralleri ile enerji, üretildiği yerde tüketildiğinden iletim kayıpları diğer santrallere oranla yok denecek kadar azdır. Yanma sonucu açığa çıkan ısı, egzozdan atılmayarak ısı enerjisi olarak geri kazanılır. Bu da enerjinin verimini büyük ölçüde artırır [25].

Şekil 12'de görüleceği üzere; 40 birim elektriksel, 50 birim ısı güce ihtiyacı olan bir tesisin bu ihtiyaçlarını karşılamak



inçin; konvansiyonel sistemde 168 birim enerji gerekirken, kojenerasyon sistemi ile 100 birim enerji yeterli olmaktadır [26].

Gaz temizleme sistemi, yakma prosesi sonucu açığa çıkan atık gazın yönetmelikte belirtilen emisyon değerlerini sağlayacak şekilde kirleticilerden arındırılması için dizayn edilmiştir. Baca gazı; elektrostatik filtre, venturi yıkayıcı, kireç püskürtmeli yıkayıcı ve dioxin furan kontrol üniteleri gibi sistemler ile temizlenmektedir. Temizlenen baca gazı bir induktif çekiş fanı yardımıyla bacadan atmosfere verilir [27].

3. TÜRKİYE'DE ATIK YÖNETİMİ

Atık Yönetimi ile ilgili olarak 05.07.2008 tarih ve 26927 sayılı Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik yayımlanmıştır. Bu yönetmeliğe göre atık, herhangi bir faaliyet sonucunda oluşan, çevreye atılan veya bırakılan Atık Yönetimi

Tablo 4. Türkiye'nin Enerji Potansiyeli [28]

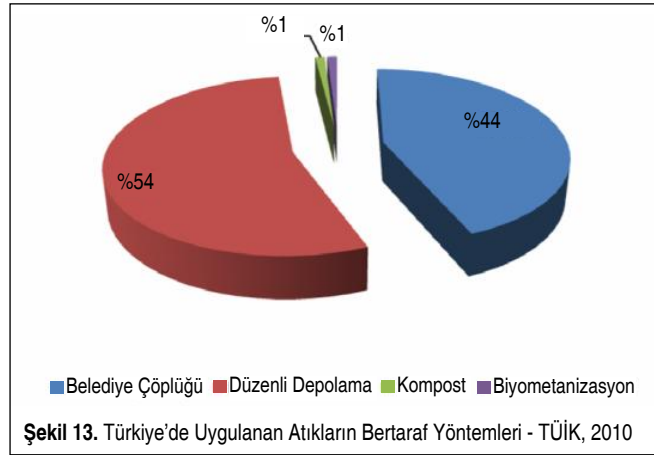
Kaynaklar	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Taş Kömürü (Milyon Ton)	526	245	368,4	1319,4
Linyit (Milyon Ton)	10782,3	826,767	143,141	11752,2
Asfaltit (Milyon Ton)	40,7	29,5	7,3	77,5
Bitüm (Milyon Ton)	1641,4			1641,4
Hidrolik (MW)	36603			36603
Ham Petrol (Milyon Ton)	43,13			43,13
Doğalgaz (Milyar m ³)	6,2			6,2
Uranyum (Ton)	9129			9129
Toryum (Ton)	380000			380000
Jeotermal (Elektrik) (MW)	98		512	600
Jeotermal (Isı) (MW)	3348		28152	31500
Güneş (Mtep)	32,6			32,6
Rüzgar (MW)	48000			48000
Biyokütle (Elektrik) (Mtep)				2,6
Biyokütle (Isı) (Mtep)				6

Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik'te yer alan sınıflardaki herhangi bir maddeyi ifade eder.

Türkiye, linyit, taş kömürü, asfaltit, ham petrol, bitüm, doğal gaz ve uranyum gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir ülkedir. 2012 yılı sonu itibarıyla, Türkiye'nin tespit edilen yerli enerji kaynak potansiyeli Tablo 4'te verilmiştir. Tablodan, Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanılacak biyokütle enerji potansiyelinin 2,6 Mtep, ısı enerjisi üretimi amaçlı kullanılacak biyokütle enerji potansiyelinin ise 6 Mtep olduğu görülmektedir [28].

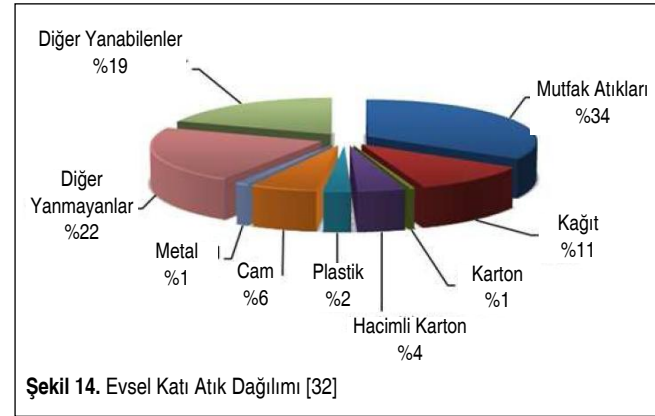
Türkiye, enerji arz güvenliğini esas alan bir enerji politikası yürütmektedir. Bu politikayla, yerli kaynaklara öncelik vermek suretiyle kaynak çeşitliliğinin sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzındaki payının artırılarak hem enerji ve tabii kaynak alanındaki faaliyetlerin çevreye duyarlı bir şekilde yürütülmesi hem de petrol ve doğal gaz alanlarında kaynak çeşitliliğinin sağlanması amaçlanmaktadır. Bu politika doğrultusunda, Cumhuriyetimizin yüzüncü yılı için arz güvenliği, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji verim-



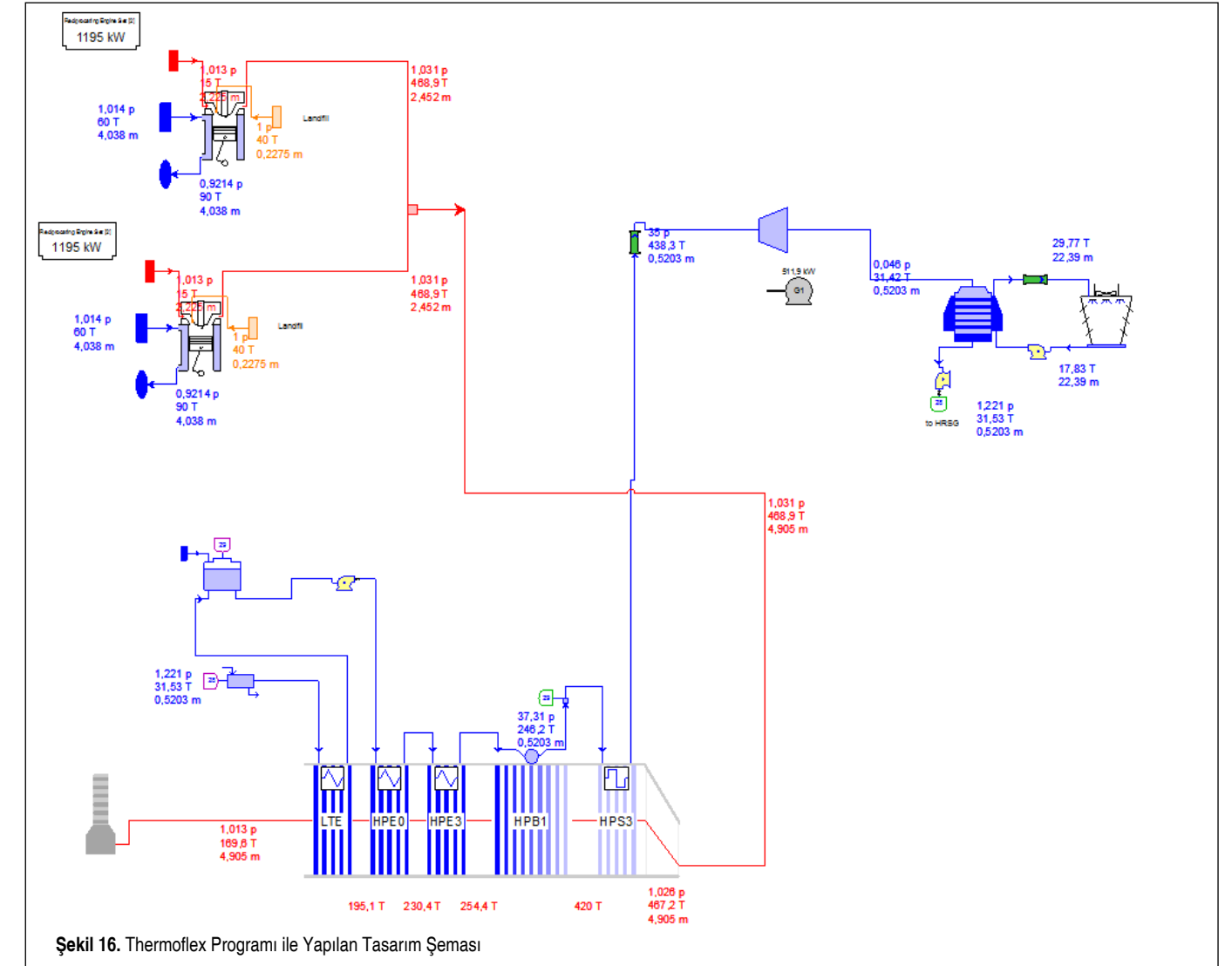
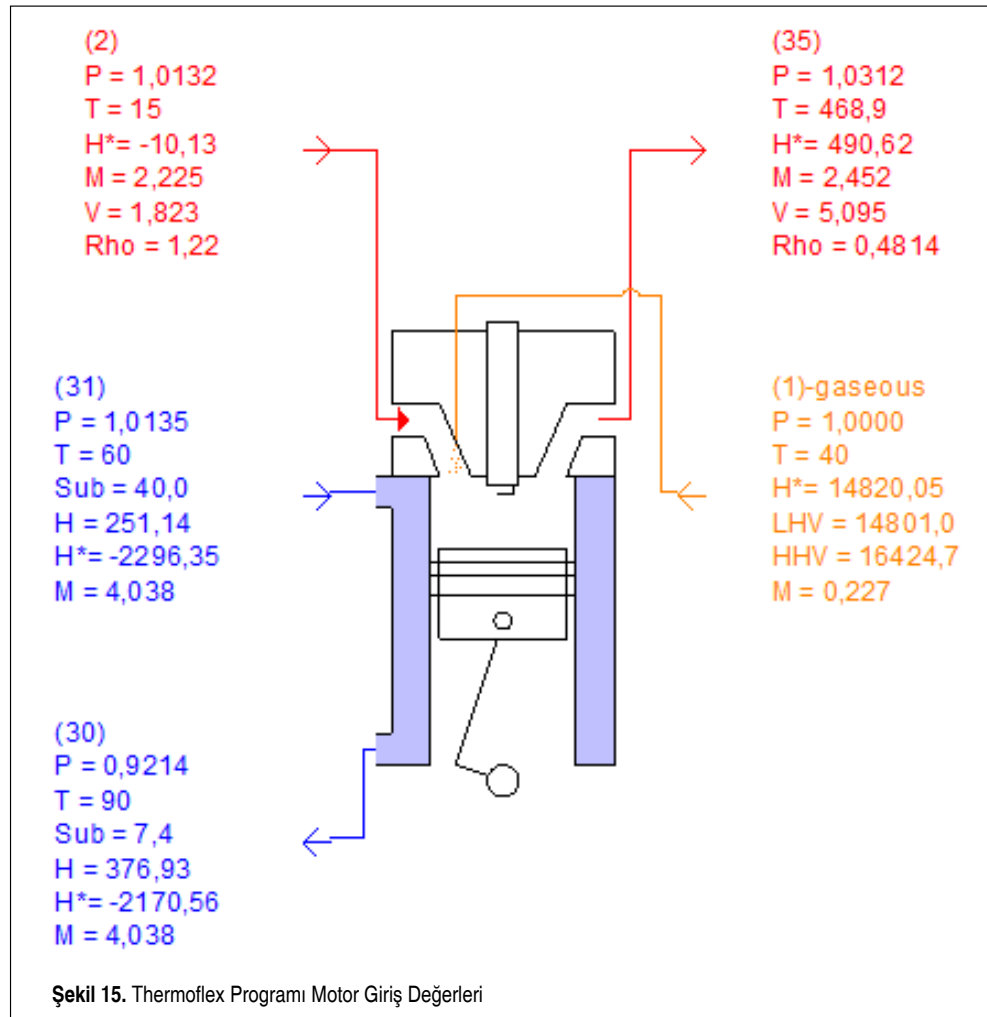


liliğine yönelik belirlenen hedef, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzındaki payının %30'a çıkarılmasıdır [29].

Ülkemizde oluşan çöpün ancak %54'ü düzenli depolama alanlarında depolanmaktadır (Resim 5). Bunun haricinde kalan çöp vahşi olarak depolanmaktadır (Resim 6). Türkiye'nin 2010 yılı nüfusu (73.722.988) göz önüne alınarak yapılan istatistiğe göre, kişi başı atık üretimi 1,14 kg/kişi-gün'dür.



Toplanan belediye atığı miktarı 252.770.00 ton/yıl olarak hesaplanmıştır (TÜİK, 2010). Şekil 13'te TÜİK araştırmasına göre, Türkiye'de Uygulanan Atıkların Bertaraf Yöntemlerinin yüzde dağılımları görülmektedir. Şekil 14'te Evrensel katı atık dağılımı görülmektedir. Marmara ve Ege Bölgesi'nde kişi başına oluşan çöp miktarı 1,15-1,28 kg/gün olarak değişirken bu değer Akdeniz, Karadeniz ve İç Anadolu Bölgesi'nde 0,8-1,28 kg/gün olarak değişmektedir. Gü-



neydoğu Anadolu ile Doğu Anadolu Bölgesi'nde ise bu değer 0,75-0,9 kg/gün'dür [30].

Ülkemizde işletme aşamasında olan 59 adet düzenli depolama tesisi bulunmaktadır. İnşaat ve ihale safhasında olan 39 adet tesis ve yer seçimi aşaması hariç, plan ve proje safhasında olan 41 tesis çalışması bulunmaktadır. Metan gazından elektrik üretimi yapan 12 adet tesis bulunmaktadır [32].

4. ATIK ISI KAZAN TASARIMI VE ENERJİ ÜRETİM SİSTEMİ

Bu çalışmada, Malatya ilinde kurulu bulunan çöp depolama sahasından üretilen biyogaz ile çalışan bir gaz motor tesisi ele alınmıştır. Sistemin kurulu elektrik gücü 2 x 1,2 MWe olarak tasarlanmış ve kurulmuştur. Amacımız, elektrik üretiminde kullanılan mevcut gaz motorlarının egzozundan atılmakta olan yanma ürünlerinin taşıdığı enerjinin geri kazanımının

sağlanmasıdır. Bu amaçla, Thermoflex Versiyon 24.1 programı kullanılarak bir adet atık ısı kazanı ve enerji üretim sistemi tasarlanmıştır.

Tasarlanan sistemin kütle ve enerji dengesi Şekil 15'te verilmiş ve Şekil 16'daki sistem tasarlanmıştır. Malatya ilinde halen kullanılan MWM TG 2020 iki gaz motorundan ortaya çıkan egzoz gazlarının kullanılmasıyla 35 bar ve 438 °C sıcaklığında buhar elde edilebilecek atık ısı kazanı tasarlanmıştır. Çevrimde, kazan giriş su sıcaklığı 31,5 °C ve basıncı 1,2 bar olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan Rankine çevriminde buhar türbini milinden 512 kW'lık elektrik enerjisinin üretilebileceği anlaşılmaktadır.

Motor milinden elde edilen elektrik enerjisi 2 x 1,2 MWe olarak kabul edilmiştir. Tasarlanan atık ısı kazanı ve buhar türbini ile gaz motoru milinden üretilen 2 x 1,2 MWe elektrik enerjisinin yanında, 512 kWe elektrik enerjisi üretilebileceği

ve santralin toplam elektrik üretiminin 2902 kWe olabileceği ortaya çıkmıştır. Baca gazı enerji kazanım sistemiyle birlikte, motor teknik dokümanlarında motor elektrik verimi %37,94 iken atık ısı kazanı ile çalışan Rankine çevrimli tasarlanan sistemin elektrik veriminin ise %43,1 olacağı belirlenmiştir.

Gaz motoru atık gaz çıkış sıcaklığı 468,9 °C ve gaz debisi 2,452 kg/s değerindedir. Bu değerler halen sahada kullanılmakta olan gaz motorlarına ait özelliklerdir.

Tasarım hesaplarında çevre basıncı, sıcaklığı ve havanın bağıl nemi sırasıyla, 1,013 bar, 15 °C ve %60 olarak kabul edilmiştir.

Her bir motora biyogaz olarak 817,2 kg/h'lik yakıt beslenmektedir. Beslenen biyogaz sıcaklığı 40 °C ve basıncı 1 bar civarında kabul edilmiştir. Ayrıca yakıtın alt ısı değeri 14801 kJ/kg olarak kabul edilmiştir.

Motor yanma emisyon değerleri de molar (%) olarak $O_2=8,949\%$, $CO_2=8,787\%$, $H_2O=10,771\%$, $N_2=70,650\%$, $Ar=0,843\%$, $SO_2=0,000\%$ değerlerini almaktadır.

5. SONUÇ

Temel enerji kaynaklarının ömürlerinin sınırlı olması ve ekolojik dengenin bozulma sorunu, yenilenebilir enerji türlerinin kullanımının önemini arttırmaktadır. Aynı zamanda dünya nüfusunun hızla artması, tüketim maddelerinin çeşitliliği ve alışkanlıkların değişmesi ciddi bir atık sorununa sebep olmaktadır. Bu sorununun etkin bir şekilde çözülebilmesi için yeni teknolojilerin kullanımının tüm dünyada yaygınlaşması gerekmektedir. Aynı zamanda iyi bir katı atık yönetim modelinin esası katı atığı bir an önce halkın gözünün önünden uzaklaştırarak boş bir alana atmak değil, onu ekonomik bir kaynak olarak görüp, çevreye en uyumlu bertaraf yöntemleri ile uzaklaştırılmasının sağlanmasıdır.

Kentsel atıkların organik kısmından elde edilebilecek en mantıklı ürün enerjidir. Kentsel atıklardan enerji elde etmek sadece bir yenilenebilir enerji uygulaması olmayıp, aynı zamanda karbondioksit ve metan emisyonlarını azaltarak çevreye fayda sağlamaktır. Kentsel atıklardan sağlanan enerji, bölgesel enerji ihtiyacını karşılamada büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, kentsel atıklardan elde edilen depo gazından enerji geri kazanımı, yakma, gazlaştırma ve anaerobik çürütme teknolojileri incelenmiştir.

Bu çalışmada, tasarlanan atık ısı kazanı ile 2x1,2 MWe elektrik enerjisine ilave olarak atık ısılarından 512 kWe elektrik enerjisinin üretilebileceği ve santralin toplam elektrik üretiminin 2902 kWe olabileceği ortaya çıkmıştır. Baca gazı enerji kazanım sistemiyle birlikte, motor teknik dokümanlarında motor verimi %37,94 iken atık ısı kazanı ile çalışan Rankine çevrimli tasarlanan sistemin elektrik veriminin ise %43,1 olacağı belirlenmiştir.

Depo gazının enerji potansiyelinin değerlendirilmesi ve yakma teknolojileri dünyada en çok kullanılan teknolojilerdir. Bu tip projeler için topografik şartlardan dolayı büyük depolama sahaları bulunması oldukça zordur. Bu yüzden bu yaklaşım bugün için yeterli olsa bile, uzun dönemde farklı stratejiler geliştirilmelidir. Bu konuda dünyada pek çok kuruluş kredi vermektedir. Bu kaynaklar değerlendirilerek uzun vadeli planların yapılması ile mevcut sistemlerin toplam verimini artırıcı bir çözüm oluşacaktır. Ayrıca yeni kurulması planlanan çok sayıda belediye atık sahalarında bu sistem, kuruluş aşamasında toplam yatırım maliyetlerini birim elektrik enerjisi başına düşürücü ve önemli bir rol oynamaktadır.

Üretilen elektriğin ve ısının bir kısmının tesisin kendi iç enerjisi için kullanılması, bir kısmının ise yenilenebilir enerji yasası kapsamında satılması düşünülmelidir. Böylece düzenli depolama alanlarında tüm atıklar çevreye zarar vermeden ve çevre dostu bir teknoloji ile ülke ekonomisine kazandırılmış olacaktır.

TEŞEKKÜR

Çalışmamıza teknik destekleri için ve sisteme ait her türlü bilgiyi bize ileten Doğu Star Elektrik Üretim AŞ'ye ve çalışmamıza teorik tasarım konusunda Termoflex Program desteği veren Çalık Enerji AŞ'ye katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. EIA, 2009. Emissions of Greenhouse Gases in The United States, DOE/EIA-0573(2008) U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585.
2. Akpınar, N., Sen, M. 2006. Türkiye 10. Enerji Kongresi Programı, 29 Kasım 2006, İstanbul.
3. Turna, T. 1999. Çöplük Gazlarından Elektrik ve Isı Üretiminde Gaz Motoru Teknolojisi," Sürdürülebilir Enerji Teknolojilerindeki Gelişmeler ve Türkiye'deki uygulamaları Konferansı MMO/215 Konferans Bildirileri, s 109-114.
4. Baysal, C. 1994. "Gaz Motorlarıyla Bileşik Elektrik Isı Üretimi," Termodinamik Dergisi, sayı18, <http://www.termodinamik.info/?pid=1038>, son erişim tarihi: 19.04.2015.
5. Yücel, M. 1993. "Gaz Türbinlerinin Atık Gazlarından Enerji Geri Kazanımı," Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı 10, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f6d2338b2b8fce1_ek.pdf?dergi=148, son erişim tarihi: 13.04.2014.
6. Peterson, D. 2013. "Future World Energy Demand Driven by Trends in Developing Countries," U.S. Energy Administration, <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=14011#>, son erişim tarihi: 21.10.2014.
7. Işık, A. 2014. "Katı Atık Bertaraf Tesislerinde Organik Atık-

lardan Açığa Çıkan Depo Gazı ile Enerji Elde Edilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, 914.1.033.

8. Demirel, B., Yenigün, O. 2006. "Changes in Microbial Ecology in an Anaerobic Reactor," Bioresource Technology, vol. 97, p. 1201-1208.
9. Björnsson, L. 2000. "Intensification of the Biogas Process by Improved Process Monitoring and Biomass Retention," Doctoral Dissertation, Department of Biotechnology, Lund University, Sweden.
10. Dewil, R., Appels, R., Baeyens, J., Degreve, J. 2007. "Peroxidation Enhances The Biogas Production in the Anaerobic Digestion of Biosolids," Journal of Hazardous Materials, vol. 146, p. 577-581.
11. Solera, R., Romero, L. I., Sales, D. 2002. "The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-Up," Chemical Biochemical Engineering, vol. 16, p. 25-29.
12. Lastella, G., Testa, C., Cornacchia, G., Notornicola, M., Voltasio, F., Sharma, V. K. 2002. "Anaerobic Digestion of Semi - Solid Organic Waste: Biogas Production and its Purification," Energy Conversion and Management, vol. 43, p. 63-75.
13. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. 1993. Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, New York.
14. Öztürk, İ. 2010. Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları, İSTAÇ AŞ., Teknik Kitaplar Serisi, İstanbul.
15. Vesilind, P. A., Worrell, W. A., Reinhart, D. R. 2002. Solid Waste Engineering, Brooks/Cole, Pacific Grove, USA.
16. Korkut, Ş. 2015. "CEV348 Anaerobik Arıtım Sistemleri Ders Notları," Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, <http://cevre.beun.edu.tr/dersnotu/anaerobik/CEV348-anaerobik-aritim-sistemleri.pdf>, son erişim tarihi: 13.04.2015.
17. Metcalf-Eddy, Inc. 2003, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill, New York.
18. Van Haandel, A. C., Lettinga, G. 1994. Anaerobic Sewage Treatment, John Wiley & Sons, England, p. 226.
19. Vandevivere, P., De Baere, L., Verstraete, W. 2002. "Biomechanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes," Editor: J. Mata-Alvarez, In Types of Anaerobic Digesters for Solid Wastes, IWA Publishing, Yayınlandığı Yer.
20. Vandevivere, P., De Baere, L., Verstraete, W. 1999. Unpublished Manuscript.

21. Gendebien, A., Pauwels, M., Constant, M., Willumsen, H.C., Butson, J., Fabry, R., Ferrero, G.L. and Nyns, E.J. 1991. Landfill Gas: From Environment to Energy: State of the Art and Implementation in the European Community, p. 69-76.
22. Genceli, O. 1985, Buhar Kazanları Konstrüksiyon ve Yardımcı Elemanları, Kıpış Dağıtımçılık, İstanbul.
23. Erdem, H., Sevilgen, S. H., Çetin, B., Akkaya, A. V., Dağdaş, A. 2003. Gaz Türbin Sistemlerinde Çevre Sıcaklığının Performansa Etkisi, 14. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 3-5 Eylül 2003, Isparta.
24. Çengel, Y., Boles, M. A. 2002. Thermodynamics An Engineering Approach. Mc Graw Hill, 4th Edition, Boston, 2002.
25. Güneş, S. 2009. "Atık Isıdan Faydalanma ve Özel Bir Fabrika Uygulaması," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, s. 77-78.
26. Gezer, İ. 2004. "Kojenerasyon Sistemleri ve Eskişehir'deki Üç Fabrikada Sistemin Mevcut Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, s. 17-20.
27. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi. 1996. İZAYDAŞ, İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme AŞ., izaydas.com.tr.
28. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. 2013. Mavi Kitap, www.enerji.gov.tr, son erişim tarihi: 13.04.2015.
29. EÜAŞ. 2013. "Elektrik Sektörü Üretim Raporu," www.enerji.gov.tr, son erişim tarihi: 13.04.2015.
30. Kaya, D., Yaşar, M., Eyidoğan, M. 2011. "Evsel Katı Atıkların Geri Kazanım ve Bertarafının Teknik ve Ekonomik Analizi," 17. Uluslararası Enerji - Çevre Fuarı ve Konferansı, Kongrenin 15-17 Haziran 2011, İstanbul.
31. Aydın Belediyesi Başkanlığı Temizlik İşleri Müdürlüğü. 2015. "Katı Atık Bertaraf Tesisi," <http://www.aydin.bel.tr/temizlik.htm>, son erişim tarihi: 10.04.2015.
32. Erdoğan, D. 2012. "Belediye Atıkları Yönetimi, Depo Gazı ve Enerji Geri Kazanımı," Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
33. Bodrum Belediyesi BOYAB Entegre Atık Yönetimi Projesi, <http://bodrum.bel.tr/haber/torba-coplugu-dogaya-kazandiriyor.html#>. VSfbgWeKBWw, son erişim tarihi: 10.04.2015.