

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL'DA OLUŞAN KENTSEL KATI ATIKLAR İÇİN YAKMA VE  
GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elif AYNUR**

**Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği**

**Programı : Çevre Bilimleri ve Mühendisliği**

**Eylül 2011**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSTANBUL'DA OLUŞAN KENTSEL KATI ATIKLAR İÇİN YAKMA VE  
GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elif AYNUR  
(501091739)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Eylül 2011  
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Eylül 2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hasancan OKUTAN (İTÜ)  
Prof. Dr. Kadir ALP (İTÜ)**

**Eylül 2011**



## ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans eğitim dönemimde beni destekleyen, önerileriyle bu tezin oluşmasını sağlayan, çalışmamla ilgili her türlü bilgiye ulaşmama yardımcı olan ve mesleki gelişimimdeki büyük katkılarından dolayı hocam Prof.Dr İzzet Öztürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında çeşitli konularda tecübelerinden ve bilgilerinden yararlandığım hocam Prof. Dr. Kadir Alp'e Prof. Dr. Hasancan Okutan'a ve Prof Dr. Mesut Gür'e teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Bu tezin hazırlanması esnasında emeği geçen sevgili kuzenim Onur Çelik'e, desteklerini yanımda hissettiğim sevgili arkadaşlarıma emeklerinden ve sabırlarından dolayı teşekkür ederim. Son olarak varlıklarıyla her zaman bana destek olan, ilgilerini benden eksik etmeyen, her zor anımda sabırla üstesinden gelmemi sağlayan sevgili ablam Zehra Aynur, annem Ayşin Abdüsselamoğlu ve kıymetli dedem Doğan Abdüsselamoğluna minnetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2011

Elif AYNUR

Çevre Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
KISALTMALAR .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
İSTANBUL'DAKİ KENTSEL KATI ATIKLAR İÇİN YAKMA VE GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ.....	xv
ÖZET.....	xv
COMPERATIVE ANALYSIS OF GASIFICATION AND INCINERATION SYSTEMS FOR MUNICIPAL SOLID WASTE OF ISTANBUL .....	xvii
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Konunun Anlam ve Önemi .....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	4
<b>2. ATIK YÖNETİMİNİN GENEL ESASLARI .....</b>	<b>5</b>
2.1 Atık Yönetiminin Tanımı ve Kapsamı .....	5
2.2 Yasal Çerçeve.....	7
2.2.1 Ulusal atık mevzuatı.....	7
2.2.2 Belediyelerin yasal sorumlulukları .....	11
2.2.3 Büyükşehirler için atık yönetimi stratejileri.....	12
<b>3. TERMAL ATIK BERTARAF YÖNTEMLERİ VE İLGİLİ ULUSLARASI DENEYİMLER .....</b>	<b>17</b>
3.1 Giriş.....	17
3.2 Atığın Yanabilirliği .....	18
3.3 Yakma Prosesi.....	22
3.4 Atık Yakma Teknolojileri .....	24
3.4.1 Kütleli yakma tesisleri .....	25
3.4.2 Atık kaynaklı yakıt yakma tesisleri.....	27
3.4.3 Döner fırınlı yakma tesisleri .....	29
3.4.4 Akışkan yataklı yakma tesisleri .....	30
3.4.5 Modüler yakma sistemleri.....	31
3.5 Atık Gazlaştırma Sistemleri .....	32
3.5.1 Sabit yataklı gazlaştırıcılar .....	35
3.5.2 Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar.....	36
3.5.3 Akışkan yataklı gazlaştırıcılar.....	37
3.5.4 Plazma gazlaştırma .....	38
3.5.5 Sentez gaz ve kullanım alanları .....	39
3.6 Termal Bertaraf Sistemlerinde Enerji Geri Kazanımı.....	41
3.7 Termal Bertaraf Sistemleri Uygulamaları .....	48
3.8 Termal Bertaraf Sistemlerinden Kaynaklanan Kirletici Emisyonlar .....	52
3.9 Hava Kirliliği Kontrol Sistemleri.....	53
<b>4. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>59</b>
4.2 İstanbulda Atık Kompozisyonu ve Kalorifik Değer Çalışmaları .....	60

<b>5. İSTANBUL İÇİN ÖNERİLEN ATIK YAKMA VE GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİ</b> .....	<b>65</b>
5.1 Giriş .....	65
5.2 Kütleli Yakma Sistemi .....	66
5.2.1 Atık yakmada maliyet analizi.....	92
5.3 Gazlaştırma Sistemi Sonuçları .....	96
5.4 Termal Bertaraf Seçeneklerinin Karşılaştırılması .....	98
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>101</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>105</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>111</b>

## KISALTMALAR

<b>AKY</b>	: Atık Kaynaklı Yakıt
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>ATM</b>	: Atık Toplama Merkezleri
<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>ÇOB</b>	: Çevre Orman Bakanlığı
<b>ÇŞB</b>	: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
<b>ÇTV</b>	: Çevre Temizlik Vergisi
<b>EPA</b>	: Environmental Protection Agency
<b>ESP</b>	: Electrostatic Precipitator
<b>EHCIP</b>	: Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımlarının Planlaması (Projesi)
<b>İBB</b>	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
<b>UNEP</b>	: United Nation Environmental Programme
<b>UTRC</b>	: United Technologies Research Center
<b>TÜİK</b>	: Türkiye İstatistik Kurumu
<b>KKA</b>	: Karışık Kentsel Atık
<b>KAAP</b>	: Katı Atık Ana Projesi
<b>LHV</b>	: Lower Heating Value
<b>VOC</b>	: Volatile Organic Compound
<b>PM</b>	: Particulate matter



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : Piroлиз AB Direktifleri ile uyumlu zaman çizelgesi .....	3
Çizelge 2.1 : Ambalaj ve ambalaj atıkları kontrol yönetmeliği geri kazanım hedefleri .....	10
Çizelge 2.2 : Türkiye’de karakteristik belediye gruplarının tanımlanması .....	12
Çizelge 2.3 : Ulusal katı atık yönetimi seneryoları ve katı atık tahminleri .....	13
Çizelge 2.4 : Yaklaşım seneryoları çıktılarının hedeflerle karşılaştırılması.....	14
Çizelge 2.5 : Büyükşehir dışındaki Belediyeler için AB ile uyumlu atık yönetimi zaman çizelgesi .....	14
Çizelge 3.1 : Piroлиз yakma ve gazlaştırma sistemlerinin temel özellikleri.....	18
Çizelge 3.2 : Kentsel katı atığın tipik elementel analizi .....	20
Çizelge 3.3 : Kentsel katı atık bileşenlerinin ısı değerleri.....	21
Çizelge 3.4 : Atık bileşenleri ve yanma ürünleri .....	23
Çizelge 3.5 : Izgaralı yakma sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	27
Çizelge 3.6 : İşlenmiş ve işlenmemiş atık yakma sistemlerinin karşılaştırılması .....	28
Çizelge 3.7 : Atık yakmada kullanılan yakma sistemleri ve uygulama aralığı .....	32
Çizelge 3.8 : Yakma ve Gazlaştırmada oluşan ürünler.....	35
Çizelge 3.9 : Gazlaştırıcıların ısı kapasiteleri.....	38
Çizelge 3.10 : Potansiyel elektrik üretim verimleri .....	47
Çizelge 3.11 : Dünyada enerji üretimine yönelik luruluk yakma sistemleri .....	48
Çizelge 3.12 : Neustadt yakma tesisi teknik özellikleri.....	50
Çizelge 3.13 : Baca gazı kontrol seviyeleri .....	54
Çizelge 3.14 : Partikül giderme verimleri.....	55
Çizelge 3.15 : Baca gazı arıtma sistemleri verimleri.....	56
Çizelge 3.16 : Amerikada Amerikada yakma tesislerinde kullanılan baca gazı arıtma sistemleri.....	57
Çizelge 4.1 : Evsel katı atıkların kompozisyonunun belirlenmesi .....	61
Çizelge 4.2 : Aktarma istasyonu bazında kalorifik değerler .....	63
Çizelge 4.3 : Yakma analizinde kullanılan atık verileri .....	63
Çizelge 4.4 : Gazlaştırma sisteminde kullanılan atık özellikleri .....	63
Çizelge 5.1 : Atık Özellikleri.....	66
Çizelge 5.2 : Stokiyometrik yanmada atığın yanma karakteristikleri .....	67
Çizelge 5.3 : Fırında radyasyondan kaynaklanan enerji kaybı .....	69
Çizelge 5.4 : Sistemde oluşan enerji dengesi.....	69
Çizelge 5.5 : Buhar üretiminde yapılan kabuller .....	72
Çizelge 5.6 : Üretilen buhar miktarları .....	72
Çizelge 5.7 : 2010 öncesi Kentsel karışık atık yakma sistemi atık ısı hesaplamaları .....	74
Çizelge 5.8 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarları .....	75
Çizelge 5.9 : Kütleli yakma için emisyon faktörleri .....	76
Çizelge 5.10 : Oluşan kirlenici emisyonlar .....	76
Çizelge 5.11 : Ek yakıt için emisyon faktörleri .....	77
Çizelge 5.12 : Ek yakıttan kaynaklanan kirleniciler.....	77
Çizelge 5.13 : Ek yakıttan kaynaklanan kirlenicilerin kütleli debisi.....	77

Çizelge 5.14 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları ve limit değerleri .....	78
Çizelge 5.15 : Arıtma sonrası kirletici konsantrasyonları ve limit değerler .....	78
Çizelge 5.16 : 2010 yılı öncesi AKY kullanılan yakma sistemi verileri .....	79
Çizelge 5.17 : Sistemde ulaşılan ısı dengesi .....	79
Çizelge 5.18 : Buhar üretimi amacıyla kullanılacak enerji miktarı .....	80
Çizelge 5.19 : Üretilen buhar miktarları .....	80
Çizelge 5.20 : 2010 yılı öncesi AKY yakma sistemi için atık ısı hesaplamaları .....	80
Çizelge 5.21 : Kullanılan soğutma suyu miktarları ve baca gazı debisi .....	81
Çizelge 5.22 : AKY için kullanılan emisyon faktörleri .....	81
Çizelge 5.23 : Atık kaynaklı kirletici emisyonlar .....	81
Çizelge 5.24 : Arıtma sonrası sistemdeki kirletici miktarı ve Sanayi kaynaklı hava kirliliği kontrolü yönetmeliğindeki limit değerleri .....	82
Çizelge 5.25 : 2010 yılı öncesi AKY yakma sisteminde oluşan kirletici konsantrasyonları ve limit değerler .....	82
Çizelge 5.26 : 2010 yılı karışık kentsel atık karakterizasyonu .....	83
Çizelge 5.27 : 2010 yılı KKA için tasarlanan yakma sistemi verileri .....	83
Çizelge 5.28 : Sistemde oluşan ısı dengesi .....	84
Çizelge 5.29 : Sistemde buhar üretmek amacıyla kullanılan enerji miktarı .....	84
Çizelge 5.30 : Üretilen buhar miktarları .....	84
Çizelge 5.31 : 2010 yılı KKA yakma sistemi için atık ısı hesaplamaları .....	85
Çizelge 5.32 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarı ve baca gazı debisi .....	85
Çizelge 5.33 : 2010 yılı KKA yakılması sonucu oluşan kirletici emisyonlar .....	85
Çizelge 5.34 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları ve limit değerleri .....	86
Çizelge 5.35 : Kirletici konsantrasyonları ve limit değerler .....	86
Çizelge 5.36 : Yakma sisteminde kullanılan atık verileri .....	86
Çizelge 5.37 : Sistemde oluşan ısı dengesi .....	87
Çizelge 5.38 : Sistemde buhar üretmede kullanılacak enerji miktarı .....	87
Çizelge 5.39 : Sistemde üretilen buhar miktarı .....	87
Çizelge 5.40 : 2020 yılı KKA yakma sistemi için atık ısı hesaplaması .....	88
Çizelge 5.41 : Baca gazı soğutma suyu ve baca gazı debisi .....	88
Çizelge 5.42 : Arıtma öncesi kirletici emisyonlar .....	88
Çizelge 5.43 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları .....	89
Çizelge 5.44 : Kirletici konsantrasyonları ve limit değerler .....	89
Çizelge 5.45 : Yakma sisteminde kullanılan atık özellikleri .....	89
Çizelge 5.46 : Sistemdeki ısı dengesi .....	90
Çizelge 5.47 : Buhar üretiminde kullanılacak enerji miktarı .....	90
Çizelge 5.48 : Üretilen buhar miktarı .....	90
Çizelge 5.49 : AKY yakma için atık ısıdan üretilen buhar miktarı .....	91
Çizelge 5.50 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarı ve baca gazı debisi .....	91
Çizelge 5.51 : Arıtma öncesi baca gazı kirleticileri .....	91
Çizelge 5.52 : Arıtma sonrası baca gazında kalan kirletici emisyonlar ve yönetmelik limit değerleri .....	92
Çizelge 5.53 : Arıtma sonrası baca gazında kalan kirletici emisyonlar ve yönetmelik limit değerleri .....	92
Çizelge 5.54 : Senaryolara göre kişi başı ortalama harcama ihtiyacı dağılımı .....	96
Çizelge 5.55 : Kalorifik değerlere kullanılan hava fazlası ve ek yakıt miktarları .....	99
Çizelge 5.56 : Yakma sisteminde üretilen enerji miktarları ve sağlanan gelir .....	100
Çizelge 5.57 : Üretilen enerjinin teşvik kapsamı dışında olması durumunda sağlanan gelir .....	100
Çizelge A.1 : Hava ve nemin entalpi değerleri .....	112

<b>Çizelge A.2</b> : Kuru hava ile nemin doyunlaşma özellikler .....	112
<b>Çizelge A.3</b> : (devam) Kuru hava ile nemin doyunlaşma özellikler.....	113
<b>Çizelge A.4</b> : (devam) Kuru hava ile nemin doyunlaşma özellikler.....	114
<b>Çizelge A.5</b> : Atık ısı hesaplamasında kullanılan gaz için entalpi değerleri .....	115
<b>Çizelge A.6</b> : Atık ısı hesaplamasında kullanılan entalpi değerleri.....	116
<b>Çizelge A.7</b> : 2800 kcal/kg için model verileri.....	117
<b>Çizelge A.8</b> : 2800 kcal/kg için kütle ve enerji dengesi .....	117
<b>Çizelge A.9</b> : 2800 kcal/kg için fırında ulaşılan sıcaklık hesapları .....	118
<b>Çizelge A.10</b> : 2800 kcal/kg için ek yakıt ihtiyacı.....	118
<b>Çizelge A.11</b> : Buhar Üretimi.....	118
<b>Çizelge A.12</b> : (devam) Buhar Üretimi.....	119



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : EPA modeli atık yönetim hiyerarşisi .....	6
Şekil 2.2 : Büyükşehirler ve büyükşehir dışındaki şehirler için belirlenen bu kombinasyonlar .....	15
Şekil 3.1 : Tanner diyagramı .....	19
Şekil 3.2 : Bomba kalorimetresi .....	22
Şekil 3.3 : Kentsel atık yakmada hava fazlası ve sıcaklık ilişkisi .....	24
Şekil 3.4 : Atık yakma sistemlerinde kullanılan ızgara çeşitleri .....	27
Şekil 3.5 : Atık kaynaklı yakıt üretim prosesleri .....	28
Şekil 3.6 : Döner fırınlı yakma tesisi .....	30
Şekil 3.7 : Akışkan yataklı yakma sistemi .....	31
Şekil 3.8 : Modüler yakma sistemi .....	32
Şekil 3.9 : Gazlaştırma prosesi temel adımlar .....	33
Şekil 3.10 : Yukarı ve aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılar .....	36
Şekil 3.11 : Sürüklemeli gazlaştırıcı ve gazlaştırıcı boyunca sıcaklık değişimi .....	37
Şekil 3.12 : Kabarcıklı (a) ve sirkülasyonlu (b) gazlaştırıcı .....	38
Şekil 3.13 : Sentez gazın atığın organik, inorganik madde ve nem muhtevasıyla ilişkisi .....	40
Şekil 3.14 : Sentez gazın kullanım alanları .....	41
Şekil 3.15 : Buhar türbini çalışma prensibi .....	43
Şekil 3.16 : Esenyurt kojenerasyon tesisi akım şeması .....	44
Şekil 3.17 : Sadece elektrik üretimi .....	44
Şekil 3.18 : Elektrik ve ısı üretimi .....	44
Şekil 3.19 : Enerji satışından kaynaklanan tahmini gelir .....	45
Şekil 3.20 : Entegre gazlaştırmalı kombine çevrim santrali .....	47
Şekil 3.21 : Atık yakma sistemlerinin ülkelere göre kapasitesi .....	48
Şekil 3.22 : Reno Nord Yakma tesisi .....	49
Şekil 3.23 : Avrupa’da yaygın olarak kullanılan baca gazı arıtma sistemleri .....	56
Şekil 4.1 : İstanbul’da oluşan atık miktarlarının yıllara göre değişimi .....	59
Şekil 4.2 : İstanbulun 2009 yılı kış dönemi atık karakterizasyonu .....	62
Şekil 5.1 : Yakma sisteminde oluşan kütle dengesi .....	68
Şekil 5.2 : Ek yakıt ilavesi ile birlikte ısı dengesi .....	70
Şekil 5.3 : Ek yakıt ilavesi ile birlikte sistemde kütle dengesi .....	70
Şekil 5.4 : Atık ısı kazanı .....	71
Şekil 5.5 : Atık ısı kazanı ile buhar üretimi .....	72
Şekil 5.6 : 2009 yılı AKY için kütle dengesi .....	79
Şekil 5.7 : 2010 yılı KKA yakılması sonucu oluşan kütle dengesi .....	83
Şekil 5.8 : 2800kcal/kg kalorifik değerinde atık için yakma sisteminde oluşan kütle dengesi .....	87
Şekil 5.9 : Sistemde oluşan kütle dengesi .....	89
Şekil 5.10 : Yatırım maliyetleri .....	93
Şekil 5.11 : Yıllık atık yakma maliyeti .....	94
Şekil 5.12 : Gazlaştırma sisteminde enerji dengesi .....	97

<b>Şekil 6.1</b> : Kalorifik değer ısı-güç ilişkisi .....	101
<b>Şekil A.1</b> : 2010 yılı ilçelere göre atık özellikleri.....	120
<b>Şekil A.2</b> : Gazlaştırma model sonucu .....	121
<b>Şekil A.3</b> : (devam) Gazlaştırma model sonucu .....	122
<b>Şekil A.4</b> : (devam) Gazlaştırma model sonucu .....	123
<b>Şekil A.5</b> : (devam) Gazlaştırma model sonucu .....	124

# İSTANBUL'DA OLUŞAN KENTSEL KATI ATIKLAR İÇİN YAKMA VE GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

## ÖZET

Ülkemizde AB uyum süreci çerçevesinde atık yönetim mevzuatlarında değişiklikler yapılmış ve düzenli depolama alanlarına gönderilen atık miktarlarının azaltılmasına yönelik politika oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ile biyobozunur atıkların düzenli depolama sahalarında bertarafı ile ilgili kısıtlamalar getirilmiştir. Bu amaçla düzenli depolamaya giden atık miktarlarını azaltmaya yönelik mekanik biyolojik işlemler ve termal işlemlerin uygulaması öngörülmüştür.

Bu çalışmada İstanbul'da oluşan kentsel katı atıklar için uygulanabilirliği öngörülen termal bertaraf sistemleri; kütleli yakma ve gazlaştırma sistemleri incelenmiştir. Kentsel katı atıklarla ilgili bu çalışmada Türkiye'de uygulanmakta olan ilgili yönetmelikler de değerlendirilmiştir. Kütleli yakma ve gazlaştırma sistemleri ele alınırken aynı zamanda bu konuda uluslararası deneyimlerden başarılı örnekler de verilmiştir.

İstanbul'a ilişkin atık verileri ve kalorifik değer çalışmalarındaki veriler kullanılmak üzere; yakma sonucu oluşan kütle, enerji dengesi ve emisyon hesaplamaları için Excel tabanlı bir sayısal model oluşturulmuştur. Bu modelde, İstanbul için Atık Yönetimi Master Planlarında verilen 2010 yılı atık özellikleri ve bu özelliklerden yola çıkılarak 2020 yılında ulaşılması öngörülen kalorifik değer verileri kullanılmıştır. Kütleli yakma sonucunda enerji geri kazanımı için buhar üretimi ve buharın kullanım alternatifleri ile ilgili senaryolar incelenmiştir. Buharın sadece elektrik üretiminde veya elektrik ve ısıtmada kullanılması durumlarında elde edilebilen enerji miktarları ile bu enerjinin, yenilenebilir enerji teşviği kapsamında ele alınması veya alınmaması durumları için öngörülen gelirler hesaplanmıştır. Yakma sonucu oluşan kirletici emisyonlar hesaplanırken literatürde yer alan emisyon faktörleri kullanılmış ve çıkan sonuçlar ilgili mevzuat ile kıyaslanmıştır. Gazlaştırma sistemi için ise mevcut gazlaştırma model sonuçları irdelenmiştir.

Bu çalışma sonucunda İstanbul için termal bertaraf sistemlerinin hangi koşullarda uygulanması gerektiği ve bu sistemlerin uygulanması sonucu sağlanacak avantajlar belirtilmiştir. Her iki sistemde (yakma veya gazlaştırma), elde edilen sonuçlar ile İstanbul için uygulanabilecek sistemle ilgili öngörülebilir bulunulmuştur. Yakma sistemleri için maliyet analizi yapılmış ve İstanbul'da yapılması düşünülen tesis için ton başına atık maliyetleri ile termal bertaraf sistemini içeren atık yönetim planının uygulanması durumunda hane başına maliyeti hesaplanmıştır.



## **COMPERATIVE ANALYSIS OF GASIFICATION AND INCINERATION SYSTEMS FOR MUNICIPAL SOLID WASTE OF ISTANBUL**

### **SUMMARY**

In our country waste management regulations have revized related to European Community orientation period and according to this regulations new policies created to decrease the amount of waste treated in sanitary landfill. In this direction restriction has imposed about treating biodegredable waste in landfills with Landfilling of waste regulations. There for Mechanical biological and thermal processes applications are envisaged to decrease the amount of waste sending to landfill.

In this study, mass burning and gasification systems which are thought to be applicable for the municipal solid waste of Istanbul, were examined. Policies about solid waste in Turkey and international experinces about gasification and incineration systems are covered in this current solid waste studying.

In the case study, a model for calculating the mass and energy balances and emmission was prepared with MS Excel by using the incineration data and calorific values of Istanbul. In this model, the waste characterizations of 2010 given in Master Plans of Istanbul and the foreseen calorific value of waste in 2020 are used and different scenerions were examined for steam generation after mass burning and its usage for energy recovery alternatives. The amount of energy that can be produced by using the steam only for electricity, or both for electricity and heating is calculated. In addition, possible incomes with considering this amount of energy being in or out of the scope of the Goverment Renewable Incitement law are also calculated. In the calculation of the pollutant emissions of the burning process, emmission factors from the literature are used, , and the results are compared with the legistations. Available gasification model results were evaluated for the gasification systems.

At the end of this study, how the systems should be operated in Istanbul and what kind of benefits these applications are emphasised. Based on the result of the two systems, the one which is applicable for is predicted. A cost analysis is performed for the burning systems. Besides, cost per ton of waste for the planned facility and cost per house if the thermal treatment system is in use are calculated.







# 1. GİRİŞ

## 1.1 Konunun Anlam ve Önemi

Nüfus artışı ve sanayileşmeye bağlı olarak artan katı atık miktarı ve bu atıkların bertarafı büyük kentler için giderek daha önemli bir sorun teşkil etmektedir. Oluşan atıkların mevsimsel değişimler, bölgenin gelir düzeyi, sosyoekonomik faaliyetler gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterdiği bilinmektedir. Bu verilerde atığa uygulanacak bertaraf sistemini etkilemektedir. Günümüzde katı atıkların bertaraf edilmesi için farklı teknolojiler geliştirilmekte ve mevcut teknolojiler iyileştirilmektedir. Gelişmiş ülkelerde 1970'li yıllardan itibaren yakma ve düzenli depolama yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. 1990-2000'li yıllarda ise gazlaştırma ve biyometanizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 2005 yılında Avrupa Birliği üyesi ülkelerde geri dönüşümü olmayan atıkların bertarafı için düzenli depolamaya son verilmiş termal bertaraf zorunlu kılınmıştır (Kayalak, 2007).

Atıkların, termal bertaraf yöntemleri kullanılarak bertarafı büyük maliyetler gerektirmektedir. Bu da atıkların bertarafı sonrasında ekonomik değeri olan son ürün ve enerji elde etmeye yönelik çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Atıklar bileşenlerine bağlı olarak enerji potansiyeli oldukça yüksek maddelerdir. Dünyada enerji tüketiminin hızla artması buna karşın kaynaklarının hızla tükenmesi; atıkların enerji potansiyellerinin değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Dünya genelinde atıktan pek çok sistemle enerji üretimi söz konusudur. Ancak enerji üretiminin %90'ı yakma ile sağlanmaktadır (Tezcakar, Can, 2010). Atıkların biyokütle tabanlı kısmından elde edilen enerji yenilenebilir enerji kaynağı kapsamında ele alınabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun kapsamında atıktan enerjiye teşvik miktarının artırılmasıyla atıkların enerji elde edilebilecek tesislerde işlenmesi sayesinde atık problemi kazanca dönüştürülebilecektir. Dünyada bu şekilde lokal enerji ihtiyacının büyük kısmını sağlayan tesisler bulunmaktadır.

Dolayısıyla bu tekniklerin Türkiye yaygınlaşması Türkiye'deki atık üretimi ve enerji tüketimi göz önünde bulundurulduğunda oldukça verimli olacaktır.

Ülkemizde AB uyum süreci çerçevesi doğrultusunda atık yönetim mevzuatlarında değişiklikler yapılmış ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan düzenli depolama alanlarına gönderilen atık miktarlarının azaltılmasına yönelik politika oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik ile biyobozunur atıkların düzenli depolama sahalarında bertarafı ile ilgili kısıtlamalar getirilmiştir. Bu durumda biyolojik olarak ayrışabilir atıkların düzenli depolama alanları dışına gönderilen kısmına kompostlaştırma yapılarak arıtma ve yakma/gazlaştırma gibi termal bertaraf yöntemlerinin kullanımı gerekecektir. İstanbul için yönetmelikler ve Avrupa Birliği Direktifleri ile uyumlu bütünlük atık yönetimi oluşturulması kapsamında birçok çalışma yapılmış ve yapılması gereken yatırımlar için çeşitli senaryolar belirlenmiştir. Yönetmelikler doğrultusunda yapılan bu çalışmalarda termal bertaraf sistemlerinin gerekliliği vurgulanmıştır (İBB, 2010).Türkiye'de katı atık yönetiminin geliştirilmesi amacıyla 2006 yılında JBIC firmasının hazırlamış olduğu raporda İstanbul yakma, yakma ve biyolojik arıtma kombinasyonu ile yakma ve metan gazlaştırma sistemlerinin kombinasyonu İstanbul için önerilen sistemlerdir ( JBIC pilot study team, 2006). 2005 yılında İBB tarafından hazırlanan İstanbul Katı Atık Stratejik Planınınında; Kaynağında ayrı toplama yapılan nüfus dışındaki il nüfusunun; yaklaşık %70' ini oluşturan nüfusun atıkları karışık olarak konteynerlarda toplanarak aktarma istasyonları üzerinden termal dönüşüm tesislerine iletilmesi ve termal arıtma ile enerji geri kazanımı sağlanması ve bu tesislerin ilk olarak 2013 yılında işletmeye alınması öngörülmüştür. Yine 2005 yılında hazırlanan Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımları Planlanması Projesi Katı Atık Sektörü AB Direktifleri ile Uyumlu Ulusal Master Planı çalışmasında ise düzenli depolama alanlarına giden organik atık miktarının azaltılması için atıkların %20-30 una kompost %70-80 lik kısmına ise termal bertaraf sistemlerinin uygulanması öngörülmüştür. Çizelge 1.1'de Türkiye için AB Atık Direktifleri ile uyumlu zaman çizelgesi bulunmaktadır.

**Çizelge 1.1:** AB Direktifleri ile uyumlu zaman çizelgesi (Öztürk,2010)

Bölge	Tanım	Ayrı Toplama/ Kompostlaştırma (Kentsel alan)	ATM/MGT/Atık Kumbaraları		Termal Dönüşüm (Yakma/Gazlaştırma)	Düzenli Depolama	İ&Y Geri Dönüşümü/ Biyometanizasyon
			Kentsel Alan	Kırsal Alan			
1a	İstanbul,İzmir Büyükşehirler	2010 (%20)	2008/ 2010	2010/ 2015	2013- 2017	2008/ 2009	2008/ 2011
1b	Diğer Büyükşehir Belediyeleri	2015 (%30)	2010/ 2015	2015/ 2020	2022	2011/ 2016	2011/ 2016
1c	Diğer Belediyeler (Orta/küçük)	2015 (%100)	2015/ 2020	-	-	2016/ 2020	2014/ 2020
2a	Ankara (Büyükşehir)	2012 (%20)	2008/ 2010	2010/ 2015	2018	2008/ 2009	2008/ 2011
2b	Antalya /İçel (Turistik şehirler)	2012 (%30)	2008/ 2010	2010/ 2015	2019	2011	2009/ 2011
2c	Diğer Büyükşehir Belediyeleri	2015 (%20)	2010/2015	2015/ 2020	2022- 2023	2011/ 2016	2012/ 2016
2d	Diğer Belediyeler Karadeniz (Orta/küçük)	2015 (%64)	2015/ 2020	-	2021 (4Tesis)	2016/ 2020	2016/ 2020
2e	Diğer Belediyeler Akdeniz ve İç Anadolu	2015 (%50)	2010/ 2015	2015/ 2020	-	2011/ 2016	2012/ 2016
3a	Gaziantep (Büyükşehir)	2013 (20%)	2008/ 2010	2015/ 2020	2019	2012	2008/ 2011
3b	Diğer Büyükşehir Belediyeleri	2014 (%100)	2010/ 2015	2015/ 2020	-	2011/ 2016	2012/ 2016
3c	Diğer Belediyeler (Orta/küçük)	2020 (%24)	2010/ 2015	-	-	2016/ 2020	2017/ 2020

## 1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı İstanbul'da oluşan kentsel atıkların bertarafı için yapılması planlanan termal bertaraf sistemlerinden kütleli yakma ve gazlaştırma teknolojilerinin ayrıntılı biçimde incelenerek, başlıca üstün ve zayıf yönlerinin belirlenmesidir. Bu doğrultuda her iki sistem için İstanbul'daki atık verileri kullanarak hesaplamalar yapılmış ve uygulanabilirlikleri incelenmiştir. Kütleli atık yakma sistemlerinde İstanbul'daki kentsel katı atıkların 2010 ve 2009 yılı öncesi yapılan kalorifik değer çalışmalarındaki sonuçlar esas alınmış olup 2020 yılında ulaşılması öngörülen kalorifik değer kullanarak hesaplamalar yapılmıştır. Kütleli yakma sistemlerinde kalorifik değerinin düşük ve nem muhtevasının fazla olduğu durumlarda ek yakıt olarak 6 numaralı fuel oil kullanılmıştır. Atık yakma sistemleri sonucunda oluşan kirletici emisyonlar hesaplanarak emisyonları baca gazı deşarj standartlarına uygun şekilde deşarj etmek için gerekli hava kirliliği kontrol sistemleri seçilmiştir. Her iki termal sistem için İstanbul atıklarının ek yakıtsız yanması için gerekli olan kalorifik değerler ve uygulama koşulları belirlenmiştir. Kütleli atık yakmada enerji ve kütle dengelerini belirlemek amacıyla Excel tabanlı model oluşturularak bu model yardımı ile atıkların yakılması sonucu elde edilecek enerji ve sistemde oluşan kayıplar hesaplanmıştır. Gazlaştırma sistemi için benzer hesaplamalarda UMDE firmasına ait gazlaştırma prosesi tasarım modeli kullanılmıştır. Her iki sistem (kütleli yakma ve gazlaştırma) enerji geri kazanımı sağlanacak şekilde tasarlanmış ve atıkların bertarafı sırasında kazanılabilecek elektrik enerjisi ve ısı miktarları belirlenmiştir. Termal bertaraf sistemlerinde üretilen enerjinin yenilenebilir enerji teşviği kapsamında değerlendirilebilmesi veya aksi durum için sistemde sağlanan gelir hesaplanmıştır. Tez sonunda, ton atık başına atık maliyetleri ile temel atık bertaraf tarifesi ortaya konmuştur.

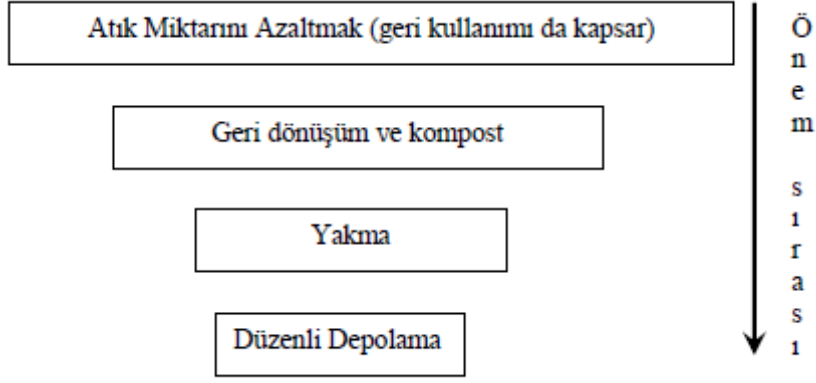
## 2. ATIK YÖNETİMİNİN GENEL ESASLARI

### 2.1 Atık Yönetiminin Tanımı ve Kapsamı

Atık çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Atık OECD tarafından mevcut durumda ya da yakın gelecekte ekonomik değeri olmayan ve arıtma ya da bertarafı gerekli olan kaçınılmaz maddeler olarak tanımlanmıştır. UNEP tarafından ise; kullanıcısı tarafından istenmeyen, kullanılmayan ihtiyaç duyulmayan, arıtma veya bertarafı gerekli olan maddeler olarak tanımlanmıştır (Tchobanoglous ve Kreith 2002). Katı atıklar kontrolü yönetmeliğine göre ise katı atık ‘üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeleri ve arıtma çamurudur. (Çevre ve Orman Bakanlığı, [ÇOB] 1991)

Atık yönetimi; oluşan atıkların; çevre ve insan sağlığına tehdit oluşturmayacak şekilde, etkilerinin en aza indirilmesi, halkın geri kullanım ve geri dönüşüm konusunda eğilimleri de göz önünde bulundurularak, oluşturulan tutum çerçevesinde yönetilmesini amaçlar. Bu amaca ulaşmanın en kısa yolu ise atık üretimini azaltmaktır. Bu da üretim proseslerinde yapılan iyileştirmeler ve hammadde kullanımı ile doğrudan ilgilidir. Katı atık yönetimi birçok disiplinin farklı teknolojiler kullanılarak birlikte çalıştığı bir sistemdir (Karakaya,2008). Entegre atık yönetimi atığın toplanması, çevresel açıdan faydalı ekonomik ve toplum tarafından kabul edilen arıtma ve bertaraf metodunun seçilmesi işlemlerinin tümünü kapsayan kombine bir sistemdir. Entegre atık yönetimi aynı zamanda ilgili yasal mevzuatta öngörülen hususların sağlanmasını da kapsar (Büyükbektaş, 2008) . Atık yönetiminde uygulanan yöntemler birbirinden bağımsız olmayıp bütünlük içerisindedir. Sistemlerin kendi içindeki verimi bir sonraki sistemi etkilemektedir. Örneğin atık toplama işleminin şekli geri kazanım oranını etkiler.

Dolayısıyla atık yönetiminin sürdürülebilir ve bütünsel bir yaklaşımla ele alınması önemlidir. EPA entegre katı atık yönetimi bileşenleri önem sırasına göre Şekil 2.1’deki akıma göre sıralamaktadır. Bu aynı zamanda atık yönetiminde uyulması gereken hiyerarşiyi göstermektedir.



**Şekil 2.1** : EPA modeli atık yönetim hiyerarşisi (Karakaya, 2008).

Atık üretiminin engellenmesi; atık oluşuktan sonra bertaraf etmektense atığı kaynağında azaltmak doğal kaynakları ve enerji rezervlerini korumaktadır. Bu Birleşmiş Milletler Çevre Programında tanımlanan temiz üretim kavramının arkasındaki anlayıştır. Buna göre bir ürün veya işlemin yaşam süresindeki tüm aşamalara atık oluşumunu ve kısa/uzun dönem insan sağlığı ve çevre risklerini önleme veya en aza indirme amacıyla yaklaşmak gerekmektedir (Durmuşoğlu, 2006). Üretim proseslerinde yapılan iyileştirme ve hammaddenin verimli kullanılması ile bu süreçlerde oluşan atıklarının bertarafını gereksiz hale getirmeyi hedeflemektedir.

Geri Dönüşüm ve kompost bu hiyerarşide 2. sırada olup atığın tamamen önlenemediği gerçek dünyada olumsuz çevresel etkileri azaltabilme açısından önemli bir seçenektir. Geri dönüşüm işlemi atığın toplanması ve ayrılmasından sonra tekrar işleme tabi tutularak başka bir forma sokulmasını kapsar. Bu sistemin verimi atığın ayrı toplanması sonucu artmaktadır. Kompostlaştırma prosesi, organik maddelerin kontrollü çevresel şartlar altında biyolojik olarak ayrıştırılması ve stabilizasyonudur. Kompost ise proses sonucu oluşan, stabil, humus benzeri ve toprak şartlandırıcısı olarak kullanılan üründür. Kompostlaştırma, geri dönüşüm ve kaynakların yeniden kullanımının en yüksek formudur. Kompost, üretilen organik maddenin tekrar kullanıma sunulmak üzere yapılan geri dönüşüm faaliyetinin faydalı son ürünüdür. Gelişmekte olan ülkelerde katı atıklar içerisindeki organik atık bileşeni genellikle yüksek olduğundan, kompostlaştırma katı atıkların yönetiminde uygun bir alternatif olmaktadır (Sezer,2008).

Yakma teknolojileri atığın hacmini küçültmek ve sterilizasyonu için yapılmaktadır.

Kentsel katı atık doğrudan herhangi bir ön işlem olmadan veya AKY denilen karışık toplanmış kentsel katı atıktan yanabilen ve yanamayan kısımların ayrılması sonucu elde edilen atık kaynaklı yakıtın yakılması ile gerçekleştirilebilir. Atığın yakılmasında temel olarak 4 amaç bulunur. Bunlar;

1. **Hacim azaltma:** Kentsel atığın içeriğine bağlı olarak bertaraf edilecek atığın hacimce ortalama % 90, ağırlıkça % 70 oranında azalır.

2. **Atığın stabilizasyonu:** Yakmadan çıkan kül kentsel katı atığın okside olmasına bağlı olarak daha inerttir. Bu nedenle düzenli depolamada çıkabilecek sızıntı oluşumu veya kirletici emisyonların oluşumunu azaltır.

3. **Atıktan enerji eldesi:** Atığın yakılması sonucu oluşan buhar elektrik yada ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Atıklar kalorifik değerleriyle bağlantılı olarak enerjiye dönüştürülürler. Kentsel katı atığın enerji içeriğinin biyokütle kısmından oluşması katı atığın yakılması sonucu üretilen enerjinin yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesine imkan vermektedir.

4. **Atığın sterilizasyonu:** Kentsel katı atığın yüksek sıcaklıkla bertarafı ile patojenler yok olur.

Düzenli depolama atık hiyerarşisinde son basamakta yer almaktadır. Düzenli depolama alanlarının kullanımı atığın kaynaktan azaltılması ve geri dönüşümün artmasıyla önemli ölçüde azalabilmektedir. Ancak depolama alanları tamamen saf dışı bırakılamaz. Bunun sebebi diğer bertaraf yöntemleriyle bertaraf edilemeyen veya yakma gibi teknolojiler sonucu oluşan son ürünler düzenli depolama alanlarına gönderilmektedir. Bu sebepten dolayı atık yönetim hiyerarşisinde son basamakta bulunmaktadır. Diğer yöntemlerin etkili bir şekilde kullanımı düzenli depolama alanlarının büyük arazi ihtiyacını azaltmaktadır (Mahini, 2006).

## 2.2 Yasal Çerçeve

### 2.2.1 Ulusal atık mevzuatı

Ülkemizde, sürdürülebilir çevre ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda, çevrenin korunması, iyileştirilmesi ve çevre kirliliğinin önlenmesine yönelik ilk çalışmalar, 1983’de yürürlüğe giren Çevre Kanunu ile başlamıştır. 2872 sayılı Çevre

Kanunu'nun 11. maddesi gereğince, Büyükşehir Belediyeleri ve belediyeler, evsel katı atık bertaraf tesislerini kurmak, kurdurmak, işletmek veya işlettirmekle yükümlüdür (Doğru, 2006). Yerel yönetimler katı atıklarla ilgili yükümlülüklerini ayrı ayrı ya da atık yönetim birlikleri kurarak yerine getirebilirler. Atık yönetimi ile ilgili ulusal mevzuat, katı atıklar, ambalaj atıkları, tehlikeli atıklar, tıbbi atıklar ile inşaat, yıkıntı ve hafriyat atıklarının kontrolü üzerine odaklanmıştır (Karaduman, Öztürk, Özabalı, Eriçyel 2009). Şu an yürürlükte olan ilgili yönetmelikler ise aşağıda belirtilmiştir;

- Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik (ÇOB, 2008)
- Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (ÇOB, 1991)
- Ambalaj ve Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (ÇŞB, 2011)
- Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği (ÇOB, 2004.b)
- Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (ÇOB, 2004.a)
- Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği (ÇOB,1993)
- Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik(ÇOB,2010.a)
- Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik (ÇOB,2010.b)

Kentsel katı atıklar için büyük önem taşıyan yönetmelikler; Atık yönetimi genel esaslarına ilişkin yönetmelik, Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Ambalaj ve Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair yönetmelik kısaca ele alınmıştır. Atık Yönetimi Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik; 05.07.2008'de yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin amacı; atıkların oluşumlarından bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetimlerinin sağlanmasına yönelik genel esasların belirlenmesidir (ÇOB, 2008).

Atık üretiminin ve atığın zararlılığının; doğal kaynakların az kullanıldığı temiz teknolojiler kullanılarak ve üretim, kullanım, bertaraf esnasında çevreye en az zarar verecek tekniklerin kullanılması ile azaltılmasını belirtmektedir. Atık üretiminin kaçınılmaz olduğu durumlarda ise geri dönüşüm, tekrar kullanım, ve ikincil hammadde elde etme amaçlı diğer işlemler ile atığın geri kazanılması veya enerji kaynağı olarak kullanılması esas olduğu belirtilmektedir. Bunun dışında atığın uygun yöntem ve teknolojiler kullanılarak bertaraf edilmesi zorunlu kılınmaktadır (Karaduman ve diğ. 2009).

Katı atıkların kontrolü yönetmeliği; 1991 yılında yayınlanmıştır. Bu Yönetmelik, meskun bölgelerde evlerden atılan evsel katı atıkların, park, bahçe ve yeşil alanlardan atılan bitki atıklarının, iri katı atıkların, zararlı atık olmamakla birlikte evsel katı atık özelliklerine sahip sanayi ve ticarethane atıklarının, evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının ve zararlı atık sınıfına girmeyen sanayi arıtma tesisi çamurlarının, toplanması, taşınması, geri kazanılması, değerlendirilmesi, bertaraf edilmesi ve zararsız hale getirilmesine ilişkin esasları kapsar (ÇOB, 1991). Bu yönetmelik katı atıkların yönetimi konusunda teknik ve idari pek çok hüküm içerdiğinden dolayı Türkiye’de atık yönetimine yönelik işlemlerde bağlayıcı niteliktedir (Karaduman ve diğerleri 2009). Bu yönetmelik kapsamında belediyeler; Geri kazanılabilen veya insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden bertarafı mümkün olan maddelerin kullanılmasını ve geri kazanılmış maddelerden imal edilen malzeme ve ürünlerin tercih edilmesini, teşvik etmekle yükümlüdürler. Buna ilave olarak yönetmelikte 8. Maddede ayrı bertaraf edilmesi gereken atıklar kapsamındaki; hastane, klinik ve laboratuarlardan kaynaklanan tıbbi atıklar ile evsel atık içerisindeki geri kazanılabilir atıklar, atık pil ve akümülatörler, atık lastikler, elektrikli ve elektronik ekipman atıklarını ayrı toplamakla da yükümlüdür(ÇOB, 1993).

Ambalaj atıkların kontrol yönetmeliği; T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından 2007 yılında yayınlanmıştır. Bu yönetmelik ambalaj atıklarının öncelikle önlenmesi, önlenemeyen ambalaj atıklarının tekrar kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım yolu ile bertaraf edilecek miktarının azaltılması ve ambalaj atıklarının ayrı toplanması, taşınması ve ayrıştırılması konusunda teknik ve idari hükümler içerir. Bu yönetmeliğe göre Ambalaj atığı üreticileri; ilgili oldukları belediyeler tarafından hazırlanarak Bakanlığa sunulan ambalaj atığı yönetim planı doğrultusunda belirlenen toplama sistemine uygun olarak biriktirmek ve bedelsiz olarak belediyenin sistemine

vermekle yükümlüdürler. Buna ilave olarak ürünlerini ambalajlı olarak piyasaya süren işletmeler yönetmelikte 19.maddede yer alan geri kazanım hedeflerini yerine getirmekle yükümlüdür. Çizelge 2.1 'de görüldüğü gibi geri kazanım hedefleri yönetmelik yürürlüğe girdiği tarihten itibaren 2020 yılına kadar kademeli olarak artmaktadır

**Çizelge 2.1 : Ambalaj ve ambalaj atıkları kontrol yönetmeliği geri kazanım hedefleri ( ÇŞB ,2011)**

Malzemeye göre yıllık geri kazanım hedefleri (%)					
Yıllar	Cam	Plastik	Metal	Kağıt/Karton	Ahşap
2005	32	32	30	20	-
2006	33	35	33	30	-
2007	35	35	35	35	-
2008	35	35	35	35	-
2009	36	36	36	36	-
2010	37	37	37	37	-
2011	38	38	38	38	-
2012	40	40	40	40	-
2013	42	42	42	42	5
2014	44	44	44	44	5
2015	48	48	48	48	5
2016	52	52	52	52	7
2017	54	54	54	54	9
2018	56	56	56	56	11
2019	58	58	58	58	13
2020	60	60	60	60	15

Tablodan görüldüğü üzere yönetmelik, 2020 yılında % 60'lık ambalaj atıkları geri kazanım hedefine ulaşılmasını amaçlamaktadır. Bu aynı zamanda Ulusal mevzuatta geri kazanım için nihai değerin % 60'e sabitlendiği anlamına gelir (Karakaya,2008).

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik; atıkların düzenli depolanması sürecinde oluşan sızıntı suları ve depo gazının hava ve yer altı sularına verebileceği muhtemel zararları önlemek, atıkların karakterine uygun depo sahası inşa edilmesi, tesislere gelen atıkların kabul işlemleri ve depo alanı dolduktan sonra kapatılması daha sonrasında kontrol işlemleri ile ilgili idari ve teknik hususları kapsamaktadır.

Bu yönetmelik ile gelen en önemli yenilik depolama alanına gelen biyobozunur atık oranlarının sınırlanmasıdır. Bu yönetmeliğe göre yürürlüğe giriş tarihinden itibaren 5 yıl içerisinde depolanacak olan biyobozunur atık miktarının, 2005 yılında üretilen toplam biyobozunur atık miktarının ağırlıkça % 75'ine, 8 yıl içinde % 50'sine ve 15 yıl içinde ise %35'ine indirilmesi öngörülmektedir.

## 2.2.2 Belediyelerin yasal sorumlulukları

5491 sayılı “2872 sayılı Çevre Kanunu’nda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun”, “Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği”, 5216 sayılı “Büyükşehir Belediyesi Kanunu” ve 5393 sayılı “Belediye Kanunu”na göre; genel olarak mücavir alan sınırları içinde belediyeler, bu alanlar dışında ise mahallin en büyük mülki amiri; evsel ve evsel nitelikli endüstriyel atıkların çevreye zarar vermeden bertarafını sağlamak, çevre kirliliğini azaltmak, katı atık depo sahalarından azami istifade etmek ve ekonomiye katkıda bulunmak amacıyla, evsel katı atıklar içindeki değerlendirilebilir katı atıkları sınıflandırarak ayrı toplamak ve bunlarla ilgili tedbirleri almakla yükümlüdürler. Türkiye’de toplam 2.947 adet Belediye bulunmaktadır (T.C İçişleri Bakanlığı, 2010). Belediye atıklarının yönetimi faaliyetlerini gerçekleştirmekle yükümlü olan çok sayıdaki küçük belediyenin her birinin teknik ve maddi yetersizlikler nedeniyle entegre atık yönetim sistemini kurması mümkün olmadığından, Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından daha etkin ve verimli bir atık yönetim sisteminin geliştirilebilmesi için birbirine yakın ve benzer özelliklere sahip belediyelerin bir araya gelerek Belediye Birlikleri/ Atık Yönetim Birliklerini oluşturması çözüm olarak ortaya konmuştur ve yakma tesislerinin de kurulmak istenmesi durumunda birlik modeli uygulanmalıdır (Erdem, Türkmen, Ercan Çubukcu 2010). Ayrıca bölgesel işbirliği sayesinde atık yönetimi ile ilgili yatırım programlarının finansmanı için rasyonel bir zeminin oluşturulması bu programlar için yapılan harcamaların koordinasyonunun sağlanması, atık yönetiminin iyileştirilmesi için kullanılacak kaynakların bulunması, yönetilmesi, finansman kaynaklarına kolay ulaşamayan küçük ve mali açıdan zayıf belediyelerin atık yönetim yatırımlarının finansmanın kolaylaşması ,en uygun ve ekonomik teknolojiye yatırım yapılması elverişsiz atık bertaraf uygulama deneyimlerine dayanılarak herhangi bir katı atık düzenli depolama sahasının yerleşimine karşı meydana gelecek tepkileri ve endişeleri ortadan kaldırmak için yüksek standartlarda katı atık düzenli depolama tesisi yapılmasına imkan vermesi mümkün olabilmektedir (Erdem v.d 2008)

### 2.2.3 Büyükşehirler için atık yönetimi stratejileri

Türkiye’de atık yönetiminin mevcut durumunu belirlemek ve AB mevzuatı ile uyumlu şekilde planlamak üzere Çevre ve Orman bakanlığı koordinasyonuyla 2005 yılında Türkiye İçin Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımlarının Planlanması Projesi (EHCIP) ve bu projenin devamı niteliğinde birinci aşaması 2006 ikinci aşaması 2009 yılında tamamlanan Katı Atık Ana Planı (KAAP) hazırlanmıştır. EHCIP projesi kapsamında Türkiye’de ki katı atık sektöründeki mevcut durum belirlenmiş ve AB mevzuatları ile uyumu için gerekli finansman analizi yapılmıştır. KAAP projesi ise bu projenin devamı niteliğinde olup Büyükşehir dışındaki belediyeler için atık yönetimi konusunda yol göstermektedir (Öztürk,2010).

EHCIP projesi kapsamında Türkiye belli bölgelere ayrılması ve katı atık yönetiminin sunulacağı atık birlikleri oluşturulması öngörülmüştür. Bu bağlamda Çizelge 2.2’de görüldüğü üzere Türkiye toplam 3 ana ve 11 alt bölgeye ayrılmıştır.

**Çizelge 2.2 :** Türkiye’de karakteristik belediye gruplarının tanımlanması (ENVEST, 2005)

Bölge	No	Alt Bölge
Marmara /Ege Bölgesi	1a	İstanbul, İzmir (Büyükşehirler)
	1b	Diğer Büyükşehir Belediyeleri
	1c	Diğer Belediyeler(orta/küçük)
Akdeniz/Karadeniz/ İç Anadolu Bölgesi	2a	Ankara (Büyükşehir Belediyesi)
	2b	Antalya/ İçel (Turizm şehirleri)
	2c	Diğer Büyükşehir Belediyeleri
	2d	Diğer Belediyeler Karadeniz (orta/küçük)
	2e	Diğer Belediyeler Akdeniz (orta/küçük)
Doğu Anadolu/ Güneydoğu Anadolu Bölgesi	3a	Gaziantep (Büyükşehir)
	3b	Diğer Büyükşehir Belediyeleri
	3c	Diğer Belediyeler (orta/küçük)

Atık birlikleri oluşturulurken Türkiyedeki coğrafi şartlar, nüfus yoğunluğu ve yol durumu gibi parametreler göz önünde bulundurularak birliklerin hizmet edeceği nüfus 300000 kişi olarak belirlenmiş ve 30-60 km mesafelerde olabildiğince fazla nüfusa hizmet vermek üzere oluşturulması hedeflenmiştir. Bu proje kapsamında ulusal katı atık yönetim senaryoları ve çizelge hude görüldüğü üzere yatırım maliyeti tahminleri incelenmiştir.

**Çizelge 2.3 : Ulusal katı atık yönetimi seneryoları ve katı atık tahminleri (ENVEST,2005)**

Türkiye	Milyar YTL	Miyon AVRO	YTL/kişi	AVRO/kişi
1a	15,4	9,069	215	126
1b	16	9,438	223	131
1c	19,9	11,712	277	163
2	21,4	12,569	297	175
2a	-	-	-	~170
<b>Diğer Ülkeler</b>				
Çek Cumhuriyeti	-	1152	-	112
Macaristan	-	2000	-	198
Polonya	-	1800-3000	-	50-80
Romanya	-	2788	-	123

1. Senaryo atıkların ikili toplanması ve kompostlaştırılması esasına dayanmaktadır ve 3 alt senaryo halinde incelenmektedir. Senaryo 1a ve 1b ikili toplama, atık toplama merkezleri, maddesel geri kazanım tesisi, düzenli depolama tesisi, inşaat ve yıkıntı atıkları geri dönüşüm tesisi ve biyometanizasyon tesisi bileşenlerini içeren 119 adet bölgesel atık yönetim tesisini esas alır. Ancak 1b senaryosunda Ambalaj Atıkları Kontrol Yönetmeliği uyarınca devreye girme tarihleri daha erkendir. 1c senaryosunda ise diğerlerine ilave olarak 1a bölgesi (İstanbul ve İzmir) ile Karadenizde ki 4 merkez için (Ordu, Giresun, Trabzon ve Rize) yakma tesisi önerilmektedir. Senaryo 2 ise senaryo 1c den farklı olarak yakma tesisinin 7 yıl önce devreye alınmasının planlanmasıdır. Senaryo 2 a ise AB'ye uyum senaryosu olarak ifade edilmekte ve büyükşehirlerde sınırlı oranda (% 20-30) ikili toplama ve kompostlaştırma ve ambalaj atıklarının geri dönüşümü uygulanarak AB direktifine uyum sağlanması hedeflenmiştir. Bu senaryolardan en uygun olanının seçiminde esas alınacak kriter AB ambalaj atıkları geri kazanımı ve biyobozunur atıkların düzenli depolama alanının dışına yönlendirilmesi ile ilgili hedeflerin sağlanmasıdır. Bu yaklaşım senaryoları ile biyobozunur atıkların düzenli depolama alanı dışına gönderilmesi ile ilgili ulaşılabilecek hedefler Çizelge 2.4'te görülmektedir.

**Çizelge 2.4 : Yaklaşım seneryoları çıktılarının hedeflerle karşılaştırılması (ENVEST, 2005)**

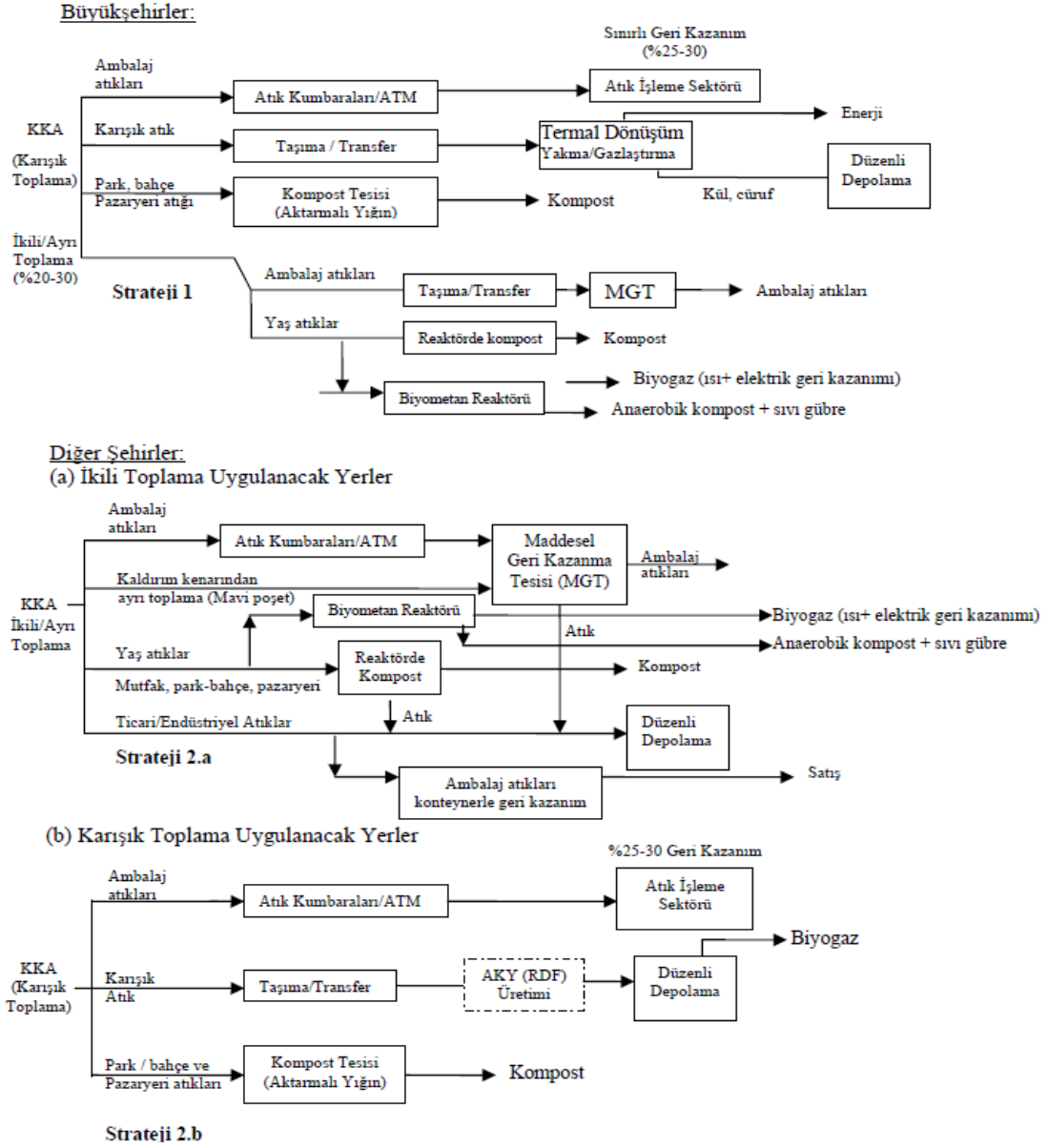
Senaryolar	1995	2010	2013	2020
<i>AB hedefleri</i>		- 75%	50%	35%
Mevcut Durum	100%	75%	82%	100%
Senaryo 1a	100%	55%	55%	60%
Senaryo 1b	100%	55%	54%	60%
Senaryo 1c	100%	50%	48%	43%
Senaryo 2	100%	42%	38%	39%
Senaryo 2a	100%	69%	48%	35%

KAAP projesi kapsamındaysa ECHIP projesi büyükşehir dışındaki belediyeler için yerel şartlar gözden geçirilmiş ve revise edilmiştir. Bu bağlamda atık yönetimin de öngörülen sistemler işletmeye alma tarihleri Çizelge 2.5’de ki gibidir.

**Çizelge 2.5 : Büyükşehir dışındaki Belediyeler için AB ile uyumlu atık yönetimi zaman çizelgesi (Öztürk, 2010)**

Bölge	Ayrı toplama /Kompost (Kentsel)	MGT	ATM/Atık Kumbaraları		Yakma	Düzenli Depolama	İ&Y Geri Dönüşümü/ Biyometan.	
			Kentsel	Kırsal				
1c	Marmara/Ege (Büyükşehirler hariç)	2015(%100)	2015	2010/2015	-	-	2016	2014/2020
2d	Karadeniz (Büyükşehirler hariç)	2015(%100)	2015	2010/2015	-	-	2016	2016/2020
2e	Akdeniz/İç Anadolu (Büyükşehirler hariç)	2015(%50)	2015	2010/2015	2015/2020	-	2011	2012/2016
3c	Doğu/ Güneydoğu Anadolu İkili toplamalı (Büyükşehirler hariç)	2020 (%24)	2020	2015/2020	-	-	2016	2017/2020
3c	Doğu/ Güneydoğu Anadolu İkili toplamamasız (Büyükşehirler hariç)	-	-	2015/2020	-	-	2016	2017/2020

Bu proje kapsamında yeni atık birlikleri oluşturulmuştur ve Türkiye'nin AB üyelik sürecinde öngörülen atık yönetim sistemleri için en uygun kombinasyonlar belirlenmiştir. Büyükşehirler ve büyükşehir dışındaki şehirler için belirlenen bu kombinasyonlar Şekil2.2’ de görülmektedir.



**Şekil 2.2 :** Büyükşehirler ve büyükşehir dışındaki şehirler için belirlenen bu kombinasyonlar (Öztürk,2010)



### **3. TERMAL ATIK BERTARAF YÖNTEMLERİ VE İLGİLİ ULUSLARASI DENEYİMLER**

#### **3.1 Giriş**

Kentsel katı atıklarla bertarafında önemli bir yöntem atıkların yakılarak zararlı etkilerinin azaltılması ve atıkların enerji formuna dönüştürülmesidir. Termal sistemler sisteme verilen hava miktarına göre sınıflandırılırlar. Bunlar; piroliz, yakma ve gazlaştırma teknolojileridir. Bu sistemlerin temel özellikleri çizelge 3.1’ de görülmektedir. Yakma sistemleri en yaygın kullanılan sistemdir ve atığın sitokiyometrik orandan fazla oksijenle yüksek sıcaklıkta yanma ürünlerine dönüştürülmesine dayanır. Kentsel katı atıkların yakılması ile hacimce % 90 ağırlıkça % 70 bir azalma sağlanır (Öztürk, 2010). Atık yakma sistemi düzenli depolama sistemlerine göre daha kısa sürede atığın bertarafının gerçekleştirilmesi ve daha az alan ihtiyacının olması gibi avantajlara sahiptir ancak düzenli depolamaya göre daha pahalı bir bertaraf yöntemidir (Tchobanoglous ve Kreith 2002). Avrupa Birliği üyesi ülkelerde ise 400’e yakın katı atık yakma tesisinde her yıl 59 milyon ton evsel katı atık termal yollarla bertaraf edilmektedir. Bu tesislerde yılda 7 milyon evin ihtiyacı olan 23 milyon GW-saat elektrik enerjisi üretilmektedir. Bunun yanında, üretilen 58 milyon GW-saatlik ısı enerjisi ile 13 milyon konutun ısı ihtiyacı karşılanmaktadır (Saltabaş, Soysal, Yıldız, Balahorli, 2010.). Yakma sistemi Japonya gibi düzenli depolama için uygun alan bulunmayan ülkelere yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin Japonyada üretilen yaklaşık 50 milyon ton atığın % 77’ si sayısı 1300’ü aşan tesiste yakılmaktadır (Saltabaş ve diğ., 2010). Piroliz yöntemi ise atığın oksijensiz ortamda ısı geri kazanımı olarak tanımlanabilir ve endotermik bir ısı işlemidir. Organik maddeler ısı olarak kararlı bir yapıda değildir. Bu nedenle, organik madde oksijensiz ortamda ısıya maruz bırakıldığında, ısı bozunma ve yoğunlaşma reaksiyonları sonucu katı, sıvı ve gaz son ürünlere dönüşür (Apaydın, 2008).

Bu ürünler;

1. Gaz: Hidrojen, metan, karbondioksit, karbonmonoksit ve çeşitli diğer gazlar.

2. Sıvı: Katran veya yağ içeriği (asetik asit, aseton, metanol ve oksitlenmemiş HC). Oluşan sıvı işlendiğinde 6 nolu fuel-oil eşdeğeri yakıt eldesi mümkündür.
3. Katı: Kömür yapısında yüksek karbon içeriğinde ürün oluşur. Oluşan katı bileşenin içeriği evsel atığın inert içeriğini de ihtiva eden maddelerdir.

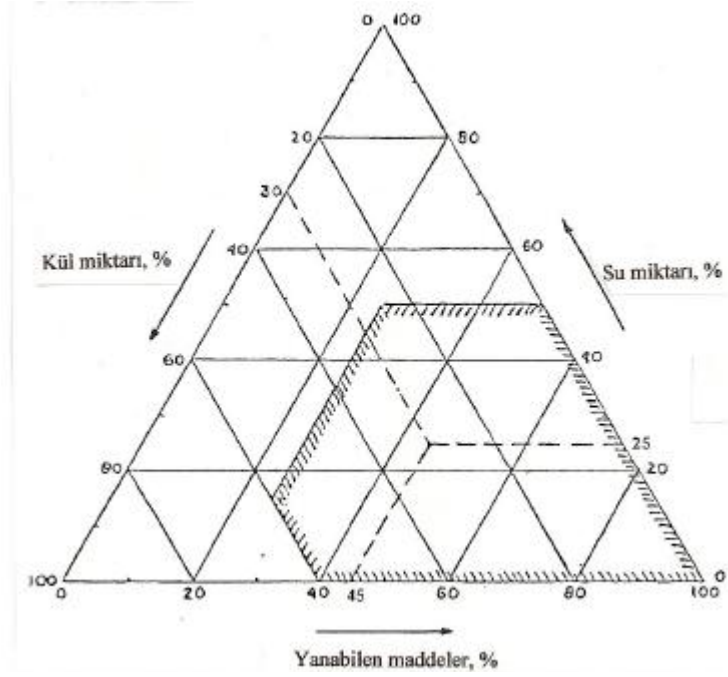
**Çizelge 3.1 : Piroliz yakma ve gazlaştırma sistemlerinin temel özellikleri (European Commission, 2006)**

	Piroliz	Gazlaştırma	Yakma
Reaksiyon sıcaklığı	250-700	500-1600	800-1450
Basınç	1	1-45	1
Siyokiyometrik oran	0	<1	>1
Yanma Ürünleri			
Gaz Faz	H <sub>2</sub> , CO, hidrokarbon, H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
Katı Faz	Kül, katran	Kül, cüruf	Kül, cüruf
Sıvı Faz	Ethanol, asetik asit	-	-

Gazlaştırma işlemi ise atığın siyokiyometrik oksijen ihtiyacından daha az oksijenle birlikte yapılan yakma işlemi olarak tanımlanabilir. Bu tezin konusu bağlamında atık yakma ve gazlaştırma sistemleri ve uygulamaları ileriki bölümlerde detaylı olarak ele alınacaktır.

### 3.2 Atığın Yanabilirliği

Atığın yanabilirliği atığın bileşimine bağlıdır. Atığın nem, kül ve organik madde içeriği atığın kalorifik değer konusunda bilgi verir. Dünya genelindeki atık analizleri ve üst ısıl değerlerden hareketle geliştirilen Tanner Diyagramında atığın nem, kül, organik madde içeriği kullanılarak atığın yanabilirliği konusunda bilgi edinilebilir.



**Şekil 3.1 :** Tanner diyagramı (Akpınar, 2006)

Tanner diyagramında atığın karakteristik değerleri (kül, nem, organik mad.) taralı alan içerisinde kalıyorsa atık ek yakıtta ihtiyaç duymadan yanabilir. Buna karşın diyagramdan da görülebileceği gibi nem içeriğinin artması, yanabilen kısmın azalması atığın ek yakıtsız yanabilen aralığın dışında kalmasına neden olmaktadır.

Atığın yanabilirliğini ölçmek için literatürde ampirik formüllerden oluşan yöntemler bulunmaktadır. Bunlar; fiziksel, elementel ve endüstriyel analiz yöntemleridir. Elementel analiz; Elementel analiz yakıtın yapısındaki kimyasal maddelere dayanan bir analiz yöntemidir. Bu amaçla en yaygın olarak kullanılan eşitlik kömürün ısı değerinin belirlenmesi için kullanılan Dulong denklemidir (Akpınar, 2006)

$$Kj/kg=336,4C+1438,4(H-1/8O)+92,8S \quad (3.1)$$

Bu denklemde C, O, H, S ve N sırasıyla karbon, oksijen, hidrojen ve kükürdün kuru bazda ağırlık yüzdeleridir. Dulong denklemi kömür dışındaki maddelerin kullanımında sonuç vermemektedir dolayısıyla pratikte kullanımı yoktur. Elementel analizde atığın ısı değerini belirlemekte kullanılan diğer bir denklem ise aşağıda gösterilmiştir (Öztürk, 2010).

$$Kj/kg=334,08+1559,04H+14,384O+96,048S-25,056N \quad (3.2)$$

Bu denklemdeki C, H, O, S ve N sırasıyla karbon, hidrojen, oksijen, kükürt ve azotun kuru bazda, yakıtın yakılabilir kısmındaki ağırlık yüzdeleridir.

Elementel analiz ASTM tarafından yayınlanan standart metotlara göre yapılır. Karbon ve hidrojen, yakıt numunelerinin bir tüp fırında yakılmasıyla ölçülür, oluşan su ve CO<sub>2</sub>'de tutularak analizi yapılır (Öztürk, 2010).

Kentsel katı atığın elementel analizi Çizelge 3.2' de görülmektedir.

**Çizelge 3.2 : Kentsel katı atığın tipik elementel analizi (Öztürk, 2010)**

Bileşen	3 farklı KKA numunesinin ortalama değeri
Karbon, C	51,9
Hidrojen, H	7
Oksijen, O	39,6
Kükürt, S	0,37
Azot, N	1,1

Not: Bu tablodaki değerler atık içerisinde herhangi bir inert madde ve nem bulunmadığı varsayılarak hesaplanmıştır.

Fiziksel analiz: Literatürde atığın fiziksel analiz ile kalorifik değerinin hesaplanması ile ilgili eşitlikler mevcuttur. Bunlar;

$$\text{Kcal/kg}=88,2 R + 40,5 (G + P) - 6W \quad (3.3)$$

$$\text{Btu/lb}=49R + 22,5 (G + P) - 3,3W \quad (3.4)$$

$$\text{Btu/lb}=1238 + 15,6R + 4,4P + 2,7G - 20,7W \quad (3.5)$$

Bu formüllerde R, G, P, W sırasıyla; plastik, organik, kağıt atıklarının kuru bazda toplam yüzdesi ve su muhtevasının kuru bazda ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir. Evsel atığın kalorifik değerini hesaplamada bir diğer yol eğer bileşimi biliniyorsa literatürde her bileşen için bulunan kalorifik değerler kullanılarak atığın toplam kalorifik değeri hesaplanabilir. Çizelge 3.3'de her bileşenin kalorifik değeri bulunmaktadır.

**Çizelge 3.3 :** Kentsel katı atık bileşenlerinin ısı değerleri( Akpınar, 2006)

Bileşen	Isıl değer kcal/kg kuru ağırlık
Yiyecek atıkları	1111
Kağıt	4000
Karton	3889
Plastik	7778
Tekstil	4167
Lastik	5556
Deri	4167
Bahçe atıkları	1556
Tahta	4445
Cam	33
Metaller	167
Kül, diğer safsızlıklar	1667

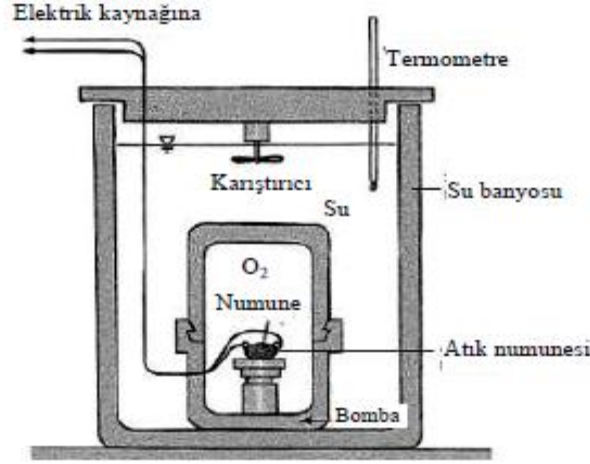
Tahmini Analiz: Tahmini analizde yakıtın uçucu madde ve sabit karbon olmak üzere iki bileşeni olduğu kabul edilir. Uçucuların miktarı yakıt örneğinin 600-800 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yakılmasıyla kaybedilen ağırlıktan tahmin edilir, sabit karbon miktarı ise numunenin 950 °C’de yakılmasıyla meydana gelen ağırlık kaybı sonucu belirlenir (Öztürk, 2010). Tahmini analiz ile atığın kalorifik değerini belirlemede yaygın olarak kullanılan eşitlikler aşağıdaki eşitliklerdir (Öztürk, 2010).

$$\text{kJ/kg}=18560A+22640B \quad (3.6)$$

$$\text{kJ/kg} = 5800.D - 765,6W \quad (3.7)$$

(3.6) numaralı eşitlikte; A;uçucu hidrokarbonu, 600 °C’de uçan toplam kuru madde oranı (%) B; sabit karbonu, 600 °C ile 950 °C’de uçan toplam kuru madde oranını (%) ifade etmektedir. (3.7) numaralı eşitlikte ise D; uçucu maddelerin oranını (kuru bazda, 800 °C’deki ağırlık kaybı olarak) ,W ise orijinal bazdaki su oranını (%) ifade etmektedir.

Atıkların kalorifik değerlerinin belirlenmesinde genel kabul görmüş bir yöntem kalorimetre ile ölçümdür. Bu işlem reaksiyondaki yanma ısısını ölçmek için kullanılan bomba kalorimetresi ile yapılır. Bomba, paslanmaz çelikten yapılmış bir hücredir ve düzenek içerisine ayrı bir kap olarak vidalanarak yerleştirilir Şekil 3.2 bomba kalorimetresinin şematik bir gösterimi bulunmaktadır.

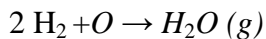
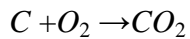


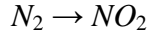
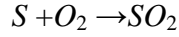
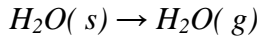
Şekil 3.2 : Bomba kalorimetresi (Öztürk, 2010)

Belli ağırlıktaki örnek, reaksiyon kabı içerisindeki kaba konur ve bomba yaklaşık 30 atm. basınç altında oksijen ile doldurulur (Tanrısever, 2009). Örnek içindeki ince bir tel elektrik kaynağına bağlanır ve elektrik akımı ile ısıtılarak reaksiyon başlatılır. Bu kablolardan sağlanan elektrik enerjisi vasıtasıyla çelik hücre içerisindeki madde yakılır ve bomba ısınır. Reaksiyon başladığında reaksiyon hızlı şekilde gerçekleşir ve büyük miktarda ısı açığa çıkar. Bu ısı kalorimetre etrafındaki suyun sıcaklığın artmasını sağlar. Bu sıcaklık artışı termometre vasıtasıyla ölçülür. Zamana bağlı sıcaklık değişimi kaydedilir. Suyun ilk ve son sıcaklığı çarpılmasıyla ısı enerjisi hesaplanabilir. 1 gr suyun sıcaklığını 1 °C arttırmak için gerekli enerji 1 kaloriye eşit olduğundan, kalorimetrede bulunan suyun miktarı bilindiğinde enerjinin kalori cinsinden hesabı da mümkün olmaktadır.

### 3.3 Yakma Prosesi

Temel olarak atık yakma atığın içerisindeki yanabilen maddelerin oksidasyonudur. Atıklar genellikle içerisinde bulundurduğu organik maddeler, metaller, mineral maddeler ve sudan dolayı heterojen bir yapıya sahiptir. Atıktaki organik yakıt maddeleri yeterli sıcaklıkta oksijenle temas ettiğinde yanma gerçekleşir. Eğer atığın kalorifik değeri ve verilen hava miktarı yeterliyse tam yanma gaz fazında saniye fraksiyonunda herhangi bir ek yakıtı gerek olmadan gerçekleşir. Temel yanma reaksiyonları (Tanrısever,2009) ;





Kentsel atıkların yanma reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler Çizelge 3.4 'de görülmektedir.

**Çizelge 3.4 : Atık bileşenleri ve yanma ürünleri (Akpınar,2006)**

Atık Bileşeni	Yanma ürünü
•Organik	
Karbon	CO <sub>2</sub>
Hidrojen	H <sub>2</sub> O
Kükürt	SO <sub>2</sub>
Azot	NO <sub>2</sub>
Oksijen	-
Klorit	HCl
Florid	HF
•Su(W)	W(buhar)
•İnorganik(I)	I

Yakma sistemlerinde gerçekleşen evreler ise sırasıyla;

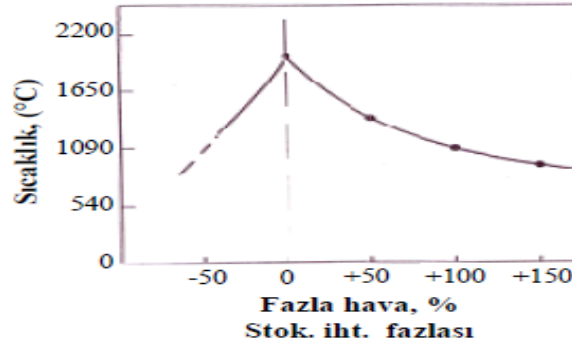
1.Kurutma ve gaz giderme; Bu basamakta genellikle 100 ile 300 °C'de hidrokarbonlar ve su gibi uçucu kısmın dönüşümü gerçekleşir. Kurutma ve gaz giderme basamağında oksitleyici ajanlara ihtiyaç yoktur. İşlemin gerçekleşmesi sadece verilen ısıya bağlıdır.

2. Piroliz ve gazlaştırma: Piroliz organik maddelerin 250-700 °C arasında oksitleyici madde olmadan parçalanmasıdır. Karbon içerikli artıkların gazlaştırılması artıkların su buharı ve CO<sub>2</sub> ile 500-1000 °C reaksiyonu gerçekleşir ancak bu adımda sıcaklık 1600 derecelere kadar çıkabilir.Bu adımda katı organik madde gaz fazına transfer edilir.Sıcaklığa ilave olarak bu adımda ,oksijen ilaveside gerçekleşir.

3. Oksidasyon; Bir önceki adımda üretilen yanabilen gazlar oksitlenir. Yakma metoduna bağlı olarak atık gazın sıcaklığı genellikle 800-1450 °C arasında olmaktadır.

Tam oksidatif bir yanmada atık gazın temel bileşenleri; su buharı ,azot,karbondioksit ve oksijendir.Atığın kompozisyonuna bağlı olarak CO,HCl, HF, HBr, HI, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, VOCs, PCDD/F, PCB ve ağır metaller oluşabilir.Yanmanın gerçekleştiği basamaklarda ki sıcaklığa bağlı olarak uçuşu ağır metaller ve inorganik bileşenler kısmi veya tam olarak buharlaşır.

Bu maddeler sisteme verilen atıktan hem atık gaza hem de sistemde olan uçucu küllerin yapısına geçerler. Tam yanmanın gerçekleşmesi için yeterli miktarda oksijenin sağlanması gereklidir. Yanma için gerekli olan stokiometrik hava katsayısı yakıtın katı sıvı, gaz olmasına ve kullanılan fırına bağlı olarak 1.2 ve 2.5 arasında değişmektedir (European Commission, 2006.a). Yakma sistemlerine verilen hava miktarı sıcaklığı etkilemektedir. Yakma odası içerisindeki sıcaklık, kirletici emisyonlar açısından oldukça önemlidir. Sıcaklığın 770°C'nin altında olması, plastiklerin çoğunun ortamda yanmadan kalmasına, 1090°C' nin üstünde olması ise yakma odası içerisindeki kaplama malzemesinin yüksek ısıya dayanamamasına sebep olacaktır (Öztürk, 2010). Şekil 3.3'de görüldüğü gibi hava miktarının stokiometrik oranın çok üzerine çıkması veya çok altında olması fırın sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 3.3 : Kentsel atık yakmada hava fazlası ve sıcaklık ilişkisi (Öztürk,2010)

### 3.4 Atık Yakma Teknolojileri

Atık yakma sistemlerinde temel amaç atığın hacminin ve tehlikeli etkilerinin giderilmesi ve bu esnada açığa çıkabilen potansiyel kirletici maddelerin yakalanması veya bertarafıdır. 1 ton KKA'nın termal yöntemle bertarafı sonunda ~700 kg baca gazı (%70), 230-270 kg taban külü (%24), 30 kg hurda demir (%3,2), 20-30 kg filtre (uçucu) külü (%2,2) ve 1-2 kg baca gazı arıtma çamuru (jips) oluştuğu bilinmektedir (Öztürk,2010). Yakma tesislerinde aynı zamanda çıkan ısıyı kullanarak enerji geri kazanımı sağlamaktır (European Commission,2006.a).

Enerji geri kazanımında en önemli faktör atığın kalorifik değeridir. Dünyada evsel atıkların kalorifik değeri son 50 yıldır artmaktadır. Günümüzde bazı sanayi ülkelerinde atığın kalorifik değeri yaklaşık olarak linyit kömürünün kalorifik değerine eşittir (Brunner v.d., 2004).

Bu da atığın enerji kaynağı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca bazı ülkelerde ülke geneli itibariyle de KKA'ların tamamı termal yöntemlerle enerji geri kazanımlı olarak işlendiğinde toplam enerji ihtiyacının % 5-10'u aralığında bir yenilenebilir enerji geri kazanımı mümkün olabilmektedir (Brunner v.d., 2004). Atık yakma sistemlerinde diğer bir amaç atığın içerisindeki tehlikeli maddelerin tamamen mineralizasyonunu sağlamaktır. Atığın yakılmasıyla atıktaki organik karbonun tamamen CO<sub>2</sub>'e dönüştürülmesi sağlanır. Enerji geri kazanımının olduğu yakma sistemlerinde atık direk ya da ısıl değerini yükseltmek amacıyla ön işlemden geçirilerek yakılabilir. Evsel atık yakma sistemlerinin sürdürülebilir bir şekilde hayata geçirilebilmesi için; İyi planlanmış ve oturmuş bir entegre atık yönetim sisteminin varlığı gereklidir.

Atıkların iyi işletilen düzenli depolama tesislerinde depolanmakta olması ve depolama sahasının yanma sonucu oluşan atıkların depolanmasına imkan sağlaması gerekmektedir. Yanabilir özellikte asgari 50.000 t/yıl miktarında kentsel atığın sürekli temin garantisi olmalı ve gelen atığın miktarındaki değişimin haftalık %20'yi aşmaması gerekmektedir (The World Bank,1999). Yakılacak atığın ortalama ısıl değerinin asgari 1.600 kcal/kg civarında olması ve hiçbir şekilde 1.400 kcal/kg altına düşmemesi gereklidir.Halkın, yakma dolayısı ile artacak atık bertaraf tariflerini ödeme kapasite ve isteğinin varlığı olmalıdır.Yakma tesisleri orta veya ağır sanayi bölgelerine kurulmalı ve kalifiye personeller tarafından işletilmelidir.

Evsel atık yakma tesislerinde atık gaz; gaz temizleme sistemine geçmeden önce 200 C kada soğutulabilmesi ve gaz temizleme sisteminin en az 2 basamaklı ESP içermesi gereklidir. Atık gazın çıktığı bacanın bölgedeki en yüksek bina ile arasında 1km ya da 70 m bulunması gereklidir (The World Bank,1999).Yakma tesisleri kütleli ve atıktan kaynaklı yakıtın yakıldığı sistemler olmak üzere iki çeşittir.

#### **3.4.1 Kütleli yakma tesisleri**

Atığa uygulanacak sistemin seçilmesi için atığın fiziksel, kimyasal ve karakterinin belirlenmesi gereklidir. Atıkların herhangi bir ön proses uygulanmadan yakılması, dünyada en yaygın olan kentsel katı atıklardan enerji üretme teknolojisidir.(Akpınar, 2006). Yakma sistemleri genel olarak atığın depolanması, yakılması, baca gazının ve atık suların arıtılması bileşenlerinden oluşur. Enerji kazanım sistemlerinin uygulanması için atığın kalorifik değerinin ortalama 1600 kcal /kg olması gerekmektedir.

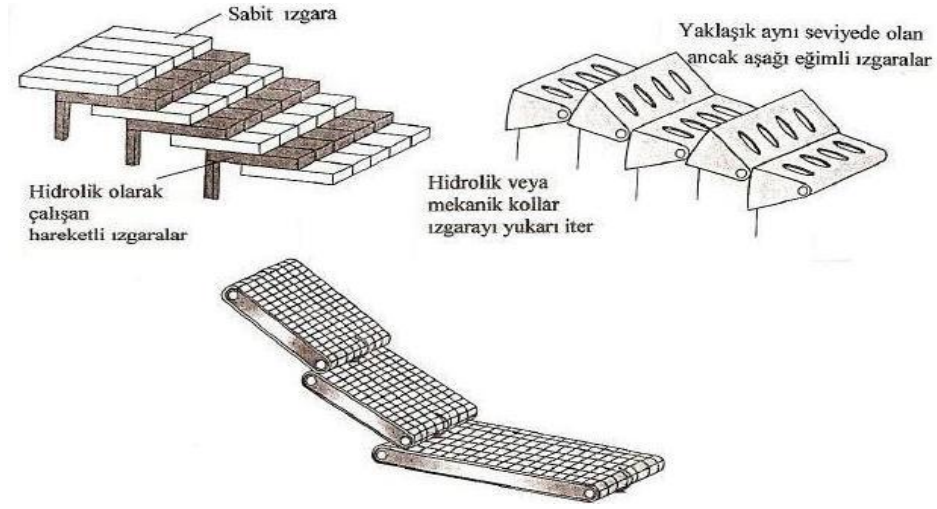
Zengin ülkelerde evsel atığın ısı değeri 2.400 kcal/kg düzeyindedir (Öztürk, 2010). Kütle yakma sistemlerinde atık kapalı bir bunkerde maksimum bir haftalık periyotlarda olmak üzere depolanır. Yakma sistemine verilecek olan hava koku oluşumunda engellemek amacıyla bunkerlerden alınır. Atığın depolandığı bunker otomatik veya elle kumanda edilen bir kepçeyle atığın homojen bir şekilde sisteme verilmesini sağlamak amacıyla belirli aralıklarla karıştırılır. Daha sonra atık suyla soğutulan kule içinde yer alan besleme haznesine yüklenir. Besleme haznesi, atık deposu ile yakıcı hazne arasında hava sızdırmaz bir bölme durumundadır ve buraya yüklenen KKA hidrolik veya mekanik bir sistem vasıtası ile asıl yanmanın gerçekleştiği yakıcı ızgaralar üzerine beslenir.

Izgaralı sistemler atık yakmada en yaygın olarak kullanılan ve test edilmiş sistemlerdir. Bu sistemde ızgaralar atığın taşınmasını, karıştırılmasını ve homojen şekilde dağılımını sağlamak için sabit ve hareketli kısımlardan oluşur. Atık yakma sistemlerinde kullanılan çeşitli ızgara tipleri bulunmaktadır. Bunlar hareketli basamaklı, fırlatmalı kademeli zincir-palet şeklinde olabilirler. Şeki 3.4 çeşitli ızgara şekilleri görülmektedir. Yakma havasının bir kısmı birincil yakma havası olarak Izgaranın açıklıklarından aşağıdan yukarıya doğru verilir. Bu sayede ızgara materyalinin soğutulması aşırı ısı ve korozyona karşı korunması yanında atığın hava ile iyice karıştırılarak organik karbonun tam yanması sağlanır.

İkincil hava ise maksimum oksidasyonun gerçekleşmesi ve baca gazında daha düşük CO emisyonlarının oluşması için doğrudan yanma bölgesine verilir. Izgaranın sonundan atığın mineralize hali olan taban külü bir su haznesine boşaltılarak soğutulur ve oradan kül deposuna sevk edilir. Yakıcıdan çıkan baca gazı yüksek oranda partikül ile SO<sub>2</sub>, HCl, HF ve NO<sub>x</sub> gibi arıtılması gereken asidik bileşenler içerir. Partikül maddeler Elektro Statik Filtre'ler veya torba filtrelerde tutulur.

Partikül tutucu filtrelerde partiküller yanında kirleticileri adsorplamak üzere baca gazına enjekte edilen CaCO<sub>3</sub>, CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> veya karışımlarında ileri gelen maddeler de tutulur. Baca gazındaki SO<sub>2</sub>, HCl, HF gibi asidik kirleticiler iki kademeli ıslak gaz tutucularda tutulabilir, NO<sub>x</sub> ise yakıcıya NH<sub>3</sub> enjekte edilerek N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O formunda uzaklaştırılır. De-NO<sub>x</sub> olarak bilinen bu reaksiyonun gerçekleştirilebilmesi için yüksek yanma sıcaklığı (900-1000°C) gereklidir.

Kütle yakma tesisleri günde genellikle 800 ile 2500 Mg kapasitede inşa edilebilirler bu tesislerin ortalama maliyeti günlük her Mg başına US\$90,000 ile US\$135,000 arasında değişmektedir (United Nations Environment Programme, [UNEP], 2005).



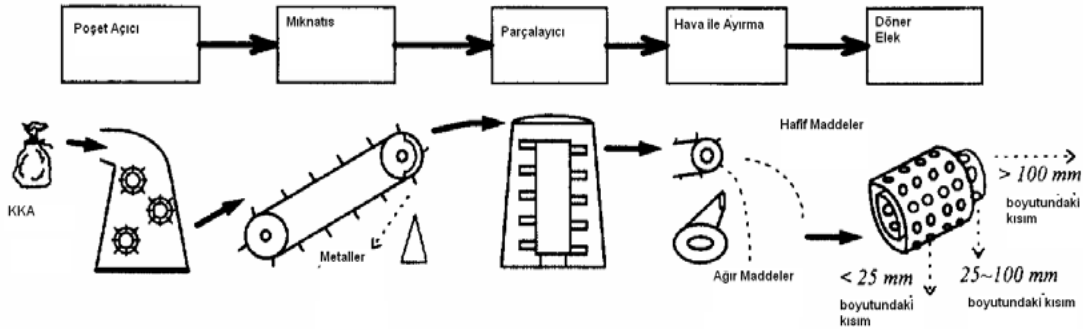
**Şekil 3.4 :** Atık yakma sistemlerinde kullanılan ızgara çeşitleri(Akpınar, 2006)

**Çizelge 3.5 :** Izgaralı yakma sistemlerinin avantaj ve dezavantajları (Saltabaş ve diğ., 2010):

Avantajlar	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ön işleme ihtiyaç yoktur. (Kaba atık haricinde)</li> <li>2. Uzun süreli kullanım tecrübesinden ötürü güvenli işletme sağlar.</li> <li>3. Kalorifik değer ve atık kompozisyonundaki değişimlere karşı dirençlidir.</li> <li>4. % 85'e varan termal verim değerleri elde edilebilir.</li> <li>5. Günlük 1200 ton atık bertaraf edebilen fırınlar tasarlanabilmektedir</li> </ol>
Dezavantajlar	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Yüksek ilk yatırım ve işletme maliyeti vardır.</li> <li>2. Dökülebilir, akabilir nitelikteki sıvı atıklar için kullanılamaz.</li> </ol>

### 3.4.2 Atık kaynaklı yakıt yakma tesisleri

Atık Kaynaklı veya Atıktan Türetilme Yakıt (Refuse-Derived Fuel/RDF) anlam itibariyle katı atıktan çeşitli işlemler sonucunda elde edilen yakıttır. RDF toplam atığın(ağırlık olarak) %60-80'inden üretilir. Kentsel atıktan AKY üretimi birçok adımdan gerçekleşir. Genel olarak AKY üretimi kentsel atığın mekanik proseslerden geçirilmesidir. Bu prosesler eleme, parçalama, manyetik ayırmadır.



**Şekil 3.5 :** Atık kaynaklı yakıt üretim prosesleri (Karakaya, 2008)

Karışık toplanmış kentsel katı atıkta yanabilen ve yanamayan kısımların ayrılması ile RDF elde edilmiş olur ve atıktan inorganik kısmın ayrılması sonucu ısıl değeri karışık atığa göre daha yüksektir. RDF'ler kaba ve yoğunlaştırılmış olmak üzere ikiye ayrılır. Atığın hafif olan kısmı (kağıt ve plastik) ayrılıp parçalanması ile oluşturulan kısma kaba RDF denir. Yoğunlaştırılmış RDF ise parçalanmış atığın briketleştirilmesi ile oluşur ve maliyeti yüksektir. Atık kaynaklı yakıt yakma tesislerinin kütle yakma tesislerine göre pek çok avantajı vardır. Bu sistem atığın daha homojen ve daha yüksek ısıl değere ulaşmasını sağlar. AKY sisteminde atığın ön işlemden geçirilmesi atığın içerisinde bulunan potansiyel problem teşkil eden maddelerin uzaklaştırılmasını da sağlamaktadır. Ayrıca yanamayan maddelerin uzaklaştırılması ile az kül oluşur (Öztürk,2010).

AKY tesisinin avantajı sisteme verilen atığın ısıl değerinin daha üniform olması ve böylece yanma için gerekli fazla hava miktarının azalmasıdır. Karışık kentsel atık yakma sistemlerinde kullanılan fazla hava atığın heterojen yapısı nedeniyle %100 iken bu oran AKY yakılan tesislerde %50' dir (Öztürk, 2010).

Dolayısıyla aynı miktarda atığın yakıldığı tesislerde kütle yakma sisteminde AKY yakılan sisteme göre daha fazla baca gazı oluşur buda baca gazı temizleme maliyetini arttırmaktadır. Çizelge 3.6' de işlenmiş ve işlenmemiş atık yakma tesislerinin kapasite ve işletme verimi açısından karşılaştırılması bulunmaktadır.

**Çizelge 3.6 :** İşlenmiş ve işlenmemiş atık yakma sistemlerinin karşılaştırılması (Akpınar,2006)

	İşlenmemiş katı atık yakma tesisi	İşlenmiş katı atık yakma tesisi
Kapasite (ton/gün)	50-3200	300-500
İşletme verimi (kWh/ton)	450-580	550-600

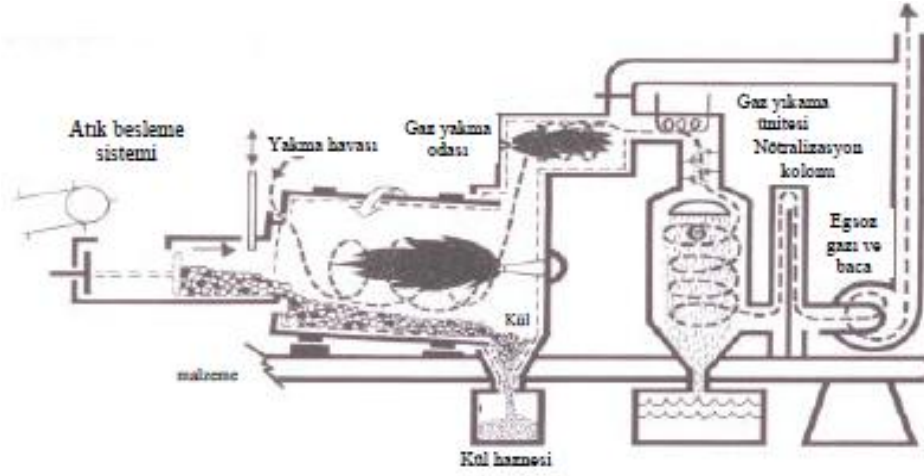
AKY'nin kütleli yakmaya göre diğer bir avantajı da, AKY'nin büyük konteynerlerde depolanabilmesidir. Kütleli yakma tesislerinde ise, ham KKA'nın depolama süresi sınırlıdır. AKY tesisleri ön işlem, yakma sistemleri genellikle günlük 1,000 ile 2,000 Mg kapasiteli inşa edilirler ve bunların maliyeti günde US\$100,000 ile US\$150,000 Mg arası değişmektedir (UNEP,2005).

### **3.4.3 Döner fırınlı yakma tesisleri**

Döner fırınlı yakma tesisleri atığın çeşidi ve kompozisyonu ne olursa olsun hemen hemen her atık için kullanılabilirler. Bu tesisleri evsel atığın yanında aynı zamanda tehlikeli atık, arıtma çamurları ve sıvı atıklar içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Döner fırınlı sistemlerde işletme sıcaklığı 500 ile 1450 °C arasında değişmektedir.

Konvensiyonel oksidatif yakma kullanıldığında sıcaklık genellikle 850 °C üzerinde, kirletici emisyonların daha düşük olması açısından 1000-1300 °C arasında olmalıdır. Bu tip yakma tesislerinde atık, iç kısmı yanmaya karşı dayanıklı tuğla döşenmiş olan çelikten yapılmış döner bir hazne içerisinde yakılır. Döner hazne herhangi bir ızgara sistemine göre daha iyi türbülans sağlamak ve yanma hızını arttırmaktadır. Yakma fırınında atığın hareketini kolaylaştırmak açısından atığın fırına giriş kısmı, çıkış kısmına göre daha yukarıda kalır. Fırında katı maddelerin kalma süresin fırının dönme hızı ve yataydaki açıyla ilgili olarak 30 -90 dakika arası tam yanmanın gerçekleşmesi açısından yeterli bulunmuştur (European Commission, 2006.a). Toksik maddelerin yanmasını artırmak için fırına ikinci yakma odası eklenebilir. Burada sıcaklık genellikle 900-1200 °C arasında değişmektedir.

İkincil yanma odasındaki hava enjeksiyonu ve yüksek sıcaklıkla baca gazındaki organik bileşenler, düşük moleküler ağırlıkta hidrokarbonların oluşumu engellenmektedir. Şekil 3.6' da döner fırınlı yakma tesisinin şematik görünüşü vardır.



Şekil 3.6 : Döner fırınlı yakma tesisi (Öztürk, 2010)

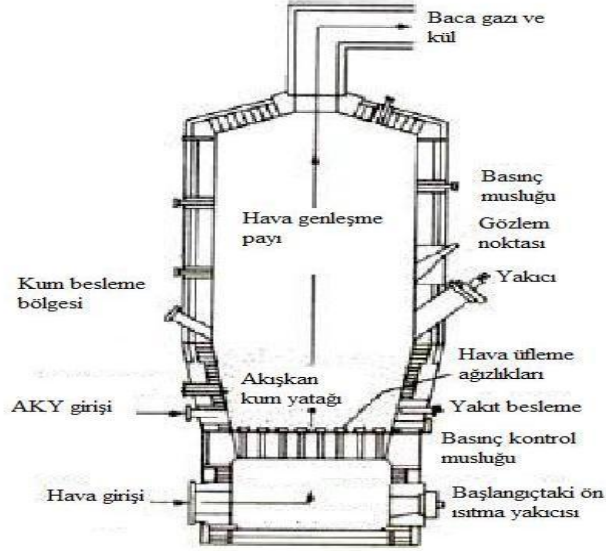
### 3.4.4 Akışkan yataklı yakma tesisleri

Akışkan yataklı sistemler genellikle çok ince parçacıklar halinde atıklar (AKY gibi) için kullanılmaktadır. Akışkan yataklı yakma tesisleri, inert granüler partiküllerden bir yatak içeren, ısıya dayanıklı malzemedan yapılmış basit olarak dikey silindirik yapıda sistemlerdir. Yatak kum veya kireç taşından ( $\text{CaCO}_3$ ) olabilir. Kireçtaşı kullanıldığı zaman, oksijen ve yanma sonucu oluşan  $\text{SO}_2$  ile reaksiyona girer ve  $\text{CO}_2$  ve kalsiyum sülfat ( $\text{CaSO}_4$ ) oluşur,  $\text{CaSO}_4$  kül ile uzaklaşır. Yatak malzemesi olarak kireçtaşının kullanılması yüksek kükürt içeren kömürlerin minimum  $\text{SO}_2$  emisyonu ile yanmasına izin verir. (Akpınar, 2006.) Yakma gazları yatağın genişlemesini sağlayacak kadar yüksek bir hızla tabandan reaktöre üflenerek, yatağın ideal bir akışkan gibi davranması sağlar (Öztürk,2010).

Akışkan yatakta; kurutma, buharlaşma, yanma gerçekleşir. Yatağın üzerindeki alanda sıcaklık  $850-950\text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır. Akışkan yatak malzemesinin üzerindeki kısım gazların yanma bölgesinde kalmasını sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Akışkan yataklı sistemlerde yatağın kaynama hareketi türbülansı, karıştırmayı ve ısının yakıtta transferini sağlar aynı zamanda oksijenin üniform dağılmasını sağlayan sistemlerdir. Atığın yanma gazlarıyla yakın teması sebebiyle, gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı Akışkan yatakta; kurutma, buharlaşma, yanma gerçekleşir. Yatağın üzerindeki alanda sıcaklık  $850-950\text{ }^\circ\text{C}$  arasındadır.

Akışkan yatak malzemesinin üzerindeki kısım gazların yanma bölgesinde kalmasını sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Akışkan yataklı sistemlerde yatağın kaynama hareketi türbülansı, karıştırmayı ve ısının yakıtta transferini sağlar aynı zamanda oksijenin üniform dağılmasını sağlayan sistemlerdir.

Atığın yanma gazlarıyla yakın teması sebebiyle, gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı yaklaşık %40'ın üzerinde tutulur(Öztürk, 2010 ). Buda stabil işletme şartları sağlar. Genel olarak, akışkanlar yatağı fırınları her kapasitede inşa edilebilir. Yine de bugüne kadar katı atık yakmak için yapılan en büyük akışkanlar yatağı fırınının kapasitesi 6 t/saat'tir(R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler & DHV Consultants,2010). Şekil 3.7' de Akışkan yataklı yakma sisteminin şematik görünüşü bulunmaktadır.

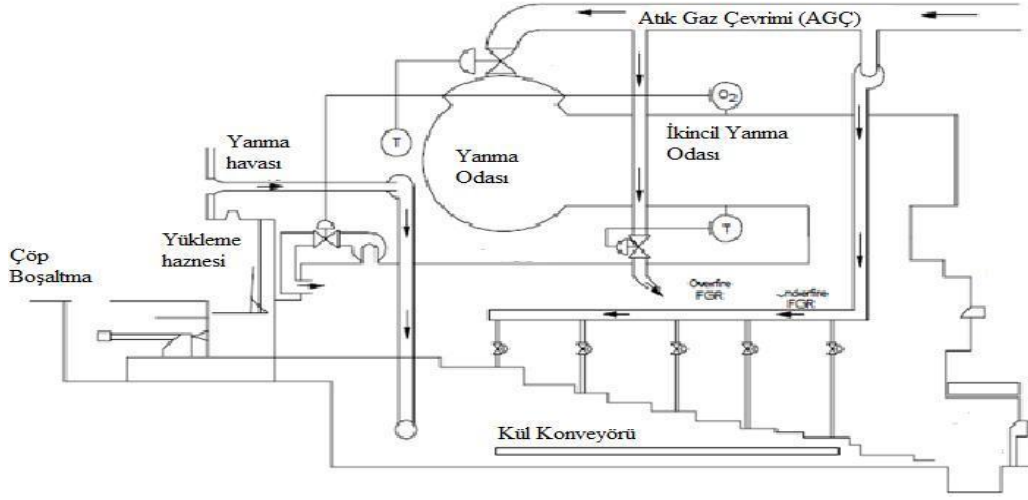


Şekil 3.7 : Akışkan yataklı yakma sistemi (Öztürk, 2010)

### 3.4.5 Modüler yakma sistemleri

Modüler yakma sistemleri Amerika, Avrupa ve Asyada en yaygın olarak kullanılan ikinci sistemdir. Kütle yakmada olduğu gibi ön arıtımsız kullanılabilir. Modüler sistemler 2 adet dikey birbirine monte edilmiş çemberden oluşur. Modüler sistemler verilen hava fazlasına göre ikiye ayrılırlar. Çok fazla hava fazlasının verildiği sistemler sitokiyometrik orandan %100 ile 250 kat daha fazla havayla işletilirler. Aşağıdaki şekilde bu şekilde işletilen sistemin şematik görünüşü vardır. Kontrollü havayla işletilen sistemlerde ilk yanma odasına sitokiyometrik oranın altında hava kullanılır. Tamamlanmamış yanma sonucu oluşan ürünler ikinci yanma odasına geçer. Bu odada hava fazlası sisteme verilir. Sistemde gerekli sıcaklığa ulaşmak için doğal gaz ilavesi yapılabilir.

İkinci yanma odasındaki yüksek ve uniform sıcaklık yanma gazının türbülanslı karışımıyla birlikte çıkış gazında partikül madde ve organik kirleticilerin konsantrasyonunun azalmasını sağlar (United Nations Environment Programme, 2003)



**Şekil 3.8 :** Modüler yakma sistemi United Nations Environment Programme, 2003)

Kentsel atık yakma sistemlerinin kapasiteleri değişmektedir. Çizelge 3.7’de yakma sistemlerinin kapasiteleri görülmektedir.

**Çizelge 3.7 :** Kentsel atık yakmada kullanılan yakma sistemleri ve uygulama aralığı (European Report, 2006)

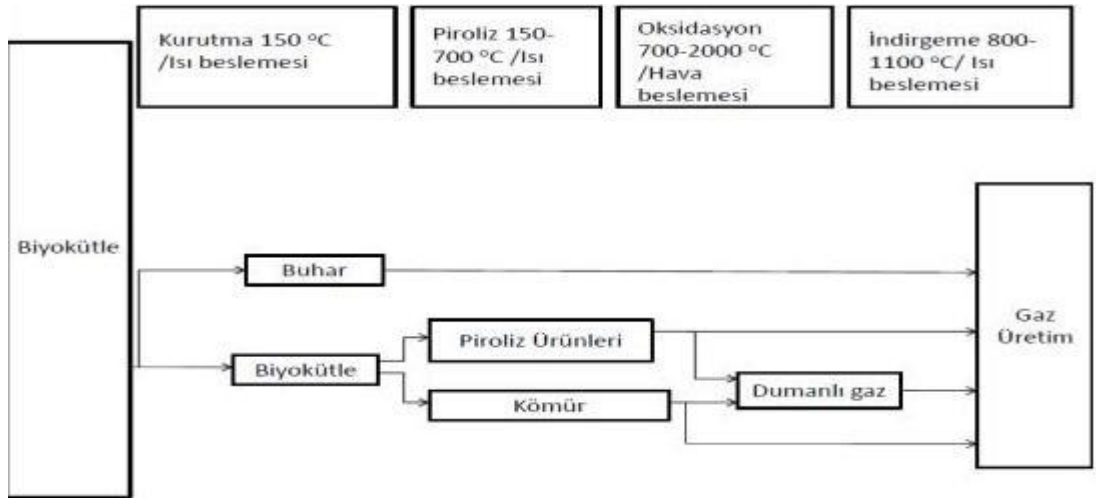
Teknoloji	Tipik uygulama aralığı(ton/gün)
Hareketli ızgara (kütlesel yakma )	120-720
Akışkan Yatak	36-200
Döner Fırın	10-350
Modüler yakma tesisi	1-75

### 3.5 Atık Gazlaştırma Sistemleri

Gazlaştırma karbon içerikli maddelerin sitokiyometrik orandan daha az oksijen kullanarak sentez gaza dönüştürülmesi işlemidir. 2008 yılında toplam;117 ticari ölçekte çalıştırılan gazlaştırma sayısı 450 adettir. Bu sistemlerde 45000 MW güç elde edilmektedir. Gazlaştırma sistemlerinde kullanılan hammaddeler ise %49 kömür, %36 petrokok, %15 ise biyokütle ve atıktır. Bu tesislerden elde edilen gaz ürünlerin%27’si elektrik, %37’si çeşitli kimyasalların, %36’sı ise sıvı ve gaz yakıt üretiminde kullanılmaktadır (Okutan, 2009). Evsel atıkları gazlaştırmada oksijen kaynağı olarak saf oksijen veya hava kullanılabilir.

Gazlaştırma işleminde oksijen kaynağı olarak hava kullanılması durumunda (normal atmosfer basınç şartları altında) oluşan son ürünler düşük enerji içeriğe sahiptir.

Bu şartlarda tipik gaz bileşimi %10 CO<sub>2</sub>, %20 CO, %15 H<sub>2</sub> ve %2 CH<sub>4</sub> içerir. Katı olarak kömür ve sıvı olarak ta yağ türü son ürün oluşur (Apaydın,2008). Hava kullanılması durumunda oluşan gazın enerji içeriği havada bulunan azotun seyreltici etkisi nedeniyle düşüktür (150 Btu/ft<sup>3</sup>=5589Kj/m<sup>3</sup>=1337Kcal/m<sup>3</sup>). Oksijen kaynağı olarak saf oksijen kullanılırsa o zaman gazlaştırmada oluşan gazın enerji içeriği (kalorifik değeri) hava kullanımına nazaran iki kat artacaktır (300 Btu/ft<sup>3</sup>=11180Kj/m<sup>3</sup>=2675Kcal/m<sup>3</sup>) (Apaydın,2008). Gazlaştırma prosesinde gerçekleşen temel adımlar şekil 34 de görülmektedir.



**Şekil 3.9 :** Gazlaştırma prosesi temel adımlar (Öztürk, 2010)

Gazlaştırma prosesi ilk olarak kurutma safhası ile başlar. Bu safhada amaç biyokütlenin içinde bulunan nemin buhar fazına geçişini sağlamaktır. Bu aşamada oksidatif madde ilavesi ve bozunma olayı gerçekleşmez .

Sıcaklık 150 °C'ye yükseltilerek nemin buhar fazına geçişi sağlanır.

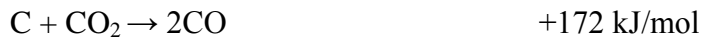
- Piroliz Safhası; Piroliz safhasında organik kısımdaki uçucu kısım uzaklaştırılır. Bunun sonucunda oluşan katran sabit karbon ve inorganik bileşenler içerir. Piroliz safhası sonucunda katı sıvı ve gaz ürünler oluşur. Katı ürünler; Saf karbon ve katı atıkta bulunan inert materyallerden oluşan kömür yapısında yüksek karbon içerikli üründür.
- Sıvı ürün: Asetik asit, aseton, metanol ve kompleks hidrokarbonları içeren bir katran veya yağ akımında oluşan sıvı fraksiyon piroliz sonucu oluşan sıvı ürünlerdir. Sıvı fraksiyon ek prosesler uygulanarak işlendiğinde, fuel oil eşdeğeri sentetik bir yakıt eldesi mümkündür.

- Gaz ürün: Atığın özelliklerine bağlı olarak Hidrojen, metan, karbondioksit, karbonmonoksit ve çeşitli diğer gazlardan oluşur.

**Oksidasyon;** Bu aşamada sıcaklık 700-2000°C aralığında değişmektedir. Sisteme hava verilerek biyokütlede karbon ve hidrojen içeren kısmın oksidasyonla karbondioksit ile su buharına dönüşmesi sağlanır ve ayrıca ısı enerjisi açığa çıkar.

**İndirgeme:** Bu aşamada sıcaklık 800-1100 °C arasında değişmektedir ve reaksiyonlar oksijensiz ortamda gerçekleşir. Gerçekleşen ana reaksiyonlar aşağıda verilmiştir: Bu reaksiyonlar indirgeme evresinde ısı ihtiyacı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla gazın sıcaklığı azalmaktadır. Gazlaştırma prosesinin sonunda karbon karbonmonoksite dönüşür. Bu adımlar bütün gazlaştırma teknolojilerinde bu sırayla gerçekleşmez örneğin atığın pülverize şekilde beslendiği ve gazlaştırma işleminin gerçekleştiği yatak bölgesinin ayrımının net yapılmadığı sistemlerde adımlar bütünleşmiş durumdadır.

Gazlaştırma prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar ise aşağıda bulunmaktadır (Klein and Themelis, 2003).



Gazlaştırma prosesini standart yakma sisteminden ayıran en önemli fark oksijen miktarıdır. Yakma sistemlerinde sitokiyometrik oksijenden daha fazla oksijen kullanılırken gazlaştırmada sitokiyometrik ihtiyacın altında oksijen kullanılmaktadır. Gazlaştırma sistemi sonucunda oluşan yanma ürünleri yakma sistemlerinden farklılık göstermektedir.

Çizelge 3.8' de yakma ve gazlaştırma sistemlerinin oluşan ürünler bakımından karşılaştırması görülmektedir.

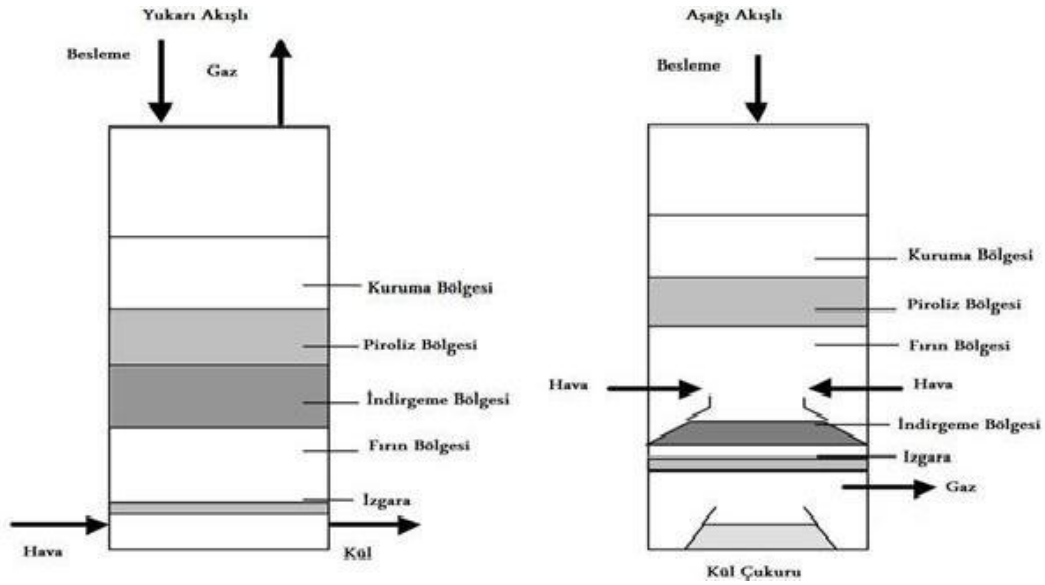
**Çizelge 3.8 : Yakma ve Gazlaştırmada oluşan ürünler (Öztürk,2010)**

Yakıt Ana Bileşenleri	Yakma	Gazlaştırma
Karbon	CO <sub>2</sub>	CO
Hidrojen	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>
Azot	NO,NO <sub>2</sub>	HCN,NH <sub>3</sub> veya N <sub>2</sub>
Kükürt	SO <sub>2</sub> veya SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S
Su	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>

### 3.5.1 Sabit yataklı gazlaştırıcılar

Sabit yataklı gazlaştırıcılar yüksek termal verimlilik ve yakıt ile reaktanların karşılıklı akımından dolayı düşük baca gazı sıcaklığına sahiptir(United Technologies Research Center [UTRC], 2002). Sabit yataklı gazlaştırıcılarda reaksiyon bölgesini oluşturmak ve gelen yakıtı desteklemek için metal bir ızgara bulunur (Öztürk,2010). Sabit yataklı gazlaştırıcıda oksitleyicinin aşağıdan verildiği sistemler yukarı akışlı, yukarıdan verildiği sistemler ise aşağı akışlı olarak adlandırılır. Gazlaştırıcıya yukarıdan yakıtın ilave edilmesi ve ızgaraların altından külün desarj edilmesiyle belirli bir derinlikte sabit bir yakıt tabakası oluşturulur. Gazlaştırıcıya yukarıdan yakıtın ilave edildikten sonra kuruma, buhar giderme, gazlaştırma ve oksidasyon tabakalarından geçer. Yukarı akışlı gazlaştırıcılarda katran oranı aşağı akışlı sistemlere göre daha fazladır. Gazlaştırmada yakıtın kısmi oksidasyon, buharlı gazlaştırma ve su-gaz değişim reaksiyonlarıyla sentez gaza dönüştürmek için hava, oksijen veya buhar kullanılabilir. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda külün erimesini engellemek için sıcaklık 1000 - 1300 °C lerin altında tutulmalıdır.

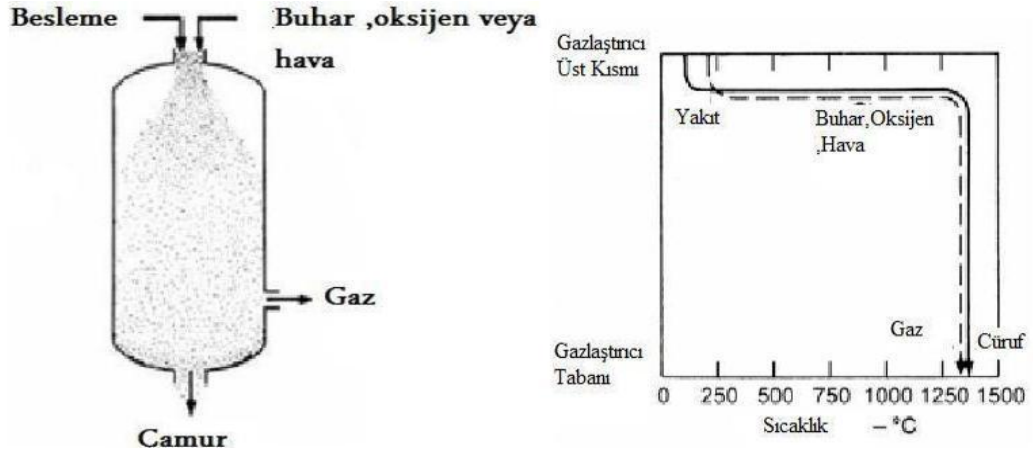
Sabit yataklı gazlaştırma sistemleri de çıkış gazında bulunan katran, istenmeyen bileşenlerin temizlenmesi sistemi daha karmaşık yapıda ve yüksek maliyetli olmasına neden olmaktadır. Ancak elde edilen katran ve diğer yan ürünler ekonomik olarak değerlendirilebilir ürünler olabilmektedir. Gaz akışının sürekliliğinin sağlanması ve gazdaki safsızlıkların giderilmesi için yakıt olarak beslenen maddelerde iri parçacıkların giderilmesi gereklidir. Bu sistemde partikül çapının minimum 6.3mm olması sağlanmalıdır (UTRC,2002).



**Şekil 3.10 :** Yukarı ve aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılar (Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., Napoli, R.M.A., 2003)

### 3.5.2 Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar pülverize olmuş yakıtı yaklaşık 1 saniye gibi hızlı bir sürede genellikle oksijen kullanarak kısmi oksidasyonla  $1370^{\circ}$  -  $1925$  de sentez gaza döndürebilirler. Yakıt beslenirken basınç altında ve  $100 \mu\text{m}$  altında boyutlarda olmalıdır .Bu sistemler 20-25 bar arası basınçlarda işletilirler (Van der Drift A., Boerrigter, H., Coda, B., Cieplik, M. K., Hemmes, K., 2004). Sürüklemeli sistemlerin avantajları dizaynının basit olması, yakıtın kekleşmesine karşı toleranslı olması, sistem veriminin yüksek olması ve karbon dönüşüm verimliliğinin yüksek olmasıdır. Dezavantajları ise atık gaz sıcaklığının yüksek olmasından dolayı gaz soğutmada sistemlerinin veya ısı geri kazanım sistemlerinin daha büyük yapılması, gazlaştırıcının içinde kükürt yakalama imkanının az olması, yakıt besleme sisteminin kompleks olmasıdır. Şekil 3.11’de sürüklemeli gazlaştırıcı ve gazlaştırıcı boyunca sıcaklık değişimi bulunmaktadır.

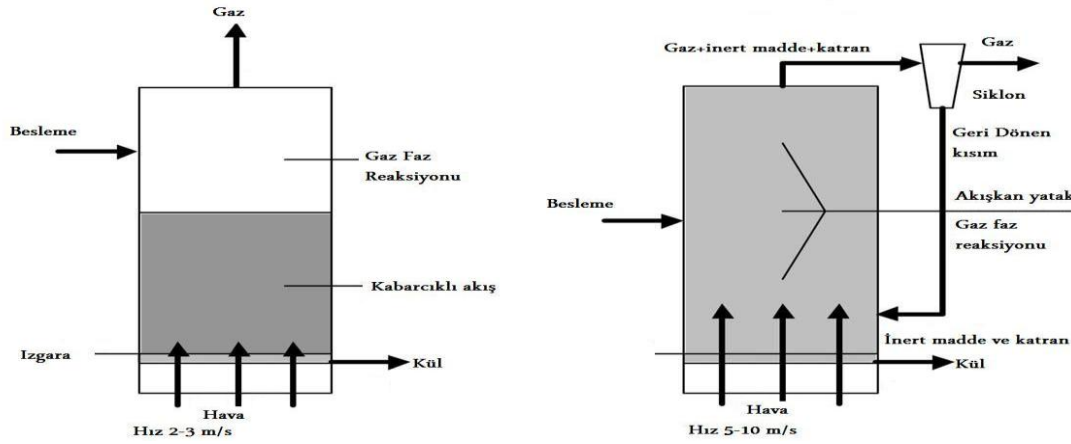


**Şekil 3.11** : Sürüklemeli gazlaştırıcı ve gazlaştırıcı boyunca sıcaklık değişimi (Philips, 2006)

### 3.5.3 Akışkan yataklı gazlaştırıcılar

Akışkan yatak sisteminde yakıt veya katıların sürekli ve yüksek hızda beslenmesi dolayısıyla askıda (akışkan) kalmaktadır. Bu sistemde oluşan türbülanslı karışım, üretilen gazın daha homojen olmasını ve gaz ile katı arasında maksimum ısı ile kütle transferinin gerçekleşmesini sağlar (Öztürk, 2010). Bu sistemin avantajı gazlaştırıcıda kükürt gideriminin yapılabilmesidir. Kirecin akışkan yatakta kullanılması sonucu 900°C'de %90'a kadar kükürt yakalama gerçekleşmektedir. Ancak yatakta kükürt giderimi sistemde oluşan kararsız kalsiyum sülfidi depolama için daha uygun olan kalsiyum sülfata dönüştürmek için ek bir yakma ünitesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu sistemin avantajları oluşan gazın katran içeriği az olması, yüksek kül içeriğine sahip materyallerle çalışmasıdır. Buna karşın oluşan gazın partikül içeriğinin çok olması ve sistemde hava –katı ihtiyacının sürekli kontrol edilmesi gerekliliğinden dolayı karmaşık proses kontrolü sistemin dezavantajlarından biridir. (Öztürk, 2010). Akışkan yataklı gazlaştırıcılardan enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan 2 tip kabarcıklı akışkan yatak ve sirkülasyonlu akışkan yataktır. Kabarcıklı akışkan yataklı sistemlerde verilen havanın hızı yataktaki katı maddeleri kabarcık oluşturmasını sağlayacak şekilde yüksek olmalıdır. Bu sistemlerde sıcaklık genellikle 900 ile 1000 °C arasında değişebilmektedir. Yanma sonucu oluşan uçucu kül gazla beraber sürüklenir ve nispeten daha iri parçalar siklonlarda, ince tanelerde elektrostatik filtre ya da torba filtrelerde tutulur (Oymak ve Batu). Sirkülasyonlu yataklarda; gazın hızının artmasıyla yataktaki katı parçacıklar yatak içinde hareket eder.

Kabarcıklı yataklardan farklı olarak bu sistemde yatak ile serbest bölge arasında ayırım belirgin bir şekilde yapılamaz (Oymak ve Batu). Sirkülasyonlu yataklarda yoğunluk 560 kg/m, kabarcıklı yataklarda ise 720 kg/m 'dir (Klein, 2002). Yanma 840-900 derecede gerçekleşir. Yanma esnasında ince parçacıklar yanma odasının dışına çıkar ve genellikle çıkıtsa bulunan siklonlar tarafından tutulup sisteme döndürülür. Bu şekilde dolaşım gerçekleştirebilir. Atık gazlaştırmada kullanılan sistemlerin kapasiteleri farklılık göstermektedir. Çizelge 3.9'de gazlaştırma sistemlerinin kapasiteleri yer almaktadır.



Şekil 3.12 : Kabarcıklı (a) ve sirkülasyonlu (b) gazlaştırıcı (Belgiomo v.d.,2003)

Çizelge 3.9 : Gazlaştırıcıların ısı kapasiteleri (Klein,2002)

Gazlaştırıcı Sistem	Yakıt kapasitesi
Aşağı akışlı	1kW-1MW
Yukarı akışlı	1.1MW-12MW
Kabarcıklı akışkan yatak	1MW-50MW
Sirkülasyonlu akışkan yatak	10MW-200MW

### 3.5.4 Plazma gazlaştırma

Plazma elektriksel yük ile oluşturulan sıcak iyonlaşmış gazdır. Plazma teknolojisinde oksijen, azot, hidrojen, argon gibi gazlar ya da bu gazların kombinasyonundan oluşan gazı 5000 °C ve üzerine çıkarmak için elektriksel yük kullanır. Oluşturulan bu sıcak gaz bu gaz atıkların arıtımında kullanılır. Plazma gazlaştırma sistemleri yakma sonucu oluşan küllerin arıtımında uzun süredir kullanılmasına karşın evsel atıklar için yeni gündeme gelen bir sistemdir. Plazma gazlaştırma kapalı ve basınç altında olan reaktörün içinde gerçekleşir. Yakıt olarak beslenecek madde reaktöre girdiğinde sıcak plazma gaz ile temas eder. Bazı sistemlerde birden fazla torç daha homojen bir akım sağlamak için reaktörün içine dairesel olarak yerleştirilirler. Gazlaştırma

reaksiyonlarının gerçekleşmesi için sisteme giren oksijen miktarının kontrol edilmesi gereklidir (CH2M Hill International Ltd., 2009). Plazmalı gazlaştırıcılarda C ihtiva eden her madde gazlaştırılabilen ve %80-85 arasında gazlaştırma verimi sağlanabilmektedir. Plazma gazlaştırma teknolojisi ile KKA bertarafında özellikle <1600 kcal ısı değerli atıklar için destekleyici ek yakıt (kömür, petrokok v.b.) kullanımı gerekebilmektedir. Plazma gazlaştırma sistemlerinin standart yakma sistemine göre üstünlükleri bulunmaktadır.

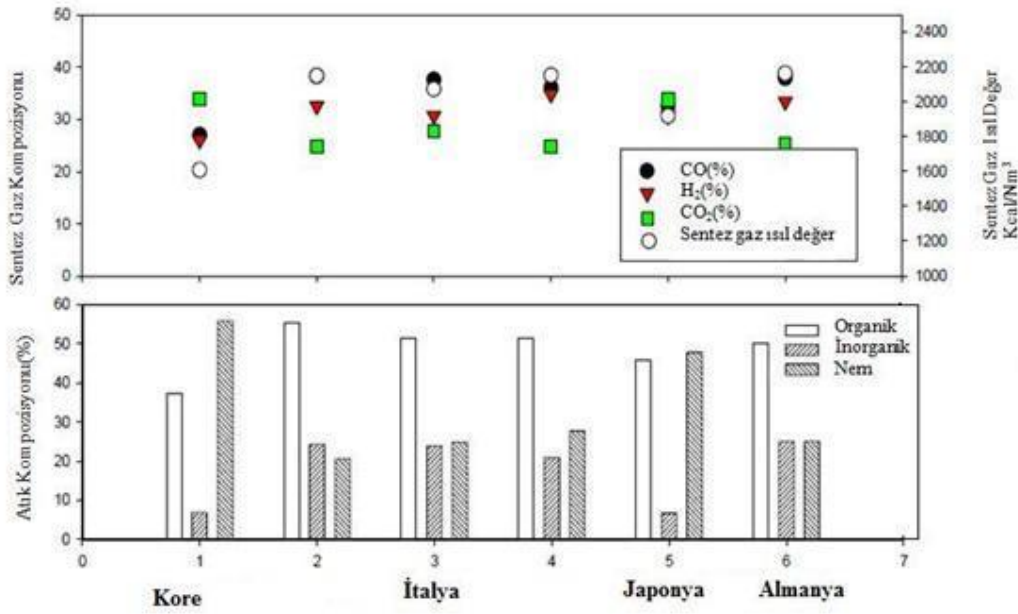
Bunlar;

- Plazma gazlaştırma sistemlerinde oluşan gaz enerji üretimi ve kimya sanayinde çeşitli maddelerin üretiminde kullanılabilir. Yanma sonucu oluşan gazın ise tamamı sadece enerji üretiminde kullanılır.
- Plazma gazlaştırma sistemi klasik yakma sistemlerinde oluşan uçucu kül veya cüruf malzeme üretmemesidir. Bu proseste yan ürün olarak toksik olmayan eriyik silikat veya metal üretilmektedir (Öztürk, 2010). Bu malzemeler hacimce gazlaştırmada kullanılan atığın %6-15i arasında değişmektedir ve yol taşı, agrega ve kiremit gibi yapı ve inşaat malzemesi yapımında kullanılabilir. Yakmada ise açığa çıkan kül yakılan atığın hacimce %20-30u arasındadır ve tehlikeli madde sınıfında değerlendirilmektedir(Gökçek, 2009)

### **3.5.5 Sentez gaz ve kullanım alanları**

Gazlaştırma sonucu oluşan sentez gazı çoğunlukla karbonmonoksit, hidrojen, su buharı ve metan içerir. Karbon içerikli maddelerin gazlaştırılması sonucu elde edilen elektriksel yük ile oluşturulan sıcak iyonlaşmış gazdır. bu gazın ısı değeri 1100~3100 kcal/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Yun ve Yoo (2003) sentez gazla ilgili çalışmalarında; sentez gazın ısı değeri atığın nem içeriği, organik madde miktarı gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini değişik kompozisyonlarda olan atıkları gazlaştırarak göstermişlerdir. Sentez gazın kalorifik değeri ile ilgili yapılan bir çalışmada; Kore'de ısı değeri 2,176 kcal/kg olan, % 55.8 nem ve % 6.9 kül içeriğine sahip K şehrinin kentsel atığı ile ısı değeri 2,686 kcal/kg olan ve % 50.4 nem, % 5.5 kül içeriğine sahip Y şehrinin kentsel atıkları gazlaştırılarak elde edilen sentez gazın kalitesi karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda % 50.4 nem içeriğine sahip yemek atıklarının, geri kazanılan maddelerin ayrıldığı, kağıt atığının daha fazla olduğu, gazlaştırma sistemine daha fazla organik atığın beslendiği K şehrindeki

atığın gazlaştırılmasıyla elde edilen sentez gazın diğer şehre göre daha yüksek ısı değere 2,125 kcal/Nm<sup>3</sup> sahip olduğu ve gazın % 38 CO ve % 32 hidrojen içerdiği belirlenmiştir. Kore'deki tesise benzer özellikte gazlaştırma tesisleri bulunan İtalya, Japonya, Almanya'da üretilen sentez gazın özellikleri de incelendiğinde şekil 34 deki grafik elde edilmiştir. Kore ve Japonya'daki kentsel katı atıkların nem içeriği %50 civarındayken bu oran Avrupa ülkelerinde %30 u aşmamaktadır. Şekilde 3.13' de görüldüğü gibi yüksek nem içeriğine sahip atıklardan oluşan sentez gaz düşük ısı değere sahiptir

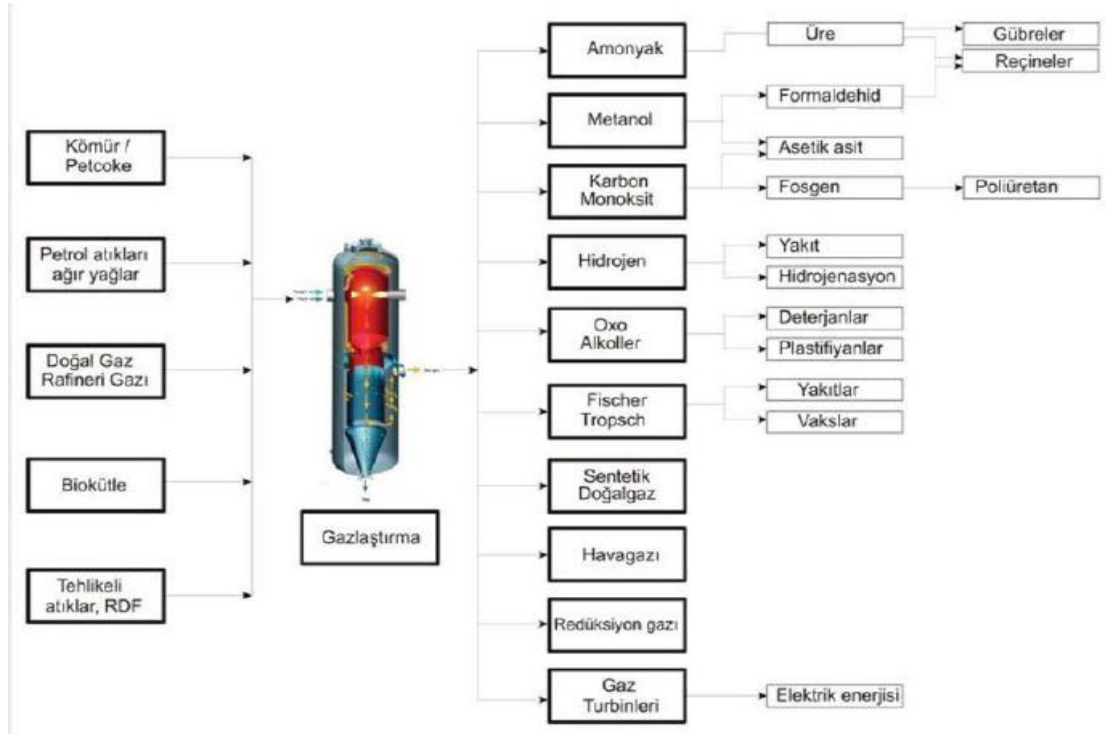


**Şekil 3.13 :** Sentez gazın atığın organik, inorganik madde ve nem muhtevasıyla ilişkisi (Yun, Chung and Yoo, 2003)

Sentez gaz kimya endüstrisinde çeşitli maddelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu maddeler Şekil 3.14' de görülmektedir. Sentez gazının gelecekte erimiş karbonatlı yakıt hücresi ve metanol üretiminde kullanımının yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Erimiş karbonatlı yakıt hücreleri enerji verimliliği ve değişik enerji kazanım sistemlerine kolay entegre olmasından dolayı oldukça ilgi çekici sistemlerdir. Metanol ise H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> içeren gazın bakır katalizörü kullanılarak sentezlenmesiyle oluşan iyi bilinen, temiz bir yakıttır. Metanolün homojen atık kullanılarak elde edilebilmesinin gelecekte yaygınlaşabilmesi düşünülmektedir (Belgiorno v.d. 2003). Sentez gaz şekil 34 deki gibi pek çok kimyasal üretiminde kullanıldığı gibi fischer tropsch prosesi ile sıvı yakıt üretiminde de kullanılmaktadır. Bu sistem sentez gazda bulunan kimyasal katalizörün kullanıldığı reaksiyonla karbonmonoksit ve hidrojenin sıvı hidrokarbona dönüştürülmesidir.

Genellikle katalizör olarak demir ve kobalt kullanılır. Bu reaksiyonların sonucunda sentetik yakıt elde edilir (Bowen, Irwin, 2006).

Atıkların plazmalı gazlaştırılması sonucunda oluşturulan sentez gazdan aynı zamanda jet yakıtı üretiminde sağlanmaktadır. İngiliz hava yolları Solena firmasıyla yaptığı anlaşmada 2014 yılında faaliyete geçirmeyi planladığı tesiste 500000 tonluk evsel atıktan 61 milyon litre yakıt üretmeyi planlamaktadır (Solena group Inc.,2011)



Şekil 3.14 : Sentez gazının kullanım alanları (Öztürk, 2010)

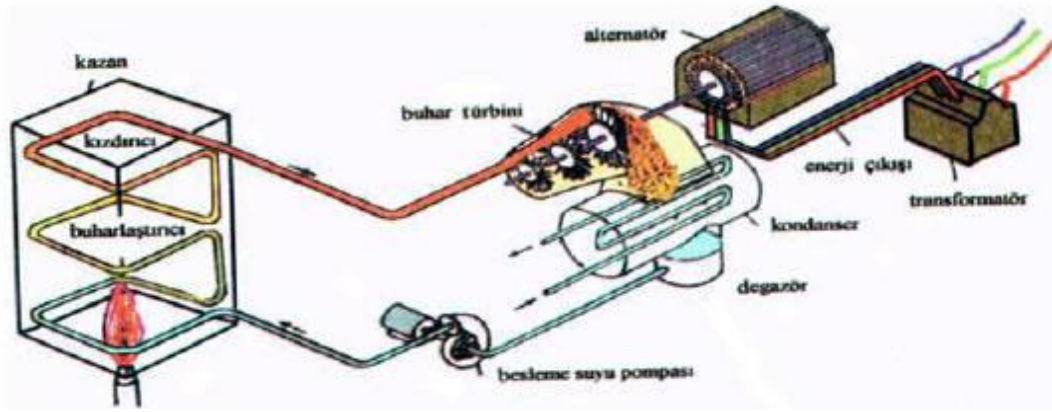
### 3.6 Termal Bertaraf Sistemlerinde Enerji Geri Kazanımı

Giren atıkların kalorifik değerinin % 70'i ilâ % 80'i enerji olarak değerlendirilebilir (Akpınar,2006). Geri kalanı, fırında oluşan enerji kayıpları, külden kaynaklanan ısı kaybı, yakılmayan malzeme ve baca gazının ısı kaybı olarak sistemden kaybedilir. Kentsel katı atıkların yakıldığı sistemlerde enerji ya doğrudan buhar kullanımı ile ya da elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Yakma tesislerinde ısı geri kazanım için kullanılan yöntemler; Su duvarlı yanma odaları ve atık ısı kazanlarıdır. Isı geri kazanım sistemlerinden sıcak su veya buhar üretilebilir. Sıcak su düşük sıcaklıkta endüstriyel ve lokal ısıtma amaçlı kullanılabilir. Isı geri kazanım sistemlerinin kullanılması baca gazı temizleme ve soğutma maliyetleri açısından olumlu etki yaratmaktadır. Isı geri kazanımı olmayan katı atık yakma tesislerinde, tam yanmayı ve türbülansı sağlamak için %100 – 200 hava fazlası gereklidir. Bu oran Isı geri

kazanım sistemi kullanıldığı zaman ise %50 – 100 olmaktadır. Dolayısıyla sistemde daha az hava fazlasının kullanılması oluşacak olan baca gazının miktarını ve buna bağlı olarak baca gazı temizleme maliyetinin de azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca ısı geri kazanım sistemleri yakma sonucunda oluşan gazın sıcaklığının düşmesine ve baca gazı soğutmak için kullanılan soğutma suyu miktarını azalmasını sağlar Su duvarlı yanma odaları: Bu metotta, yanma odasının çevresi içerisinden suyun geçtiği metal bir boru hattıyla çevrilidir. Şekilde yanma odasında kullanılan su boruları görülmektedir. Bu su boruları yanma odasındaki ısının suya transfer edilmesini sağlar ve buhar üretirler. Genellikle ızgaralara bitisik fırın duvarı boruları çok yüksek sıcaklıklardan dolayı korozyona uğrayabilirler. Dolayısıyla yüksek sıcaklık ve mekanik aşınmadan korumak için su boruları refraktör (ısıya dirençli) malzeme ile kaplanır(Vesilind v.d. 2002)

Atık ısı kazanı: Bu metot genellikle modüler yakma ünitelerinde kullanılır. Bu metotta fırının yanma odası fırın duvarlarından ısı kayıplarını azaltmak için izole edilmiş refraktör malzemeyle kaplıdır (Akpınar, 2006) Atık ısı kazanlarında mevcut borular içinde su bulunmakta gelen sıcak gaz bu borular etrafından geçerken taşıdığı ısının bir kısmını borulardaki akışkana aktarmaktadır. Borulardaki su buharlaşarak buhar kazanında toplanıp buradan ısıtma veya proses buharı olarak çekilmektedir. Sıcak baca gazları kazanda bulunan sudan, yüksek sıcaklıkta yüksek basınçlı buhar elde edilir. Elde edilen yüksek basınçlı buhar, buhar türbinine gönderilerek mekanik enerji elde edilir. Buhar türbinine bağlı olan alternatörde bu enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Elde edilen kızgın buhar, buhar türbinine gönderilir. Buhar türbininin kanatlarına çarpan buhar, türbini döndürür. Buhar türbinine bağlı alternatör bu dönme şeklindeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu sistem aynı zamanda sistemde oluşan baca gazı sıcaklığını azaltarak hava kirliliği kontrol sistemlerinde yüksek sıcaklıktan kaynaklanabilecek sorunları engeller.

Yakma sistemlerinde buhar türbini ile enerji elde edilmesi sisteminin şematik görünüşü Şekil 3.15' de verilmiştir.

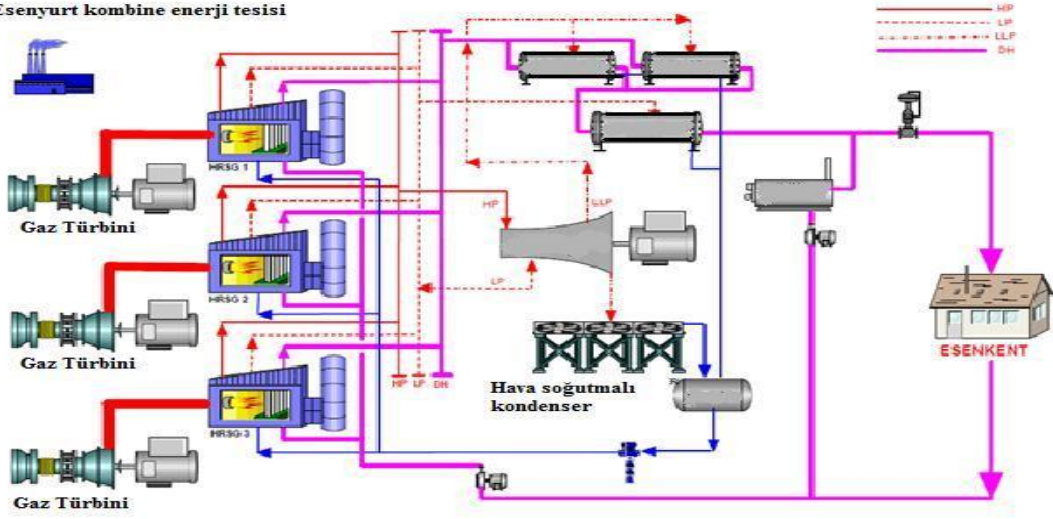


**Şekil 3.15 :** Buhar türbini çalışma prensibi (Güneş, 2009)

Yakma sistemlerinde türbinde düşük basınç noktasından elde edilen yüksek sıcaklıktaki suyun bölgesel ısıtma ve çeşitli proseslerin ısıtmada kullanımında mümkündür. Bu sistemde yüksek verimlilikte ve kirlilik oluşturmadan bölgesel ısınma sağlanabilmektedir. Atık yakma sistemlerinde uygulanacak olan enerji geri kazanım sisteminin toplam maliyet üzerinde de etkisi bulunmaktadır. Bölgesel ısıtmada ana element kojenerasyon sistemi veya ısı geri kazanımı olan kazan sistemidir. Bölgesel ısıtma atık yakmanın yanında güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi enerjiler kullanılarak sağlanabilmektedir. Bölgesel ısıtmada üretilen ısı tüketicilere dağıtılır. Bölgesel ısıtma sistemlerinde paralel 2 hat bulunur. Isıtmada kullanılacak olan buhar veya su bir hattan bölgeye iletilirken diğer hattan tesise döner. Avrupada kombine çevrim santrallerinde üretilen buhar genellikle bölge ısıtmada konut ısıtmak amacıyla da kullanılır.

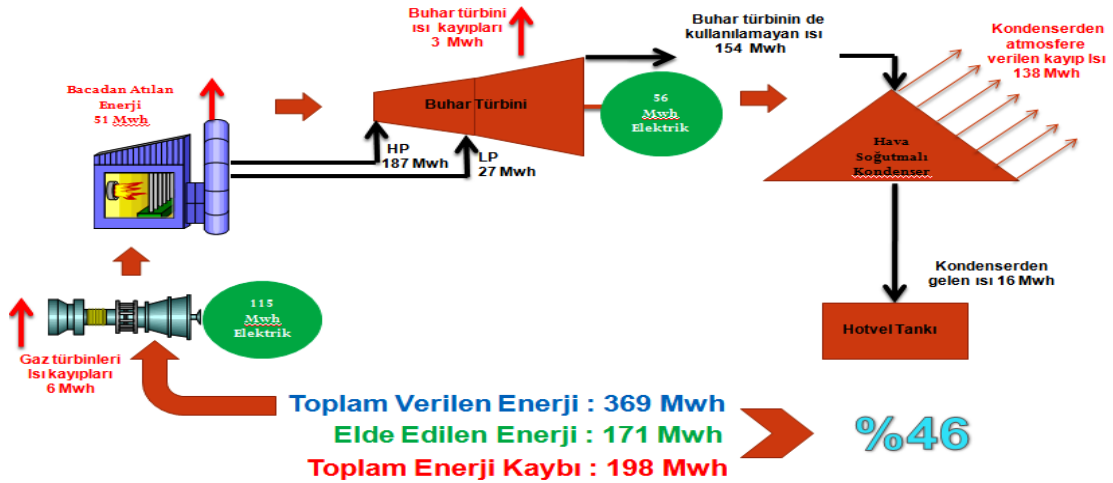
Türkiye’de ise kojenerasyon tesisiyle konut ısıtmadaki tek örnek İstanbulda Esenyurtta bulunan doğalgazla çalışan kombine çevrim santralidir. Bu santral 180 MW elektrik, 180 MW termal kapasiteli kombine çevrimli enerji santralidir ve 10000 konutun ısınmasını sağlamaktadır (Çalık, 2011). Bölgesel ısıtmada kullanılan suyun sıcaklığı 110-130 °C arasında olmaktadır. Türbinlerden çekilen buharın basıncı ise 2 barla 6 bar arasındadır. Sisteme dönen suyun sıcaklığı ise 70-90 °C arasındadır. Şekil 3.16 ‘da Esenyurt kombine enerji tesisi akım şeması görülmektedir.

Esenyurt kombine enerji tesisi

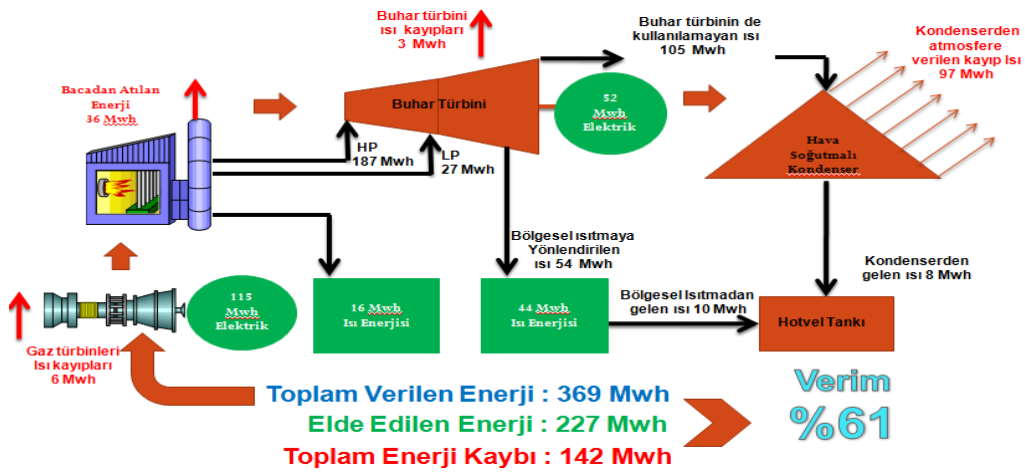


Şekil 3.16 : Esenyurt kojenerasyon tesisi akım şeması (Çalık, 2011)

Sistemde sadece elektrik üretildiğinde elde edilen verim ile elektrik ve ısı üretimi birlikte sağlandığındaki verim Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de görülmektedir.

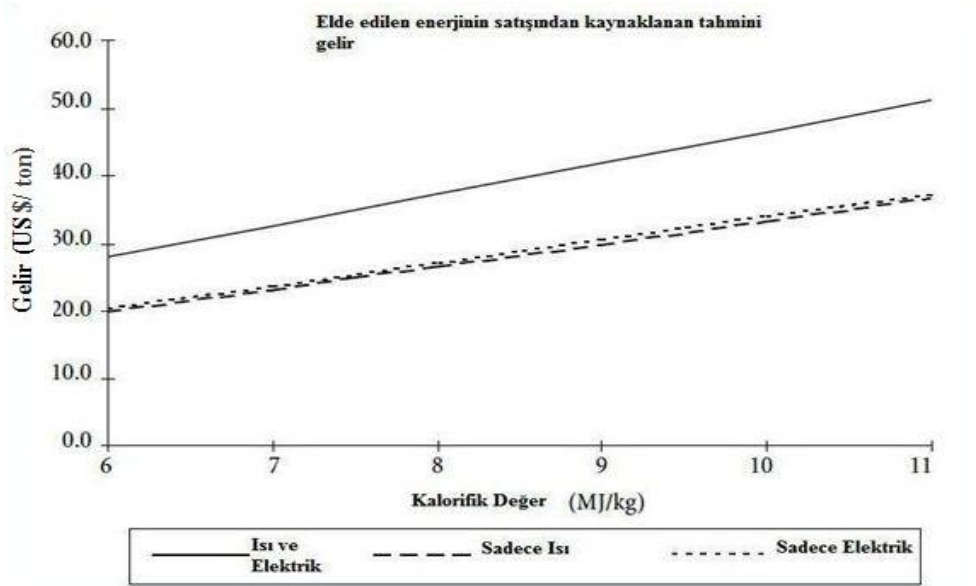


Şekil 3.17 : Sadece elektrik üretimi (Çalık, 2011)



Şekil 3.18 : Elektrik ve ısı üretimi (Çalık, 2011)

Yakma tesisi elektrik üretimi yerine sadece sıcak su ya da buhar üretimi gerçekleştirirse elektrik üretiminin gerçekleştiği sistemlere oranla maliyet yaklaşık %30 oranında azalacaktır. Ancak sistemde elektrik ve buhar üretiminin birlikte sağlanması durumunda toplam kazanç daha fazla olmaktadır. Şekil 3.19'da sadece ısı, sadece elektrik ve ısı ve elektriğin birlikte üretildiği durumlarda ton atık başına toplam kazancın grafiği bulunmaktadır.



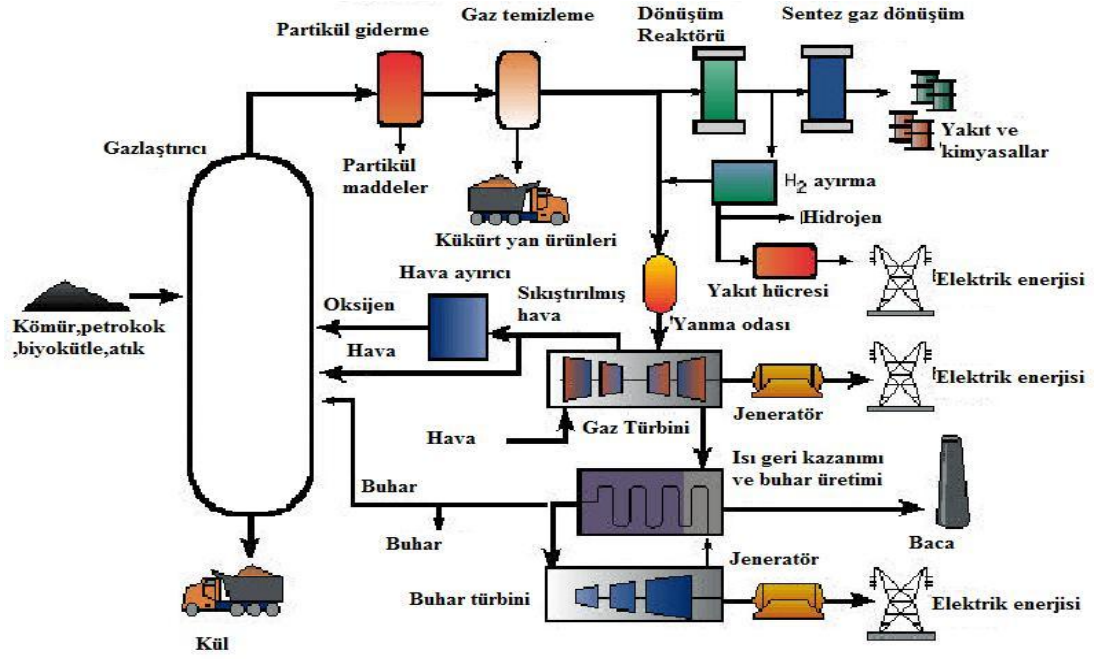
**Şekil 3.19 :** Enerji satışından kaynaklanan tahmini gelir (The World Bank,1999)

Gazlaştırma sistemlerinde enerji geri kazanımında buhar çevrimi, gaz motorları ,gaz türbinleri kullanılmaktadır.Buhar çevrimi; Buhar çevrimi enerji kazanımı için en basit opsiyonlardan biridir. Herhangi bir gaz arıtımına gerek duyulmaz çünkü katı madde fırında yakılır ve kazana bir zarar vermez. Buhar çevrimli gazlaştırma sistemlerinde maksimum verim %23 olabilmektedir. Buhar kazanlarında en önemli kısıtlama kızdırıcı borulardaki metalde atık gazdaki HCl'den kaynaklanan korozyonun engellenmesi için sıcaklığın 450 °C aşmaması gerekliliğidir. Buda türbine giden buharın sıcaklığının düşmesine dolayısıyla elektrik üretim veriminin azalmasına neden olur. Bu kısıtlama atık gaz arıtımı ile giderilebilir. Gaz arıtımı sistemden HCl'nin uzaklaşmasına ve sistemde sıcaklığın 520 °C kadar çıkabilmesine imkan vermektedir. Bunun sonucunda sistemde elektrik üretim verimliliği %6 artmaktadır. Gaz motorları; dizel motorlar sıkıştırma oranı azaltılarak ve kıvılcım ateşlemeli motor eklenmesi ile tamamen gaz ile çalışan sistemlere dönüştürülebilirler.

Bu sistemlerle %25 elektrik enerjisi üretim verimi elde edilebilmektedir. Gaz motorlarının avantajı gaz türbinlerine oranlar daha dayanıklı ve kirleticilere karşı toleransının fazla olmasıdır. Gaz Türbinleri; İleri kombine çevrimli gaz türbini olan enerji üretim tesislerinde verim %60 civarında olmaktadır. Net elektrik üretimi gaz arıtımındaki tüketimden dolayı %40 civarındadır. Gaz türbinleri gazın kalitesinden etkilenmektedir, sistemin tolere edebildiği kirletici emisyonları oldukça düşük seviyelerdedir ( Belgiorno v.d. 2003).

Gazlaştırma sistemlerinde entegre gazlaştırmalı kombine çevrim santralleri ile enerji geri kazanımı sağlanmaktadır. Entegre gazlaştırmalı kombine çevrim tesisleri gazlaştırma sistemlerinin yüksek verimlilikte kombine çevrimli elektrik enerji sistemleriyle kombinasyonudur. Bu sistemler bir veya daha çok buhar türbini ve gaz türbinlerinden oluşmaktadır. Kombine çevrimde tek bir yakıtla iki şekilde elektrik enerjisi üretilir. İlk olarak gaz türbininin yanma odalarında yakılır. Temiz sentez gaz yüksek verimlilikteki gaz türbinlerinde elektrik enerjisi üretmek amacıyla yakılır. Yanan ve genişleyen gaz türbin kanatlarına çarparak türbini çevirmeye başlar. Bu şekilde gaz türbininde elde edilen kinetik enerji, türbin şaftına bağlı olan jeneratör ile elektrik enerjisine çevrilir. Gazlaştırma reaksiyonundaki fazla olan ısıda buhar üretmek amacıyla tutulur ve buhar türbinlere gönderilerek elektrik enerjisine dönüştürülür. Şekil 3.20 'de yeni nesil gazlaştırma tabanlı enerji dönüşüm teknolojilerinin akım şemasını göstermektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gazlaştırma sistemleri kömür, petrokok, atık, biyokütle gibi değişik maddeler beslenerek işletilebilmektedir. IGCC sistemlerinde karbon içerikli maddeler yüksek sıcaklıkta CO ve H<sub>2</sub> den oluşan sentez gaza dönüştürülürler. Sistemde oluşan kül inert ve ekonomik değeri olan bir üründür. Sistemde oluşan kükürt ve azot bileşenleri gibi gaz kirleticiler kolayca ayrılabilirler. Hidrojen sülfür ve karbonil sülfür(COS), hidrolize edilerek ve organik solvent içerisinde çözülerek ekonomik değeri olan elementel kükürt veya sülfirik aside dönüştürülürler. Azot ise gazlaştırıcının ingirgeyici ortamında, azot siyanür ve tiyosiyanaatta olduğu gibi NH<sub>3</sub> e çevrilir ve ıslak sıyırma ile kolayca kaldırılabilir (Ratafia-Brown, Manfredo, Hoffmann, Ramezan, 2002).

Gazlaştırma tabanlı sisteme sentez gazı enerjiye dönüştürmek için çeşitli sistemler eklenebilir. Şekildeki sistemde sentez gaz türbinine gönderilerek elektrik enerjisine dönüştürülmüş gaz türbininden çıkan sıcak baca gazı ise ısı geri kazanımlı buhar jeneratöründe buhara dönüştürülerek buhar türbininde elektrik enerjisine çevrilmiştir.



**Şekil 3.20 :** Entegre gazlaştırma ve kombine çevrim santrali(Ratafia-Brown v.d.,2002)

Yakma ve gazlaştırma sistemlerinde kullanılan ısı geri kazanım sistemlerinin etkinlikleri farklılık gösterir. Çizelge 3.10'da elektrik üretiminde kullanılan sistemlerin gazlaştırma ve yakma için verimleri görülmektedir. Örneğin; yakma fırınlarında enerji geri kazanımı için kullanılan buhar türbinlerinin potansiyel net elektrik üretme verimi %14-27 arasındadır buna karşın gazlaştırma sistemlerinde buhar türbinleriyle enerji kazanımında elektrik üretimi verimi %10-20 arasında değişmektedir (Tezcar ve Can,2010). Ancak gazlaştırma sistemlerinde elde edilen sentez gazının gaz motoru veya gaz türbinlerinde doğrudan yakılarak elektrik üretiminde %30'lara ulaşan verime ulaşabilmekte ve buna ilave olarak gazlaştırma entegre kombine sistemleri ile gazlaştırmada pek çok aşamada enerji kazanımı mümkün olmaktadır.

**Çizelge 3.10 :** Potansiyel elektrik üretim verimleri(Tezcar ve Can, 2010)

Enerji sistemi	Piroliz ve gazlaştırma sistemlerinde verim (%)	Yakma sistemlerinde verim (%)
Buhar kazanı ve türbini	10-20	14-27
Gaz motorları	13-28	-
Kombine çevrimli gaz türbinleri	30	-

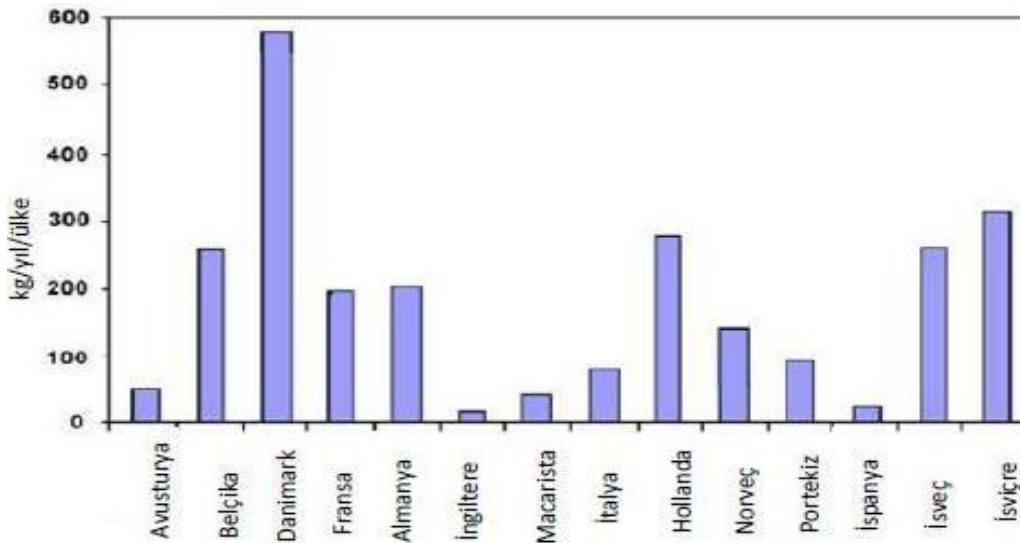
### 3.7 Termal Bertaraf Sistemleri Uygulamaları

Atık yakma sistemleri Avrupada pek çok ülkede ve Japonya'da iyi bilinen ve kullanılan bertaraf teknikleri arasındadır. Bu tesislerde ülke politikalarına göre sadece atık bertarafı yapıldığı gibi aynı zamanda enerji üretimi gerçekleştiren sistemler mevcuttur. Çizelge 3.11'de dünyada kurulu yakma sistemlerine ilişkin veriler bulunmaktadır.

**Çizelge 3.11 :** Dünyada enerji üretimine yönelik luruluk yakma sistemleri(European Commission, 2006.a)

Yakma Teknolojilerinin Dünyadaki Uygulamaları	Tesis Sayısı	Yakma ile bertaraf oranı (%)	Yakma ile bertaraf edilen atık miktarı (milyon ton/yıl)	Toplam üretilen enerji MW-h
Avrupa	>400	20-30	55	2200
A.B.D	89	8-15	30	2700
Japonya	263	70-80	40	1441
Diğer	70	-	25	-

Ülkemizde zaman zaman çöplerden elektrik enerjisi üretilmesi gündeme gelmesine karşın, kentsel katı atıkların yakılarak elektrik enerjisi üretimi yönünde tesisler bulunmamaktadır. Bu tür yatırımlar gelişmiş ülkelerde, özellikle Almanya, İngiltere, Fransa. Japonya gibi ülkelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Avrupa ve diğer ülkelerde yapılan yakma tesisleri hem kapasite hem de teknik yönünden bölgesel olarak farklılıklar göstermektedir. Şekil 3.21'da Avrupa'da yakma sistemlerinin kapasiteleri görülmektedir.



**Şekil 3.21 :** Atık yakma sistemlerinin ülkelere göre kapasitesi (European Commission, 2006.a)

Avrupada kişi başına yakılan atık miktarının en yüksek olduğu yerlerden biri Danimarka'dır. Danimarka'da ilk kentsel atıklardan yakma tesisi 1903 yılında yapılmıştır. 2003 yılında ise toplam yakma tesisi sayısı ise 32 dir. Bu tesislerden 30 tanesi kombine ısı güç üretim sistemleridir. 2002 yılında bu tesislerde toplam 2.9 milyon ton atık bertaraf edilmiştir.

2005 yılında işletmeye alınan Reno Nord tesisinin kapasitesi 20t/h dir. Tesiste 425 °C ve debisi 22kg/s olan buhar üretilmektedir. Aynı zamanda üretilen elektrik enerjisi ise 17.5 MW' dır (Kleis, Vølund and Dalager, 2003). Tesisin yaklaşık 16000 evin elektrik, 30000 evin ısınma ihtiyacını karşılamaktadır ( Vølund B&W, 2006).



**Şekil 3.22 : Reno Nord Yakma tesisi**

Avrupada kentsel katı atıkların yakma ile bertarafının yaygın şekilde sağlandığı ülkelerden biri Almanya'dır. Almanya'da toplam 59 adet yakma tesisi bulunmaktadır ve toplam atık yakma tesislerinin kapasitesi 257 kton/yıldır (European Commission, 2006.a). Almanya'da yayınlanan yönetmeliğe göre, 2005 yılından itibaren, tüm belediyeler ve belediye birlikleri, geri kazanılamayan atıkları yakmak zorunda olacaktır. Almanya'da Neustadt'taki katı atık yakma tesisinin kapasitesi 56 000 t/yıl'dır. Baca gazı arıtma birimi, hiç atıksu üretmeden çalışmaktadır. İlk önce yakma sonucu oluşan ham baca gazı, 220 °C'ye soğutulur, sonra yıkayıcıda oluşan gazdaki partikül ve su karışımı çamurla birlikte bir doğru akışlı kurulama biriminden geçer. Baca gazındaki çamur, bir santrifüjlü püskürtücü ile kabarcıklara ayrılıp kolaylıkla kurutulur. Kurutma enerjisinin baca gazından alınmasıyla gazın baca gazı çıkış sıcaklığı 160 °C düşer. Baca gazı, daha sonra yüksek verimli siklon ayırıcısına geçer. Siklonlarda, 15 µm'den daha büyük olan partiküller ayıklanır ve daha sonra baca gazı bir yıkayıcıdan geçer. Bu yıkayıcıda sıcaklık 75°C'ye düşürülür. İkinci bir yıkayıcıda HCl ve HF absorpsiyonu gerçekleştirilmek üzere gaz dolgu kolondan geçer.

SO<sub>2</sub> ve aerosol ayırımı için gaz akımı jet yıkayıcısında gerçekleştirilir. Jet yıkayıcısından sonra, baca gazları yine dolgulu bir yıkayıcıdan geçer. Sistemin sonunda baca gazı 60 °C sıcaklıkla 55 m yüksek olan bir baca vasıtasıyla alıcı ortama verilir ( R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti & DHV Consultants,2010) . Çizelge 3.12’de tesisin teknik özellikleri bulunmaktadır.

**Çizelge 3.12 : Neustadt yakma tesisi teknik özellikleri(R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti & DHV Consultants,2010)**

<b>Konu</b>	<b>Özellikler</b>
İşletme	Her gün 3 vardiya
Yakma hattı (adet)	1
Kurulu yakma kapasitesi	1 * 192 t/gün
Yakma sistemi	Yatay ızgara
Isı değerlendirme	Buhar üretimi
Enerji değerlendirme	Kojenerasyon
Baca gazı arıtma	Atıksu üretmeyen yıkayıcı, Roll-Ciba-Geigy sistemi
Emisyon değerleri	
-Toplam toz	30 mg/m <sup>3</sup>
-HCl	10 mg/m <sup>3</sup>
-HF	0.5 mg/m <sup>3</sup>
-Civa	30 mg/m <sup>3</sup>
Cüruf ve hurda metal şartlandırma	Yok
Yakılan atık	Evsel atık ve evsel nitelikli ticarî atık
Izgaranın çalışabildiği kalorifik değerler	6 600 – 11 000 kJ/kg
Baca gazı üretimi	66 000 m <sup>3</sup> /h
Kurulu türbin gücü	5.3 MW
Kurulu ısı gücü	13 MW
Kazandan çıkan buhar	420 C, 40 bar
Toplam alan	31 900 m <sup>2</sup>
Tesis alanı	1 775 m <sup>2</sup>

Almanya’dan sonra en fazla evsel atık yakma tesisi bulunduran ülke Fransa’dır. Fransada 210 adet evsel atık yakma tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin toplam kapasitesi 11748MT/yıl’dır. Fransa’da yapılan tesislerden en önemlisi Paris şehrindeki St. Quen bölgesinde bulunan 'çöp santrali'dir. Tesisin kuruluşundaki amaç Pariste üretilen kentsel atığın %30 unu bu tesiste yakılmasını sağlamaktır. Tesis 3 adet her birinin kapasitesi 28t/s olan hareketli ızgaralardan oluşmaktadır. 1990 yılında kurulan tesis 1992 yılında toplam 635153 ton atık bertarafını gerçekleştirmiş ve 1,538,600 ton buhar 19800 MWh elektrik üretmiştir. St. Quen Santrali, son derece modern mimarisi ile göze çarpan iyi bir örnektir ve bitirildiğinde 155 milyon dolara mal olmuştur.

İngiltere’de, 1994 yılında Londra yakınlarında kurulan Deptford Sanrali'nin çöplerden enerji üretmek amacıyla işletmeye alınmıştır ve bölgede bulunan en önemli tesislerdendir. Tesis yaklaşık olarak 30MW elektrik üretmektedir. Buda yaklaşık olarak 50000 evin ihtiyacını karşılamaktadır. Tesis yılda 420000 ton evsel atık yakmaktadır. Tesise gelen ham atık 4 gün depolama kapasitesi olan kapalı bir depoda depolanır.

Atık bir vinç ile her biri 29 ton/saat kapasitedeki 2 adet fırına beslenir. Her iki fırında geri hareketli ızgara sistemi kullanılmaktadır. Sistemde 47 bar basıncında 395 C buhar üretilir. Bu buhar 32 MW'lık türbinlere iletilir. Aynı zamanda ısı dönüştürücüleri ile buhardan 7500 evi besleyecek kadar bölge ısıtmasında kullanılmak üzere sıcak su sağlanır. Emisyonları en aza indirmek için kontrollü bir şekilde yüksek sıcaklık sağlanmakta ve gaz temizleme üniteleri kullanılmaktadır. Gaz temizleme ekipmanları asit gaz temizleyici ve partikül giderimi için torba filtreler içermektedir. Tesisin kurulum maliyeti 85 milyon euro olarak belirtilmiştir. İşletme maliyeti ise laboratuvar, kül bertarafı, sarf malzemeleri için yaklaşık olarak £7 milyon/yıl olarak hesaplanmıştır. Tesiste üretilen elektrik ulusal elektrik şirketine 1991 yılında belirlenen fiyata göre 6.55p/kWh satılmaktadır. Bu fiyatlar perakende fiyatları endeksine göre endekslenmektedir. Aynı zamanda ızgara külünden elde edilen demirli metaller geri kazanım için satılmaktadır. Amerika’da ise günlük kapasitesi 250 tondan fazla olan toplam 167 adet evsel atık yakma ünitesi bulunmaktadır. Bu üniteler toplam 66 yakma tesisi içerisinde yer almaktadır. 167 yakma ünitesinden 133 tanesi su duvarlı kütle yakma tesisleridir.34 tanesi ise yine su duvarlı ısı geri kazanım sistemi olan işlenmiş atık yakma tesisleridir. Aynı zamanda küçük kapasiteli modüler yakma tesisleride bulunmaktadır.

Bazı istisnalar dışında yakma ünitelerinde üretilen buhar türbinlere gönderilerek elektrik üretimi sağlanır. Yakma tesislerinde yıllık toplam 22,000 gigawatsaat elektrik üretimi sağlanmaktadır. Ancak bazı küçük kapasiteli tesisler yanma sonucu oluşan buharı elektrik üretiminde kullanmak yerine endüstriyel prosesler de kullanmak amacıyla kullanır (UNEP Questionnaire,2010). Avrupa’da son 20 yıldır atık yakma sistemleri yapılan araştırma ve geliştirmeler sonucunda oldukça ilerlemiştir. Evsel katı atıkların bertarafı için kullanılan sistemlerin genellikle ızgaralı sistemlerdir. Izgaralı sistemler uzun süre kullanım sonucunda elde edilen tecrübeler ve işletim kolaylığı açısından tercih edilmektedir.

### 3.8 Termal Bertaraf Sistemlerinden Kaynaklanan Kirletici Emisyonlar

Atıkların termal bertarafında ortaya çıkan kirleticilerin özellikleri;

- Atığın kompozisyonu ve içeriği
- Yanma odasının teknik özellikleri
- Baca gazı arıtma sistemleri ve verimleri etkilemektedir.

Atıkların yakılması sonucu oluşan hava kirleticileri; konsantrasyonları atığın özellikleri ve baca gazı temizleme ekipmanlarına bağlı olarak değişen HCl, HF, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve ağır metallerdir. CO ve VOC emisyonlarını ise fırın sıcaklığı ve atığın heterojen yapısından etkilenmektedir. Fırın dizaynı aynı zamanda NO<sub>x</sub> oluşumunu da etkilemektedir. Sistemde oluşan toz ise büyük oranda baca gazı temizleme sistemine bağlıdır. (European Commission, 2006.b). Evsel atık yakma tesislerinde baca gazı ton atık başına yaklaşık olarak 4500- 6000 m<sup>3</sup> arasındadır. Gazlaştırma sistemlerinde ise daha düşük gaz hacmi oluşmaktadır.

Yakma sistemlerinden oluşan katı atıklar ise; Temel olarak atığın yanmayan kısmından oluşan taban külü ve gaz temizleme ekipmanların da tutulan atık gazla hareket eden uçucu küldür. Sistemde oluşan kül miktarları atıktaki yanmayan maddelerin oranına ve fırının işletme koşullarına bağlıdır. Örneğin piroliz ve gazlaştırma sistemlerinde kül yerine katran oluşur. Bunun yanında yakma sistemlerinde büyük çoğunluğu uygulanan baca gazı temizleme sistemlerinden kaynaklan atık suda oluşmaktadır.

Yakma sistemlerinde atığın özelliklerine göre değişen hava kirleticiler; Partikül maddeler, metaller, asit gazlar, CO ve NO<sub>x</sub> lerdir.

Partikül maddeler; Yakma tesislerinde kaynaklanan partikül emisyonları yakma sisteminin dizayn ve işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Oluşan partikül maddelerin yaklaşık olarak %99u hava kirliliği kontrol sistemleri ile tutulur. Partikül maddeler sistemde hava fazlalığının artmasıyla çıkış gazında partikül maddelerin sürüklenmesini ve kontrol sistemlerine girişteki partikül konsantrasyonunu artırır.

Metaller; atık içerisinde bulunan gazete kağıdı, metal kutulardan kaynaklanmaktadır. Atık içerisinde bulunan metallerin(civa hariç) düşük buhar basıncı partikül üzerine yoğunlaşmasını sağlayabilir. Dolayısıyla sistemde PM kontrolü ile metallerde uzaklaştırılabilir.

Sistemde partikül madde kontrol sistemleriyle metallerin giderimi %98den daha yüksek olabilmektedir. Asit Gazlar; evsel atık yakma sistemlerinde oluşan asit gazlardan en önemlisi HCl ve SO<sub>2</sub> 'dir. Bunun yanında Hidrojen florid, hidrojen bromid, sülfür trioksit sistemde düşük konsantrasyonlarda bulunabilmektedir.

Atık gazdaki HCl ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonları direk olarak atıktaki klor ve sülfür içeriğiyle ilgilidir. Asit gazların oluşumunun işletme koşullarıyla ilgisi olmadığı düşünülmektedir.

Atıktaki klor, kağıt ve plastiklerden, kükürt ise lastikler, kiremitler, alçı parçalarından kaynaklanmaktadır. CO ve NO<sub>x</sub>'ler; Baca gazındaki CO emisyonları sistemdeki karbonun tamamının CO<sub>2</sub>'e dönüşmediği durumlarda oluşur. Yüksek miktarlarda CO bulunması sistemde yanma gazının oksijen varlığında yüksek sıcaklıkta yeterince tutulmadığının göstergesidir. Sistemde atık yakıldığı zaman ilk olarak CO, H<sub>2</sub> ve yanmamış hidrokarbonlar oluşur. Sisteme hava fazlası ilavesiyle CO ve H<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'ya dönüşür. Sisteme çok fazla hava ilave edilmesi sistemde gerçekleşmesi gereken oksidasyon reaksiyonlarının gecikmesine neden olur.

Çok az hava fazlasının verilmesi durumunda ise yanmamış hidrokarbon ve CO emisyonları artar. CO konsantrasyonlarının az olması gazın tam yandığını ve TOC emisyonlarının az olduğunu gösterir. NO<sub>x</sub> 'ler; Sistemde atıktaki azotun yanması ve atmosferik azotun bağlanması ile oluşur. Atıktaki azotun dönüşümü düşük sıcaklıklarda atmosferik azotun dönüşümü ise yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Dolayısıyla düşük sıcaklıklarda işletilen yakma sistemlerinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının %70-80'i atıktaki azot kaynaklı olmaktadır.

### **3.9 Hava Kirliliği Kontrol Sistemleri**

Baca gazı temizleme 3 düzeyde yapılabilir. Bunlar temel, orta ve ileri düzeyde baca gazı arıtımıdır. Çizelge 3.13'te baca gazı arıtma düzeylerinin açıklaması bulunmaktadır. Atık yapma sistemlerinde uygulanacak olan baca gazı arıtma sistemi sistemin maliyetini etkilemektedir.

Genellikle orta düzeyde baca gazı arıtımı yapılacak şekilde sistemler planlanır eğer sistemde ileri düzeyde baca gazı uygulanması durumunda maliyet yaklaşık %15 artmaktadır sadece temel gaz arıtımı kullanıldığında ise yaklaşık %10 oranında azalmaktadır (The World Bank,1999).

**Çizelge 3.13 : Baca gazı kontrol seviyeleri**

Temel baca gazı arıtımı	Sadece partikül giderimi
Orta düzeyde baca gazı arıtımı	Temel baca gazı arıtımı ve HCl, HF, SO <sub>2</sub> ve ağır metal giderimi
İleri düzeyde baca gazı arıtımı	Orta düzey baca gazı arıtımına ilave NO <sub>x</sub> ve dioksin giderimi

Evsel atık yakma sistemlerinde oluşan kirletici emisyonları önleyici pek çok sistem bulunmaktadır. PM için yaygın olarak kullanılan ESP'ler ve bez filtrelerdir. Bunların yanında siklonlar, venturi yıkayıcılar gibi yaygın kullanımı olmayan metodlarda bulunmaktadır. Asit gaz kontrolü için genellikle yüksek verimde PM gideriminden sonra spray kurutucular veya kuru sorbent enjeksiyon sistemleri kullanılır. Bunun yanında ıslak yıkayıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gelecekte kuru sistemlerin ıslak yıkayıcılara oranla daha fazla kullanılacağı düşünülmektedir. Kullanılan kontrol sistemleri kirletici desarj limitlerini sağlayacak şekilde seçilmelidir. Seçilen sistemlerin tesisin işletim süresi boyunca oluşabilecek emisyonlar dikkate alınarak seçilmesi ilerde ilave arıtım sistemlerine olan ihtiyacın azalmasını sağlamaktadır. Yaygın olarak kullanılan kontrol sistemleri ve verimleri Çizelge 3.14 ve 3.15'de yer almaktadır.

Elektrostatik filtreler; partiküler maddeler elektronların birinden diğerine atlaması sonucu pozitif ya da negatif yükle yüklenilerek giderilirler. Partiküller levha üzerinde biriktikten sonra vurularak giderilir. Filtrelerdeki elektriksel yükle yüklü levhaların alanı ne kadar büyükse PM giderim verimi okadar büyük olmaktadır. Bez filtreler; Bu sistemler asit gaz kontrolü ve gaz soğutma sistemlerinin kombinasyonu ile birlikte hem PM giderimi hemde metal giderimi için kullanılabilirler. Bu sistemlerde atık gaz porozlu sistemden geçirilerek PM giderilir. PM maddeler filtre yüzeyinde birikir. Filtre kekinin kalınlaşmasıyla basınç düşüşü artar ve filtre temizlenir. Partikül gidermede kullanılan sistemlerin giderim verimleri Çizelge 3.14'de görülmektedir.

**Çizelge 3.14 : Partikül giderme verimleri**

Partikül giderme verimleri				
Partikül çapı	Siklon	Ventüri yıkayıcılar	Elektrostatik Çöktürücü	Bez filtre
0.05			99	99.9
0.1			97	99.8
0.2			96	99.6
0.5		1	94	99.5
1		80	94	99.4
2	0.05	95	95	99.5
5	5	99	99	99.9
10	60	99.5	99.8	99.91
20	90	99.9	99.8	99.95

Püskürtmeli kurutucular; Bu sistemler özellikle Amerikada evsel atık yakma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir.

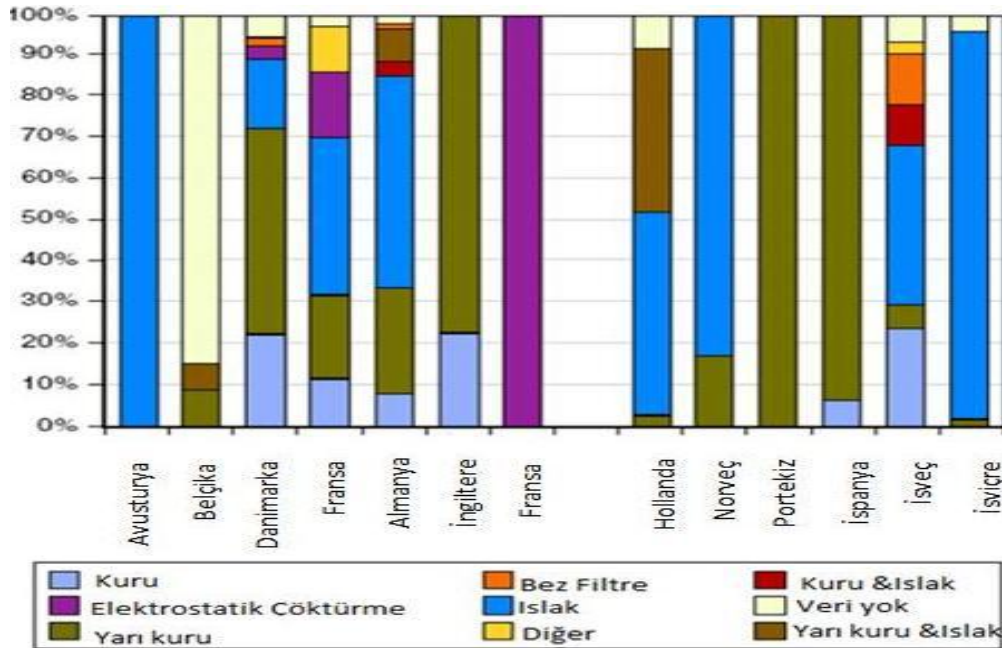
Püskürtmeli kurutucuların ESP veya bez filtrelerle kombinasyonu CDD/CDF, PM ve SO<sub>2</sub> kontrolü sağlanabilmektedir. Püskürtmeli kurutucularda kireç karışımı sisteme püskürtülür. Bu esnada karışımın içindeki su gazın soğumasını sağlarken kireç asit gazlarla reaksiyona girerek PM kontrol sistemleriyle giderilebilen kalsiyum tuzlarını oluşturur. Kuru sorbent enjeksiyonu; bu sistemler öncelikli olarak asit gaz kontrolünde kullanılırlar ancak gaz soğutma sistemleri ve ESP veya bez filtrelerle birlikte kullanıldıklarında PM ve CDD/CDF emisyonlarını kontrol etmekte kullanılabilirler. Bu sistemler kuru alkali sorbentlerin yanma fırını çıkışında gaz akımına verilerek veya direk sorbentlerin yanma fırınına ilavesiyle gerçekleştirilebilir. Gaz akımına verilen sorbentler (Ca veya Na) HCl , HF ve SO<sub>2</sub> le reaksiyona girerek alkali tuzları oluşturur. Oluşan tuzlar ESP veya bez filtrelerle tutularak sistemden uzaklaştırılır. Baca gazına sorbent enjeksiyonu yapılan sistemlerde verim gazın sıcaklığına, sorbentin gaz akımı ile ne derece karıştığına, kullanılan sorbent çeşidi ve miktarına göre değişir. Çıkış gazına sorbent enjeksiyon sistemiyle gaz soğutma sistemlerinin kombinasyonu buhar yoğunlaştırma ve sorbent üzerine adsorpsiyonu ile CDD/CDF giderimini arttırabilir. Sorbentin direk yanma fırınına enjeksiyonun da ise sorbent olarak kullanılan kireç taşı yüksek sıcaklıktan dolayı tepkimeye daha çabuk girer ve yüksek SO<sub>2</sub> giderimi düşük sorbent kullanımıyla sağlanabilir. Ayrıca sistemde HCl'ün giderilmesi çıkış gazında CDD/CDF oluşumunu azaltabilir ancak HCl ve kireç reaksiyonları 760 °C'nin üzerinde gerçekleşmediğinden dolayı baca gazına yapılan kuru sorbent enjeksiyon sistemleri daha uygundur.

Yakma fırınına sorbent enjeksiyonu yapılan sistemlerde bir diğer dezavantaj ise sistemde oluşan bileşenlerin ısı geri kazanım sistemlerinin yüzeyinde tortu ve aşınmaya sebep olmalarıdır. Baca gazı arıtma sistemlerinin verimleri Çizelge 3.15'te bulunmaktadır.

**Çizelge 3.15 :** Baca gazı arıtma sistemleri verimleri (Savage, Bordson, and Diaz, 1988)

NO <sub>x</sub>	SCR SCNR	% 10-60
Asit Gaz	Islak yıkayıcı Kuru yıkayıcı Bez Filtre ESP	% 50-85 SO <sub>2</sub> % 75-90 HCl
CO	Yakma fırınının kontrolü	% 50-90
Ağır Metaller	Kuru yıkayıcı Bez Filtre	% 70-95
PM	ESP Bez Filtre	% 95-99.9
Toksik Organik Bileşenler (dioksin ve furan)	Yakma fırınının kontrolü Kuru yıkayıcı ve bez filtre kombinasyonu	% 50-99.9

Avrupa'da yaygın olarak kullanılan baca gazı arıtma sistemleri Şekil 3.23' de görülmektedir.



**Şekil 3.23 :** Avrupa'da yaygın olarak kullanılan baca gazı arıtma sistemleri

Amerika'da yaygın olarak kullanılan sistemlerse Çizelge 3.16' da verilmiştir.

**Çizelge 3.16 :** Amerikada yakma tesislerinde kullanılan baca gazı arıtma sistemleri (Tchobanoglous, and Kreith, 2002)

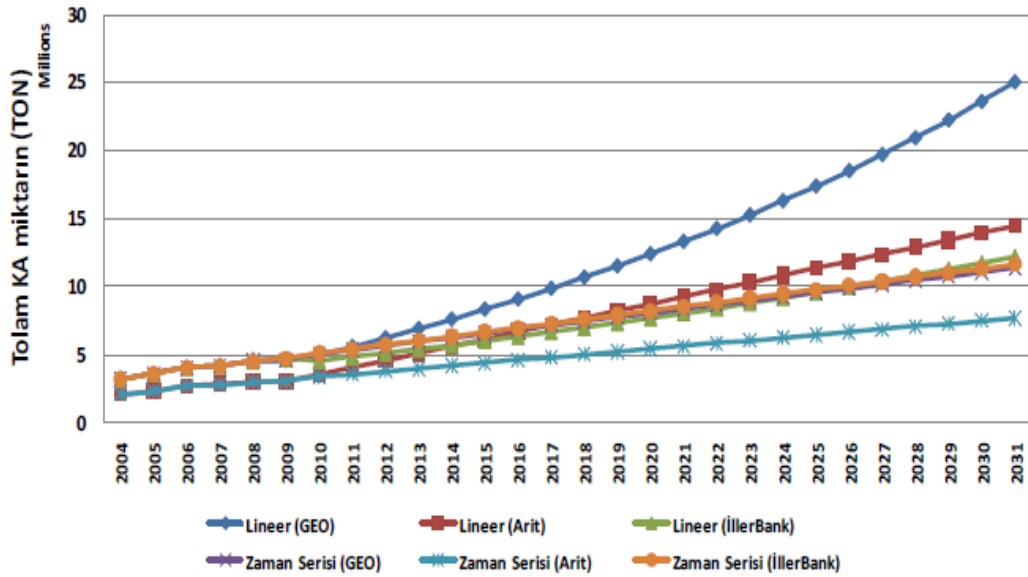
Teknoloji	Tesis Sayısı	Elektrostatik filtre	Sprey kurutucu	Islak yıkayıcı	Silikon	Kuru sorbent enjeksiyonu	Torba filtre	SNCR	Karbon enjeksiyonu
Büyük kapasiteli kütleli yakma	42	13	42	0	0	2	36	21	25
Küçük kapasiteli kütleli yakma	22	9	9	1	0	7	13	4	3
Büyük kapasiteli RDF yakma	4	1	2	0	0	1	3	0	0
Küçük kapasiteli RDF yakma	4	1	0	0	1	1	2	0	0



## 4. MATERYAL VE METOD

### 4.1 İstanbul'da Oluşan Kentsel Katı Atıklar ve Uygulanan Mevcut Atık Yönetimi

Türkiye İstatistik kurumundan alınan verilere göre İstanbul nüfusundaki yıllık %30 luk büyüme hızıyla Türkiye'de en fazla nüfusa sahip olan şehirdir.2000 yılı nüfus sayımına göre İstanbul ilinin 2000 yılı nüfusu 10 milyondan fazladır. Nüfus artış hızının giderek artmasıyla birlikte İstanbul için 2020 yılı nüfusunun 14 milyon gibi yüksek değere ulaşması beklenmektedir (Öztürk, Demir, Akgül, Yıldız, Özabalı, Tezer, 2007). Artan nüfusa paralel olarak İstanbul için oluşan atık miktarlarında her geçen yıl artmaktadır.1995 yılında İstanbul'da oluşan atık miktarı 8bin ton iken, 2009 yılında bu rakam 14 bin tona ulaşmıştır. İstanbul'da ortaya çıkan katı atık miktarının yıllara göre Şekil 4.1'deki gibi seyredeceği tahmin edilmiştir.



Şekil 4.1 : İstanbul'da oluşan atık miktarlarının yıllara göre değişimi (İpek vd. 2011)

İstanbul'da oluşan atıklar Avrupa Yakası'nda Baruthane, Yenibosna, Halkalı ve Silivri olmak üzere 4 adet Asya Yakası'nda Hekimbaşı, Küçükbakkalköy, Aydınlı olmak üzere 3 adet aktarma istasyonu üzerinden Asya Yakası'nda Kömürcüoda Avrupa Yakası'nda Odayeri düzenli depolama alanlarına getirilirler. İstanbul'da 2004 yılında günlük ortalama katı atık miktarı 11.430 tondur (22.860 m<sup>3</sup>/gün).

Yıllık depolama hacmi ise yaklaşık 5 milyon m<sup>3</sup> gibi çok büyük değerlere ulaşmaktadır.2009 yılında ise günlük ortalama evsel atık 14.350 ton değerine ulaşmıştır. Asya Yakası'nda bulunan Kömürcüoda depolama tesisi 1995 yılında işletmeye alınmıştır. Düzenli Depolama Alanı'nda ortalama 3500 ton/gün katı atık depolanmaktadır. Avrupa yakasında bulunan Odayeri Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi'nde 1995'den bu yana hizmet vermektedir. Bu tesis ortalama 8000 ton/gün katı atık depolanmaktadır. Bu tesisin ilave saha taleplerindeki olumsuz gelişmeler nedeniyle 4 yıl daha kullanılabileceği düşünülmektedir (Öztürk v.d, 2007). İstanbul'da oluşan organik atıklar ise İstanbul Kemirburgaz'da kurulan 2001 sonu itibariyle işletmeye alınan kompost tesisine gelmektedir (Öztürk v.d, 2007). Tesisin kapasitesi 1000 ton/gün dür. Tesise ortalama 600 ton/gün katı atık kabulü gerçekleştirilmektedir. Sisteme gelen atığın içerisindeki kağıt, plastik, metal, cam, vb. geri kazanılabilir maddeler ayıklanarak ekonomiye kazandırılmakta ve ortalama 2400 ton /ay; toprağı ıslah edici organik değeri ve su tutma kapasitesi yüksek olan kompost üretilmektedir. Kompost ve geri kazanım tesisi ayırma ünitesinden çıkan ve geri dönüştürülemeyen atıklardan RDF malzeme üretilmesi için tesiste 40 ton/gün ürün kapasiteli RDF tesisi kurulmuştur. Kompost tesisinin devreye alınması ile birlikte Odayeri Düzenli Depolama Tesisi'ne gelen katı atık miktarında takriben %10'a yakın bir azalma sağlanmıştır (Öztürk v.d.,2007).

#### **4.2 İstanbulda Atık Kompozisyonu ve Kalorifik Değer Çalışmaları**

Katı atıkların kompozisyonu; katı atık sahalarından numune alarak ya da madde akışı denilen bir ülkedeki üretilen veya ithal edilen mallar arasından kullanıldıktan sonra evsel katı atık niteliği taşıyacak olanlar tespit edilerek belirlenebilir (Aykol,2008).Bu iki sistemin karşılaştırılması Çizelge 4.1' de görülmektedir.

**Çizelge 4.1 : Evsel katı atıkların kompozisyonunun belirlenmesi (Aykol,2008)**

Madde Akışı Yöntemi	Numune Alma Yöntemi
Evsel ve ticari bazı endüstriyel katı atıkların içeriğinin belirlenmesinde kullanılır.	Katı atık sahalarındaki atıkların içeriğinin belirlenmesinde kullanılır.
Bütün ülkenin katı atığının içeriğini gösterir.	Belirli bir alandaki katı atığın içeriğini gösterir.
Uzun bir zaman periyodu için yıllık değerler verir.	Sadece numune alındığı zamana ait bilgiler verir.
Katı atığın oluşumu için yıllık değer verir.	Yeterli numune alındığı taktirde mevsimsel değerler verir.
Bölgesel değişim göz önünde bulundurulmaz.	Bölgesel değişimler göz önünde bulundurulmuş olur.
İstatistiki bilgiler daha ucuz ve zahmetsizdir.	Çok sayıda ve farklı yerlerden numune almak pahalı ve zahmetlidir.

İstanbul’ da oluşan katı atıkların özelliklerinin belirlenmesi uygulanabilecek bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesi amacıyla atık karakterizasyon çalışmaları İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSTAÇ A.Ş. tarafından 2005, 2006 ve 2007 yıllarında yapılmıştır. İSTAÇ tarafından yapılan karakterizasyon çalışması kapsamında yürütülen faaliyetler aşağıda verilmiştir (Saltabaş ve diğ., 2010):

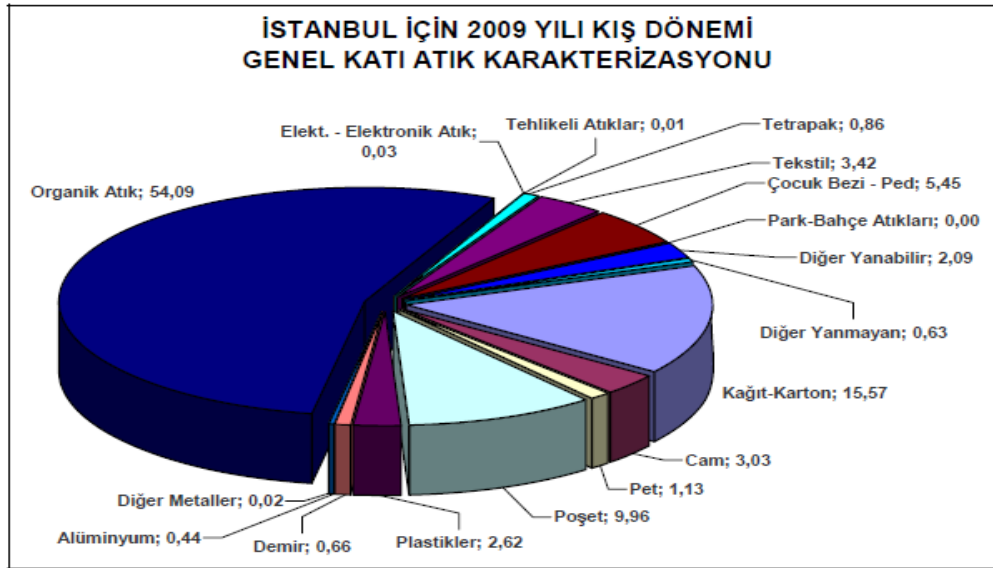
- İlçe belediyelerinden İstanbulda bulunan aktarma istasyonuna gelen atıklardan rasgele seçim metodu ile karışık kentsel katı atık numunesi alınması
- Alınan numunelerin, madde grup analiz çalışmasının yapılacağı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Kemerburgaz Geri Kazanım ve Kompostlaştırma Tesisine nakledilmesi
- Tesise getirilen karışık kentsel katı atığın belirlenen madde gruplarına göre ayrılarak tartımının yapılması
- Madde gruplarına göre ayrılan atıklardan laboratuvar analizi yapmak amacıyla belli miktarda numune alınması
- Laboratuvarda atıkların nem muhtevası ve kalorifik değer tayini analizlerinin yapılması.

Bu çalışma kapsamında aktarma istasyonlarından 7 günde toplam 42 atık numunesi alınmıştır. Numune miktarının ve toplama sıklığının belirlenmesinde her bir belediyenin ne kadar atık getirildiği göz önünde bulundurulmuş ve gelen atıkların geldiği ilçe ve mahalleler kayıt altına alınmıştır.

Araç içerisindeki atığı temsil edici nitelikteki atık, 770 lt kapasiteli HDPE çöp konteynirine doldurularak Kemerburgaz’da bulunan ATY Tesisi’ ne getirilmiştir.

Tesise getirilen atıklar sabit hacim kabına sıkıştırma yapılarak doldurulmuştur (Saltabaş ve diğ., 2010). Madde grup analiz çalışmasında, atıklar 17 ana bileşene ayrılarak tartılmış ve her bir madde grubunun atık içerisindeki ağırlıkça yüzdesi tespit edilmiştir bu değerlere göre atıklardan toplamda 3 kg olacak şekilde numune alınmıştır. Numune alınırken nem kaybını önlemek ve atığın karışmasını engellemek için organik malzeme ile bunun dışında kalan malzeme ayrı poşetlere konmuş daha sonra numunelere TS 10459/1992 Katı Atıklarda Rutubet Tayini standart yöntemine göre nem tayini yapılmıştır.

Kalorifik değer tespiti için, Alman Standardizasyon Kurumu'nun bomba kalorimetre ile katı yakıtların kalorifik değerinin ölçülmesi esasına dayanan DIN 51900 standardına göre analiz yapılmıştır. Ayrı olarak alınan organik malzeme ve ambalaj malzemelerinin kalorifik değerleri ayrı ayrı tespit edilmiştir. (Saltabaş v.d., 2010). Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.2' de görülmektedir.



**Şekil 4.2 :** İstanbulun 2009 yılı kış dönemi atık karakterizasyonu  
(Saltabaş ve diğ., 2010)

Kentsel atığın özellikleri yıllara ve bölgelere göre değişmektedir. İstanbul içinde çeşitli bölgelerde organik kısım artmakta kalorifik değer düşmektedir. Evsel atıklar içinde bulunan organik madde, kağıt, tekstil ve plastik atık miktarları artış gösterirken, metal atık miktarı ise azalmıştır. 2009 yılı mart ayında yapılan karakterizasyon sonucunda elde edilen atık kalorifik değerlerinin aktarma istasyonları bazında değerleri çizelge 4.2' de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 4.2 : Aktarma istasyonu bazında kalorifik değerler (Saltabaş ve diğ., 2010)**

Aktarma İstasyonu	Organik Kısım Alt Kalorifik Değer	Ambalaj atıkları Alt Kalorifik Değer	KKA Alt Kalorifik Değeri
Aydınlı	917	2167	1425
Küçükbakkalköy	462	3584	1644
Hekimbaşı	400	3327	1637
Baruthane	326	2508	1160
Halkalı	657	2736	1780
Yenibosna	243	3750	1669

Şekil 4.2’de de görüldüğü gibi İstanbul’daki atıklar yüksek oranda organik atık içeriğine sahiptir. Organik atıkların nem muhtevası yaklaşık %45 civarındadır. Atıkta nemin fazla bulunması atığın yanabilirliğini azaltan bir faktördür. İstanbul’da ilçelere göre atık karakterizasyonundaki değişiklikler İstanbul için uygulanacak termal bertaraf sisteminin yeri ve hangi semtlerden atık alınabileceği konusunda bilgi vermektedir. İstanbul için yapılan atık kalorifik değer ve karakterizasyon çalışmaları sonucunda 2009 yılı verileri ile başlanarak 2010 yılı verileri ve 2020 yılı içinse yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak öngörülen değerler kullanılmıştır.

Yapılması öngörülen yakma tesisi için yapılan hesaplamalarda Excel tabalı hazırlanan sayısal modelde kullanılan değerler Çizelge 4.3’ de görülmektedir. Gazlaştırma sistemi içinse kullanılan değerler Çizelge 4.4’ de görülmektedir.

**Çizelge 4.3 : Yakma analizinde kullanılan atık verileri**

	2010 Yılı öncesi Karışık atık	2010 yılı öncesi RDF	Karışık atık 2010	Karışık atık 2020	AKY
Beslenecek yakıt minimum ısıl değeri (LHV)(kcal/kg)	1500	2000	1960	≥ 2800	2776
Beslenecek yakıt miktarı(ton) - saatte	41,7	41,7	41,7	41,7	12,5
Nem İçeriği	%43	%39	%41	%30	%30

**Çizelge 4.4 : Gazlaştırma Sisteminde kullanılan atık özellikleri**

Beslenecek yakıt minimum ısıl değeri (LHV)(kcal/kg)	2776	2600
Beslenecek yakıt miktarı(ton) - saatte	12,5	11



## **5. İSTANBUL İÇİN ÖNERİLEN ATIK YAKMA VE GAZLAŞTIRMA SİSTEMLERİ**

### **5.1 Giriş**

Kentsel katı atıkların bertarafında hesaplamalar yapılırken Tchobanoglous ve Kreith (2003) çalışmalarındaki yakma analizi temel alınmıştır. Bu analizden yola çıkılarak yakma sistemlerinde; kütle, enerji dengesi ve enerji geri kazanım miktarlarını hesaplamak için Excel tabanlı model oluşturulmuştur. Gazlaştırma sistemi içinse mevcut model sonuçları irdelenmiştir.

Yakma sisteminde enerji geri kazanımının, elektrik üretmek ve konut ısıtmada kullanılmak üzere buhar üretilerek yapılması planlanmıştır. Bu amaçla önerilen her atık karakterizasyonu için enerji geri kazanım kısmında; elektrik üretiminde kullanılmak üzere 0,75 MPa ve 350°C, ısıtmada kullanılmak üzere 0,35 MPa ve 133 °C buhar üretimi yapıldığı kabul edilmiştir. Bu değerler elektrik ve ısı üretiminde kullanılacak sisteme göre değişiklik gösterebilmektedir. Seçilecek buhar özelliklerine bağlı olarak elektrik üretimi ve ısıtmada kullanılacak enerji miktarında değişmektedir. Bu çalışmada bu özelliklerin her sistemde aynı olduğu kabul edilmektedir.

Sistemde emisyon hesaplamaları yapılırken Avrupa Çevre Ajansı tarafından 2009 yılında yayınlanan Hava Kirletici Emisyonları El Kitabında bulunan, evsel atık yakma sistemlerinde oluşan kirleticiler için emisyon faktörleri kullanılmıştır. Buna göre baca gazı arıtma sistemlerinin verimleri göz önünde bulundurularak arıtma sistemi seçilmiş ve emisyonlar Yönetmelikteki limit değerlere uygun hale getirilmiştir.

Bu bağlamda bu bölümde İstanbul için 2010 yılı öncesi karışık atık ve atık kaynaklı yakıt, 2010 ve 2020 yılı içinse karışık atık verileri kullanılarak 4 farklı senaryo için yakma analizi sonuçları bulunmaktadır. Buna ilave olarak Gazlaştırma modelinde kullanılan atık özellikleri termal bertaraf sistemlerinin daha detaylı karşılaştırılabilmesi için yakma analizinde de kullanılmıştır.

## 5.2 Kütlesel Yakma Sistemi

İstanbul için yakma sisteminin uygulaması yapılırken örnek teşkil etmesi açısından 2010 yılı öncesi karışık kentsel atık özelliklerini temsil edici olarak Çizelde 4.3’de verilen atık özellikleri esas alınmıştır. Tipik atık yakma tesisi kapasitesi 1000ton/gün olacak şekilde planlanmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

### a) 2010 yılı öncesi karışık atık kalorifik değer verileri ile yakma model hesaplamaları

Sistemde yakılacak atığın özellikleri Çizelge 5.1’de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.1 : Atık Özellikleri**

Atığın Kütlesi(ton/saat)	41,7
Kalorifik Değer(Kcal/kg)	1500
Nem içeriği(%)	43
Kül İçeriği(%)	30

Atık yakma sistemlerinde sisteme giren atık ve atığın özelliğine göre kullanılan ek yakıt baca gazı, taban külü ve uçucu küle dönüşür. Atık yakma sistemlerinde kütle dengesi oluşturulurken önemli parametreler atığın kalorifik değeri nem ve kül muhtevasıdır. Bu özellikler dikkate alınarak sisteme verilmesi gereken hava miktarı ve oluşan gazın özellikleri belirlenir. Atık yakma sistemlerinde hava fazlalık katsayısı genellikle 1,5-2,5 arasında değişmektedir. Yakma sistemlerinde dioksin ve furan oluşumunu en düşük seviyede tutmak için fırın sıcaklığının yaklaşık 1000 °C olması gerekmektedir. Sistemde kabul edilen bu sıcaklık fırındaki gazın ulaşması gereken enerji içeriğini belirlemede de kullanılır. Sistemde kabul sıcaklığı verilen hava miktarından etkilenmektedir. Dolayısıyla enerjisi düşük atık yakılan sistemlere fazla hava verilmesi sistemin sıcaklığını buna bağlı olarak ulaşılması planlanan gazın enerji içeriğini düşürmektedir. Hava fazlalık katsayısı genellikle %100 olarak kabul edilmektedir. Ancak daha az hava fazlası kullanılarak sistemin kabul sıcaklığına ulaştığı durumlarda %100 hava fazlası ile işletmek sistemdeki sıcaklığın çok fazla düşmesine dolayısıyla ek yakıt ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bu yüzden çeşitli hava fazlası oranları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

1500 kcal/kg kalorifik değerli atık için sistemde %100 hava fazlalığı ile çalışıldığı kabul edilmiştir. Sistemde kütle dengesi hesapları aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

$$m_s = W_w * m_a \quad (5.1)$$

$$m_k = W_a * m_a \quad (5.2)$$

Burada;  $m_s$ ,  $m_k$ ,  $m_a$  sırasıyla atıktaki su, kül ve beslenen atık miktarını,  $W_w$  ve  $W_a$  sırasıyla atıkta bulunan su ve kül yüzdesini göstermektedir. Atıkta yanabilen kısım kuru kısım. Atığın yanabilen kısmı sistemdeki kuru kısım ile kül miktarının farkıdır. Dolayısıyla nem miktarının çok fazla olması atığın yanabilen kısmının azalmasına neden olmaktadır. Sistemdeki kül miktarı ise atıkla birlikte giren yanamayan maddeler ile (genelde %5 oranında) atığın yanması sonucu oluşan kül kısmıdır.

Bu kısım yakma ile ilgili literatür verilerinin incelendiği kısımda da bahsedildiği gibi yaklaşık %24 oranında taban külü ve %3,2 oranında hurda demirdir.

Atığın yanması sonucu sistemde kuru gaz ve su buharı oluşur. Sistemde oluşan kuru gaz ve buharın kütleli debilerinin bilinmesi; literatürde bulunan, çeşitli sıcaklıkta hava ve suyun entalpi değerleri kullanılarak gazın ulaştığı enerjinin belirlenmesi açısından önemlidir. Kuru gaz ve su buharı belirlenirken Çizelge 5.2'deki literatür verileri kullanılmıştır. Bu çizelgede belirli kalorifik değerlerdeki atıkların stokiyometrik oranda hava ile yanması sonucu, atığın kalorifik değeri başına oluşan su ve kuru gaz miktarlarını gösterilmektedir.

**Çizelge 5.2 :** Stokiyometrik yanmada atığın yanma karakteristikleri (Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Stokiyometrik yanmada atığın özellikleri			
Q(kcal)	Hava(kg/kcal)	Kuru gaz(kg/kcal)	H <sub>2</sub> O(kg/kcal)
1764	0,00128	0,00144	0,000101
2016	0,00126	0,00137	0,000106
2268	0,00124	0,00133	0,000110
2520	0,00123	0,00130	0,000112
2772	0,00122	0,00127	0,000115
3024	0,00121	0,00124	0,000117
3276	0,00120	0,00122	0,000119
3528	0,00119	0,00120	0,000121
3780	0,00119	0,00119	0,000123

Bu çizelgeden kalorifik değerlere göre atığın stokiyometrik oranda yanması için gerekli hava miktarı seçilmiştir. Çizelgede bulunan değerlerden 1500 kcal için yaklaşık bir değer tahmin edilmiştir. Sistemde yanma ürünleri olan kuru gaz ve su buharı kütleleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$m_g = n_g * Q \quad (5.3)$$

$$m_b = n_b * Q \quad (5.4)$$

Burada;  $m_g$  ve  $m_b$  sırasıyla yanma sonucu oluşan gaz ve buhar kütlesi,  $Q$  atığın kalorifik değeri,  $n_g$  ve  $n_b$  ise sırasıyla Çizelge 5.2’de ki veriler kullanılarak hesaplanan 1500kcal/kg kalorifik değerde atık için birim kalorifik değer başına oluşan gaz ve buhar kütleleridir.

Sistemde kullanılan hava fazlalığı ise yanabilen kısım ile yanma ürünlerinin farkıdır. Tasarladığımız yakma sistemi %100 hava fazlasıyla çalıştığı esas alınmıştır.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda hesaplanan kütle dengesi Şekil 5.1’ de görülmektedir.



**Şekil 5.1 :** Yakma sisteminde oluşan kütle dengesi

Kütle dengesindeki her bileşenin enerji içeriği hesaplanıp enerji dengesi oluşturulmuştur. Sistemdeki kül için ısı değeri hesaplanırken aşağıdaki formül esas alınmıştır;

$$Q = C_p(T - 60) \quad (5.5)$$

Bu formülde  $Q$ ; külün ısı değeri,  $C_p$ ; külün özgül ısısı,  $T$  ise desarj edildiği sıcaklıktır. Külün ısı değeri, sistemden 315 °C’de çıktığı ve özgül ısısının 0,14kcal/kg olduğu kabul edilerek hesaplanmıştır. Fırın içi ışımadan kaynaklanan kayıpları hesaplamak için Çizelge 5.3’de bulunan veriler kullanılmıştır. Sistemde enerji dengesi oluşturulurken yapılan kabuller yakma sistemi için önerilen diğer kalorifik değerler için de aynıdır. Bu çizelgede fırın içerisinde ulaşılan enerji miktarına göre sistemde radyasyondan kaynaklanan kayıp oranları bulunmaktadır. Fırın içerisinde oluşan enerji atığın kalorifik değeri ile belirlenir. Buna göre sisteme giren enerji;

$$Q_i = m_a * Q_a \quad (5.6)$$

$m_a$  = Atık Kütlesi

$Q_a$  = Atığın kalorifik değeri

Bu şekilde sistemde oluşan gazın enerji içeriği  $25,9 \times 10^4$  MJ/h olarak hesaplanmıştır. Sistemde fırın içerisinde radyasyondan kaynaklanan kayıp, enerji içeriğinin %1,5'u olarak Çizelge 5.3'den okunmuştur.

**Çizelge 5.3 :** Fırında radyasyondan kaynaklanan enerji kaybı (Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Fırındaki hız ( $10^3$ MJ/h)	Radyasyon kaybı(%)
<11	3,00%
16	2,75%
21	2,50%
26	2,00%
32	1,75%
>36	1,50%

Sistemde radyasyondan kaynaklanan kayıp, atılan külden kaynaklanan kayıplarla da dikkate alınarak oluşturulan enerji dengesi Çizelge 5.4 'de görülmektedir.

**Çizelge 5.4 :** Sistemde oluşan enerji dengesi

Girişteki enerji MJ/h	$25,9 \times 10^4$
Sistemdeki toplam kayıp MJ/h	$0,5 \times 10^4$
Çıkıştaki enerji MJ/h	$25,5 \times 10^4$

Çıkıştaki ısı içeriği fırında ulaşılan sıcaklığın belirlenmesinde kullanılır. Fırındaki sıcaklık belirlenirken ekte verilen Çizelge A.2'den faydalanılır. Hesaplanan enerji içeriğinin hangi sıcaklığa denk geldiği Çizelge A.1'den  $821$  °C olarak belirlenir.

Fırın içerisinde ulaşılan sıcaklığın yaklaşık  $1000$  °C olması istenmektedir. Bu durum baca gazında oluşacak dioksin ve furan emisyonlarını engellemektedir. Fırın içerisinde ulaşılan sıcaklık kabul sıcaklığından düşük olduğu için fırın içerisine ilave yakıt temini gerekmektedir. Ek yakıt miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$Q_n = Q_k - Q_g \quad (5.7)$$

$$m_y = Q_n / Q_y \quad (5.8)$$

Burada  $Q_n$ ,  $Q_k$ ,  $Q_g$ ,  $Q_y$  sırasıyla kabul sıcaklıktaki gazın enerjisi ile fırın içerisindeki gazın enerji içeriği arasındaki fark, kabul sıcaklıktaki gazın enerji içeriği, fırın içerisinde ulaşılan enerji içeriği ve Fuel Oil 6 için kalorifik değerdir.  $m_y$  ise kullanılması gereken ek yakıt miktarını göstermektedir.

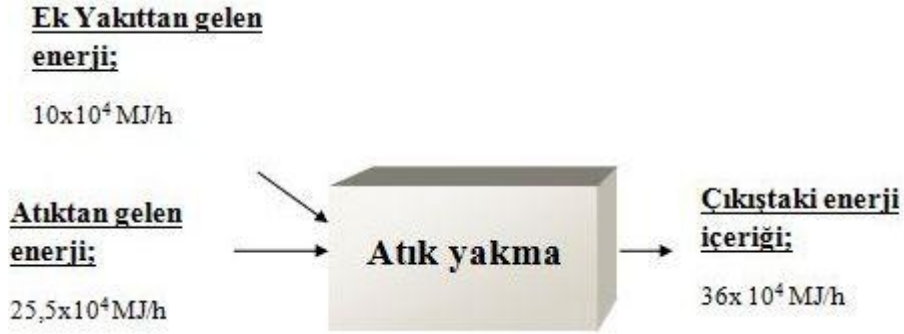
Bu şekilde kullanılması gereken ek yakıt miktarı  $2,25$  ton/sa olarak hesaplanmıştır.

Ek yakıt ilavesi ile sistemde oluşan yeni kütle dengesi Şekil 5.1' de görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.2 :** Ek yakıt ilavesi ile birlikte sistemde kütle dengesi

Ek yakıttan gelen enerji ile birlikte sistemde ulaşılan enerji dengesi ise Şekil 5.3' de görülmektedir.

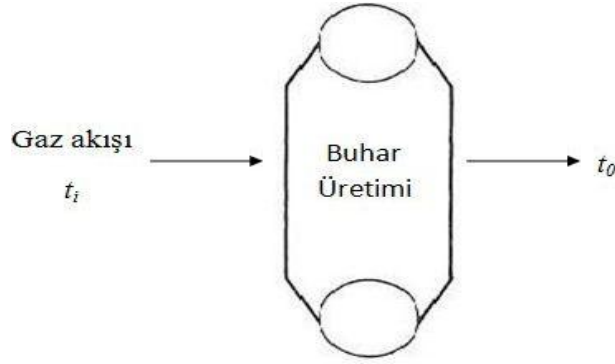


**Şekil 5.3 :** Ek yakıt ilavesi ile birlikte ısı dengesi

Sisteme ilave edilen ek yakıt sonucunda ulaşılan sıcaklık fırında oluşan gazın sıcaklığı belirlendiği şekilde  $1004 \text{ }^\circ\text{C}$  ve ulaşılan enerji içeriği  $36 \times 10^4 \text{ MJ}$  olarak belirlenmiştir.

Yakma sisteminde enerji geri kazanımı için atık ısı kazanında buhar üretilmesi planlanmıştır. Şekil 5.4'de görüldüğü üzere sistemden geçen gazın sıcaklığı  $t_1$  sistemin çıkışındaki gaz akımının sıcaklığı  $t_0$ 'dır. Her bir ısı değiştiricisi için  $t_x$  yaklaşım sıcaklığı mevcuttur. Bu sıcaklık çıkış gazının sıcaklığı ile ısıtılan su ya da buharın sıcaklığının ( $t$ ) farkına eşittir. Düşük yaklaşım sıcaklıkları ısı değiştiricilerin yüksek verimde çalıştığını göstermektedir.

Isı değiştiricinin ekonomik olması için yaklaşım sıcaklıkları genellikle  $40\text{-}70 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında kabul edilmektedir. Kazanın yaklaşım sıcaklığı  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak kabul edilmiş ve sistemde üretilen buhar miktarı bu verilere göre hesaplanmıştır.



**Şekil 5.4** : Atık ısı kazanı (Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Buhar üretimi yapılırken sistemde üretilen buharın yaklaşık 0,75 MPa basınç altında ve 350 °C kızgın buhar olduğu kabul edilmektedir. Buna göre çıkış gazının sıcaklığı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

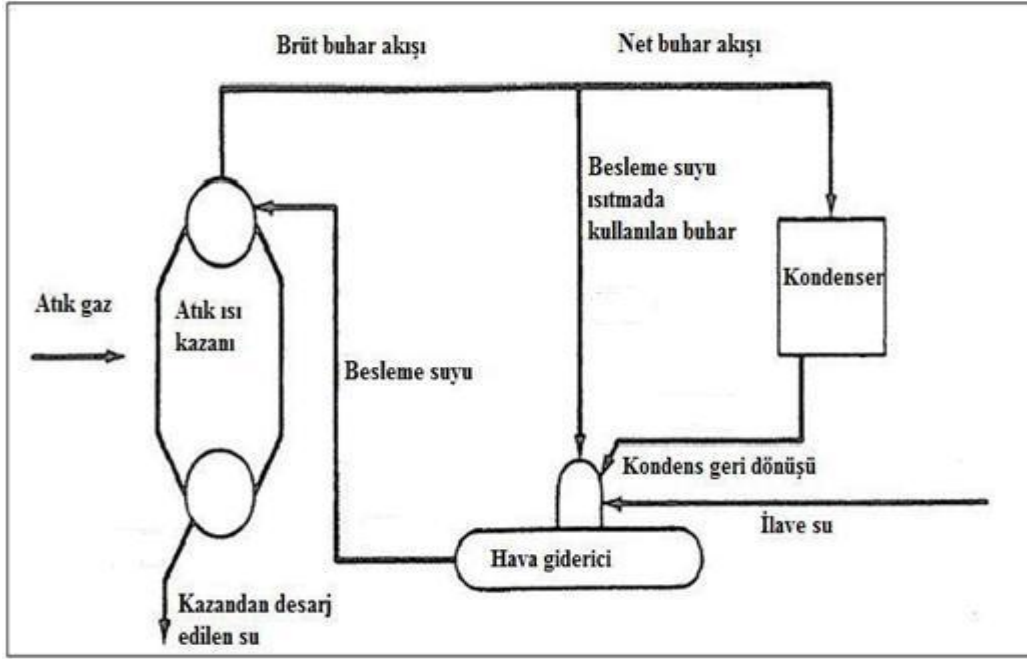
$$T_o = t_x + t \quad (5.9)$$

Burada  $T_o$ ,  $t_x$ ,  $t$  sırasıyla gazın kazandan çıkış sıcaklığı, yaklaşım sıcaklığı, üretilen buhar sıcaklığıdır. Buna göre sistemden çıkan gazın sıcaklığı 415 °C olarak hesaplanır.

Buhar üretimi için kullanılan enerji buhar kütlesinin hesaplanması açısından önemlidir. Bu enerji aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$Q_a = m_g \cdot (h_{G1} - h_{G2}) + m_b \cdot (h_{B1} - h_{B2}) \quad (5.10)$$

Burada  $m_g$  ve  $m_b$  sırasıyla kuru gaz ve buharın kütlesi,  $h_{G1}$ ,  $h_{G2}$ ,  $h_{B1}$ ,  $h_{B2}$  ise sırasıyla girişteki ve çıkıştaki sıcaklıklarda gaz ve buharın entalpi değerleridir. Buna göre buhar üretiminde kullanılan enerji  $16 \times 10^4$  MJ/sa olarak hesaplanmıştır. Buhar üretiminde buhar çevrimi Şekil 5.5’de ve bu çevrimde yapılan kabuller Çizelge 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.5 : Atık ısı kazanı ile buhar üretimi (Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Çizelge 5.5 : Buhar üretiminde yapılan kabuller

Kabuller	
1.	Kazandan deşarj edilen su miktarı besleme suyunun %4'ü olarak,
2.	Sisteme verilen besleme suyunun sıcaklığı 105 °C olarak,
3.	Sisteme dönen kondens miktarı üretilen buharın %20 si olarak,
4.	Hava gidericiye giren suyun sıcaklığı 15 °C olarak,
5.	Sistemde oluşabilecek mevcut kayıplar kazana giren toplam enerjinin %1 olarak kabul edilmiştir.

Bu kabuller göz önünde bulundurularak hesaplanan buhar kütleleri Çizelge 5.6'da görülmektedir.

Çizelge 5.6 : Üretilen buhar miktarları

Toplam üretilen buhar miktarı ton/saat	Net buhar miktarı ton/saat	Besleme suyu ısıtmak için kullanılan buhar miktarı ton/saat	Kondens olarak geri dönen kısım ton/saat
70	61	9	14

Üretilen buhar, buhar türbininde mekanik enerji elde edildikten sonra jeneratör vasıtasıyla direk olarak elektrik üretmede kullanılabilir. Ancak bu sistemlerde toplam verim %40 civarlarında olmaktadır. Buhar türbininin alçak basınç kademelerinden daha düşük sıcaklıklarda buharın çekilmesi ve bunun bölgesel ısıtmada kullanılması durumunda sistemde üretilen toplam elektrik enerjisi miktarı azalsada toplam verim mükemmel şartlarda %90'a kadar çıkabilmektedir. Sistemde üretilen buhar 0,75

MPa ve 350 °C kızgın buhardır. Bu buhardan elde edilecek enerjiyi kullanan çevrimin verimi %40 alınarak hesaplanmıştır. Sistemde üretilen buharın entalpi değerleri 350 C ve 0,75 MPa için kızgın buhar tablosundan, türbin çıkışındaki entalpi değeri ise yoğuşturucuya giren buharın basıncı 10kPa kabul edilerek buhar tablolarından okunmuştur.

$P_1$ : Pompaya giren su basıncı; 800kPa

$P_2$ :Pompadan çıkan buharın basıncı; 8kPa

$\eta_t$ : Türbinin verimi= 0,87

$\eta_p$ : Pompanın verimi= 0,85

$v$ : Doymuş sıvı özgül hacmi m<sup>3</sup>/kg (Pompaya giren suyun sıcaklığının 38 °C ve kPa basınca sahip olduğu kabul edilmiştir.)

$h_5-h_6$ :Türbine giren ve türbinden çıkan buharın entalpi farkları

Pompa işi  $W_p$ :  $\frac{v(P_2-P_1)}{\eta_p}=0,001008 \times (800-9)/0,85 =0,94$  kJ/kg

Türbin işi  $W_t$ =  $\eta_t(h_5-h_6) =911,76$  kJ/kg

Net iş  $W_{net}=W_t-W_p=910,82$

Sistemde elektrik üretiminde kullanılacak buhar net buhardır. Dolayısıyla santralde üretilen güç aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$\dot{W}_{net}=m_b W_{net}=61000\text{kg/saat} \times 910,82\text{kJ/kg}=11891\text{kW}$  (net iş=elektrik enerjisi)

Sistemde ton atık başına üretilen enerji 0,36 MWh/ton atık olarak hesaplanır. Tesisin baca gazı sıcaklığı elektrik üretmek amacıyla buhar elde edildikten sonra 415 °C'ye düşürülmektedir. Daha sonra önceki sistemlerde olduğu gibi 0,3 MPa basınçta 133,54 °C ısıtmada kullanılmak üzere buhar üretimi gerçekleştirilecektir. 415 °C'deki baca gazı 133,54 °C de buhar üretiminde kullandığında çıkış gazının sıcaklığı yaklaşık sıcaklığı 40 °C kabul edilerek 173,54 °C olarak hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak buhar üretmek amacıyla baca gazından alınan enerji miktarı aşağıdaki formül kullanılarak Çizelge 5.7' daki gibi hesaplanmıştır.

$$Q=m_g \times C_p \times \Delta t + m_b \times C_{p_b} \times \Delta t \quad (5.11)$$

Burada;

Q: Baca gazından alınan enerji

$M_g$ : Baca gazı kütleli debisi (kg/h)

$M_b$ : Baca gazı içerisindeki nem kütleli debisi (kg/h)

$C_p$ : Baca gazının özgül ısısı (kcal/kgC)

$C_{p_b}$ : Buharın özgül ısısı (kcal/kg C)

$\Delta t$ : Kazana giren gazın giriş ve çıkıştaki sıcaklık farkı (C)

Bu enerji istenilen özellikteki buharı Çizelge A.6' daki entalpi değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Buhar kütlesi hesaplanırken sistemde buhar miktarının %1 radyasyondan kaynaklı, %4 blöf oluşumu kaynaklı kayıp olduğu kabul edilerek ve aynı zamanda proseste buharın harcanmadığı endirekt ısıtma amaçlı kullanıldığı kabul edilerek aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$Q_b = h_b - h_s \quad (5.12)$$

$$m_b = Q/Q_b \quad (5.13)$$

Burada  $Q_b$  buhar üretiminde kullanılan ısıyı,  $h_b$ ,  $h_s$  sırasıyla doymuş buhar ve doymuş suyun entalpi değerlerini,  $m_b$  buharın kütlesini göstermektedir. Hesaplanan buhar kütlesi Çizelge 5.7' de görülmektedir.

**Çizelge 5.7** : 2010 öncesi Kentsel karışık atık yakma sistemi Atık ısı hesaplamaları

Atık Isı Kazanında Gazdan Alınan Isı MJ/h	$78 \times 10^3$
Buharlaşmada Kullanılan Isı MJ/h	$77 \times 10^3$
Üretilen Net Buhar Miktarı ton/h	34

Üretilen bu düşük basınç ve sıcaklıktaki buhar çeşitli proseslerde ısıtma amaçlı veya konut ısıtmada kullanılabilir. Üretilen buhar aynı zamanda yanma havasını ısıtmada da kullanılmaktadır. Buhar üretiminden sağlanabilecek enerji ise buharın kütlesinin, 133,54 °C ve 0,3MPa basınçtaki entalpi değerleri kullanılarak 0,62 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır.

Enerji geri kazanımının yakma sistemlerinde diğer bir avantajı baca gazı çıkış sıcaklığının ve soğutma suyu ihtiyacının azalmasını sağlamasıdır. Enerji geri kazanımı sonrası baca gazındaki enerji içeriği  $12 \times 10^4$  MJ/h 'e düşmüştür. Baca

gazındaki enerjinin düşmesi kullanılacak soğutma suyu miktarını da azaltmaktadır. Yapılan hesaplamalarda bacadan atmosfere verilen havanın sıcaklığının 60 °C olduğu kabul edilmiştir. Baca gazı sıcaklığını istenilen seviyeye düşürmek için sıcaklığı 15 °C olan soğutma suyu kullanılmaktadır. Kullanılan soğutma suyu miktarı belirlenirken çıkış gazının birim enerji içeriği kullanılarak bu gazın adyabatik sıcaklığı Ek A.1 deki Çizelge A.4 tablosundan belirlenir. Gazın birim enerji içeriği aşağıdaki şekilde bulunur.

$$Q_b = Q_o/m_g \quad (5.14)$$

Burada  $Q_b$ ,  $Q_o$ ,  $m_g$  sırasıyla gazın birim enerji içeriği, enerji geri kazanım sisteminden çıkan gazın enerji içeriği ve gaz kütlesidir. Bu şekilde gaz için birim enerji içeriği 214 kcal/kg olarak hesaplanmıştır. Bu değer için adyabatik sıcaklık Çizelge A.4 tablosundan 65 °C olarak belirlenir.

Bu çizelgede belirli sıcaklıktaki kuru gazın tutabileceği maksimum nem miktarları da bulunmaktadır. Sistemdeki doymuş su, nem ve soğutmada kullanılan su miktarları ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$m_{ds}=k_n*m_g \quad (5.15)$$

$$m_{ss}=m_b- m_{ds} \quad (5.16)$$

Burada  $m_{ds}$ ,  $m_g$ ,  $m_{ss}$ ,  $m_b$ ,  $k_n$  sırasıyla doymuş su, kütle dengesinde hesaplanan sistemde oluşan gaz miktarı, soğutma suyu miktarı, kütle dengesinde hesaplanan sistemde oluşan su buharı ve  $k_n$  ise nem katsayısıdır. Formül 5.15’de bulunan  $k_n$  Çizelge A.4’de sistemdeki gazın belirlenen adyabatik sıcaklığına karşılık gelen değerdir.(kg H<sub>2</sub>O/ kg gaz).

Bu şekilde hesaplanan soğutma suyu miktarı Çizelge 5.8’ de görülmektedir. Sistemde kullanılan suyun debisi ise 3,61 m<sup>3</sup>/dak olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.8 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarları**

Sisteme giren su ton/saat	<b>28</b>
Sistemde oluşan doymuş su ton/saat	<b>43</b>
Soğutmada kullanılan su ton/saat	<b>16</b>

Sistemde baca gazının debisinin belirlenmesi kirlenici emisyonların hesaplanması açısından önemlidir. 60 °C sıcaklığındaki çıkış gazı için Ek A.1 deki Çizelge A.4’den birim kuru gaz başına sistemdeki gaz hacmi sütunu kullanılarak çıkış gazının debisi 4472 m<sup>3</sup>/dak. olarak hesaplanır. Burada bacada 0,07 atm’lik fan basıncı olduğu düşünülmektedir. Atıkların termal yolla bertarafından kaynaklanan emisyonları hesaplamak için Avrupa Çevre Ajansı tarafından hazırlanan ve Çizelge 5.9 ‘da verilen emisyon faktörleri kullanılmıştır. Bu değerler 22.07.2006 Tarihli 26236 Sayılı Resmi Gazetede yayınlanan; Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde bulunan limitler ile karşılaştırılmıştır.

**Çizelge 5.9 :** Kütlelesel yakma için emisyon faktörleri (European Environment Agency, 2009)

Bileşen	Kütlelesel Yakma İçin Emisyon Faktörleri (kg/ton atık)
SO <sub>2</sub>	1,7
NO <sub>x</sub>	1,8
NMVOG	0,02
CO	0,2
HCl	3,2
PM	12,6
Pb	0,107
Cd	0,0055
Hg	0,0028

Her bir kirlenici için baca gazındaki konsantrasyonlar aşağıdaki şekilde belirlenerek oluşan kirlenici emisyonlar Çizelge 5.10’da gösterilmiştir.

$$\text{Kirlenici konsantrasyonu} = \text{Baca gazı debisi (m}^3\text{/ton atık)} * \text{Emisyon faktörü (kg/ton atık)}$$

**Çizelge 5.10 :** Oluşan kirlenici emisyonlar

Bileşenler	Kirlenici emisyon (mg/m <sup>3</sup> )	Kirlenici kütlelesel debileri (kg/saat)
Pb	17	4,46
Cd	0,85	0,23
Hg	0,44	0,11
HCl	497	133
SO <sub>2</sub>	264	71
NO <sub>x</sub>	280	75
CO	31	8,34
PM	1958	525

Atık yakma sisteminde atık kaynaklı emisyonlara ilave olarak ek yakıt kullanılması durumunda ek yakıtın özelliğine göre oluşan kirlenicilerde bulunmaktadır.

Bu emisyonları hesaplariken EPA tarafından belirlenen elektrik veya ısı üretmek amacıyla kullanılan yakıtlardan kaynaklanan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Çizelge 5.11’de kullanılan emisyon faktörleri bulunmaktadır.

**Çizelge 5.11** : Ek yakıt için emisyon faktörleri (European Environment Agency, 2009)

Kirlenici	Birim	Fuel oil 6
		Emisyon Faktörü
NO <sub>x</sub>	g/GJ	215
CO	g/GJ	5
NM VOC	g/GJ	0,8
SO <sub>x</sub>	g/GJ	485
PM	g/GJ	15
Pb	mg/GJ	4,9
Cd	mg/GJ	1,3
Hg	mg/GJ	0,4

Sistemde oluşturulan enerji dengesinde ek yakıttan kazanılan enerji de bilinmektedir. Yakıttan sağlanan enerji kullanılarak atık kaynaklı kirlenicilerde hesaplandığı şekilde konsantrasyonları belirlenerek elde edilen sonuçlar Çizelge 5.12 de görülmektedir.

**Çizelge 5.12** : Ek yakıttan kaynaklanan kirleniciler

Kirlenici	Fuel oil 6 g/m <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	5,45
CO	0,126
SO <sub>x</sub>	12,3
PM	0,38
Pb	0,00012
Cd	0,00003
Hg	0,00001

Kirlenicilerin kütleli debileri ise Çizelge 5.13’de görülmektedir.

**Çizelge 5.13** : Ek yakıttan kaynaklanan kirlenicilerin kütleli debisi

Kirlenici	Fuel oil 6 kg/saat
NO <sub>x</sub>	22,6
CO	0,5
SO <sub>x</sub>	50,9
PM	1,6
Pb	0,0005
Cd	0,00014
Hg	0,00004

Hesaplanan emisyonlar sistemde herhangi bir baca gazı arıtımı uygulanmadığı durumda oluşan emisyonlardır. Baca gazında bulunan emisyonları desarj limitlerine

uygun hale getirmek için asit gaz ve ağır metal giderimi ile partikül madde kontrolünün yapılması gereklidir. Bu amaçla %99,9 verimle çalışan bez filtre, asit gaz giderimi için de %90 verimle çalışan ıslak yıkayıcılar, azot oksit giderimi için ise %70 verimli katalitik indirgeyici sistemler kullanılabilir. Bu durumda sistemdeki emisyonlar ve Endüstri kaynaklı hava kirliliği kontrol yönetmeliğindeki limit değerlerle karşılaştırması Çizelge 5.14’de görülmektedir.

**Çizelge 5.14 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları ve limit değerleri**

Kirletici Emisyonlar	EKHKK Yönetmeliği Emisyon Limit Değerleri Kg/saat	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları kg/saat
Pb	0,5	0,0041
Cd	0,01	0,00018
Hg	-	0,00008
HCl	20	11,52
SO <sub>2</sub>	60	10,6
NO <sub>x</sub>	40	10
CO	500	3,3
PM	15	1,42

Tesislerden kaynaklanan emisyonların konsantrasyonları ise çizelge 5.15’de gösterilmektedir. Bu çizelgedeki değerler emisyonların Endüstriyel kaynaklı hava kirliliği kontrolü yönetmeliğinde bulunan limit değerler ile karşılaştırılması için değerler İdeal gaz denklemi ile ideal şartlara göre düzeltilmiştir.

**Çizelge 5.15 : Arıtma sonrası kirletici konsantrasyonları ve limit değerler**

Kirletici Emisyonlar	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları (mg/m <sup>3</sup> )	Yönetmelikteki Limit değerler (mg/Nm <sup>3</sup> )
Pb	0,0183	0,5
Cd	0,0009	0,5
Hg	0,0005	0,05
HCl	11,5	200
SO <sub>2</sub>	23,3	2000
NO <sub>x</sub>	92	200
CO	2,74	200
PM	2,15	150

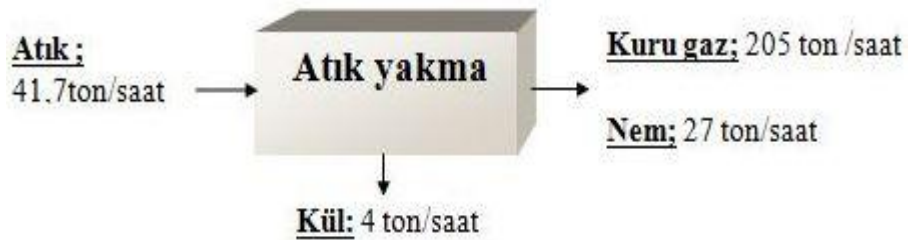
**b) 2010 yılı öncesi atık kaynaklı yakıt kalorifik değer verileri ile yakma model hesaplamaları**

Atık yakma analizinin 2010 yılı öncesi atık kaynaklı yakıt için yapıldığı durumda, sistemde kullanılan atık verileri Çizelge 5.16’ de görülmektedir.

**Çizelge 5.16 : 2010 yılı öncesi AKY kullanılan yakma sistemi verileri**

	AKY 2009
Beslenecek yakıt minimum ısı değeri (LHV) (kcal/kg)	2000
Beslenecek yakıt miktarı (ton/ saat)	41,7
Nem İçeriği	%39

2010 yılı öncesi atık kaynaklı yakıt yakıldığı sistemde çeşitli hava fazlalık katsayıları kullanılarak kütle ve enerji dengeleri hesaplanmıştır. Sistemde %100 hava fazlalığı kullanıldığında fırında gazın sıcaklığının yaklaşık 900 °C olduğu belirlenmiştir. Bu durumda sisteme ek yakıt ilavesiyle 1000 °C sıcaklığa ulaşmak gereklidir. Daha düşük hava fazlası katsayıları denendiğinde ise % 50 hava fazlası kullanıldığında sistemde sıcaklığın 1100 °C'lere çıktığı belirlenmiştir. Bu sıcaklık fırın içerisinde çeşitli mekanik problemlere ve bu gazın sıcaklığını atmosfere desarj etmeden önce düşürmek için kullanılan soğutma suyu miktarında ciddi artışlara sebep olmaktadır. Ancak sistem %80 hava fazlası kullanıldığında fırında baca gazı sıcaklığı yaklaşık 1000 °C olmaktadır. Böylece sistemde atıklar ek yakıt ilavesi olmadan yanabilmektedir. Dolayısıyla 2010 yılı öncesi atık kaynaklı yakıt yakıldığı durumlardaki hesaplamalar %80 hava fazlalığı kullanıldığı durum için yapılmıştır. Sistemdeki kütle dengesi oluşturulurken 1500kcal/kg'da hesaplandığı şekilde 2000 kcal/kg kalorifik değerde atığın yanması için gerekli stokiyometrik hava ihtiyacı belirlenmiştir. Sistemde %80 hava fazlası kullanıldığı için bu değer 1,8 katı alınmıştır. Sistemdeki kütle dengesi oluşturulurken nem ve gaz miktarları önceki hesaplamada olduğu şekilde yapılmıştır. Bunun sonucunda oluşturulan kütle dengesi Şekil 5.6'da ısı dengesi ise Çizelge 5.17'de görülmektedir.



**Şekil 5.6 : 2010 yılı öncesi AKY için kütle dengesi**

**Çizelge 5.17 : Sistemde ulaşılan ısı dengesi**

Girişteki enerji MJ/h	34,6x10 <sup>4</sup>
Sistemdeki toplam kayıp MJ/h	0,3x10 <sup>4</sup>
Çıkıştaki enerji MJ/h	34,3x10 <sup>4</sup>
Fırında ulaşılan sıcaklık °C	1004

Sistemde bir önceki hesaplamalarda olduğu gibi elektrik ve konut ısıtmada kullanılması amacıyla buhar üretimi yapılması düşünülmüştür. Bu durumda sistemde buhar üretiminde kullanılabilen enerji miktarı ve buhar özellikleri Çizelge 5.18’ de görülmektedir.

**Çizelge 5.18 : Buhar üretimi amacıyla kullanılacak enerji miktarı**

Girişte gazın ısı içeriği MJ/s	Girişte gazın sıcaklığı °C	Buhar basıncı MPa	Buhar Sıcaklığı °C	Kazandan Çıkan Gazın Sıcaklığı °C	Sıcaklık Farkı °C	Kullanılabilir ısı enerjisi MJ/s
34x 10 <sup>4</sup>	1004	0,7	350	433	571	16,9x10 <sup>4</sup>

Sistemde yapılan kabuller doğrultusunda hesaplanan buhar miktarları Çizelge 5.19’ de görülmektedir.

**Çizelge 5.19 : Üretilen buhar miktarları**

Toplam üretilen buhar miktarı ton/saat	Net buhar miktarı ton/saat	Besleme suyu ısıtmak için kullanılan buhar miktarı ton/saat	Kondens olarak geri dönen kısım ton/saat
64	57	8	13

Sistemde enerji üretimi daha önce hesaplandığı şekilde hesaplanmıştır. Bunun sonucunda sistemde üretilen güç 14421 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde atık başına üretilen enerji 0,34 MWh/ton atık olarak hesaplanır. Üretilen buhar özellikleri önceki hesaplamadaki değerlerle aynı kabul edilerek üretilen buhar miktarı hesaplanmıştır. Çizelge 5.20’ de ısıtmada kullanılmak üzere değerlendirilebilecek buhar miktarı bulunmaktadır.

**Çizelge 5.20 : 2010 yılı öncesi AKY yakma sistemi için atık ısı hesaplamaları**

Atık Isı Kazanında Gazdan Alınan Isı MJ/h	76x10 <sup>3</sup>
Buharlaşmada Kullanılan Isı MJ/h	75x10 <sup>3</sup>
Üretilen Net Buhar Miktarı ton/h	33

Buhar üretiminden sağlanabilecek enerji ise buharın kütlesinin ve 133,54 °C ve 0,3MPa basınçtaki entalpi değerleri kullanılarak 0,59 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır.

Baca gazı desarj edilmeden önce kullanılan soğutma suyu miktarları ise aynı kabuller yapılarak 60°C düşürecek şekilde hesaplanmıştır. Kullanılan atık özelliklerinde gazın adyabatik sıcaklığı sisteme giren ve soğutmada kullanılan su miktarları ve soğutma suyu debisi Çizelge 5.21’de görülmektedir.

**Çizelge 5.21 : Kullanılan soğutma suyu miktarları ve baca gazı debisi**

Gazın Adyabatik Sıcaklığı °C	Sisteme giren su ton/saat	Sistemde oluşan doymuş su ton/saat	Soğutmada kullanılan su ton/saat	Soğutma suyu debisi m <sup>3</sup> /dak	Baca gazı debisi m <sup>3</sup> /dak
65	27	37	7	1,55	4188

Atık kaynaklı yakıt için kullanılan emisyon faktörleri karışık atık için kullanılan faktörlerden farklıdır. Atık kaynaklı yakıt için kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 5.22’de görülmektedir.

**Çizelge 5.22 : AKY için kullanılan emisyon faktörleri European Environment Agency, 2009)**

Bileşen	Kütlesel Yakma İçin Emisyon Faktörleri (kg/ton atık)
SO <sub>2</sub>	2
NO <sub>x</sub>	2,5
CO	1
HCl	3,5
PM	34,8
Pb	0,1
Cd	0,0044
Hg	0,0028

Sistemde baca gazında oluşan kirlenici konsantrasyonu ve kirlenicilerin kütlesel debisi Çizelge 5.23’te görülmektedir.

**Çizelge 5.23 : Atık kaynaklı kirlenici emisyonlar**

	Kirlenici konsantrasyonları mg/m <sup>3</sup>	Kirlenici kütlesel debileri kg/saat
Pb	16	4,17
Cd	0,7	0,18
Hg	0,4	0,11
HCl	554	145
SO <sub>2</sub>	317	83
NO <sub>x</sub>	396	104
CO	158	41
PM	5507	1451

%80 hava fazlası kullanıldığı durumda atıklar ek yakıt ilavesi olmadan yandığından dolayı sistemde ek yakıt kaynaklı kirlenici bulunmamaktadır. Baca gazında bulunan emisyonları desarj limitlerine uygun hale getirmek için kullanılan baca gazı arıtma sistemleri önceki değer için kullanılan sistemlerle aynı olması durumunda emisyon değerleri ve bu kirlenicilerin Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kiriliğinin Kontrolü Yönetmeliğinde bulunan kütlesel emisyon limit değerleri Çizelge 5.24’ de görülmektedir

**Çizelge 5.24 :** Arıtma sonrası sistemdeki kirletici miktarı ve Sanayi kaynaklı hava kirliliği kontrolü yönetmeliğindeki limit değerleri

	Kirletici konsantrasyonları mg/m <sup>3</sup>	Emisyon Limit Değerleri kg/saat
Pb	0,004	0,5
Cd	0,00018	0,01
Hg	0,00011	-
HCl	4,35	20
SO <sub>2</sub>	6,64	60
Nox	8,32	40
CO	1,23	500
PM	1,45	15

Baca gazı kirletici konsantrasyonlarının yönetmelik değerleri ile karşılaştırılması için ideal şartlara göre hesaplanmış konsantrasyonları Çizelge 5.25 da görülmektedir.

**Çizelge 5.25 :** 2010 yılı öncesi AKY yakma sisteminde oluşan kirletici konsantrasyonları ve limit değerler

Kirletici Emisyonlar	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları mg/m <sup>3</sup>	Yönetmelikteki değerler Mg/m <sup>3</sup>
Pb	0,02	0,5 mg/m <sup>3</sup>
Cd	0,0008	0,5 mg/m <sup>3</sup>
Hg	0,0005	0,05 mg/m <sup>3</sup>
HCl	12,34	200 mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	28,21	2000 mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	35,26	200 mg/Nm <sup>3</sup>
CO	14,10	200 mg/Nm <sup>3</sup>
PM	6,13	150/Nm <sup>3</sup>

**c) 2010 yılı karışık kentsel atık kalorifik değer verileri ile yakma model hesaplamaları**

Atıkların yakılmasına ile ilgili hesaplamalarda 2010 yılı karışık kentsel atık verileride kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 5.26'da 2010 yılı için İstanbulda yapılan atık kompozisyon çalışması sonucu görülmektedir.

**Çizelge 5.26 : 2010 yılı karışık kentsel atık karakterizasyonu (İpek v.d., 2011)**

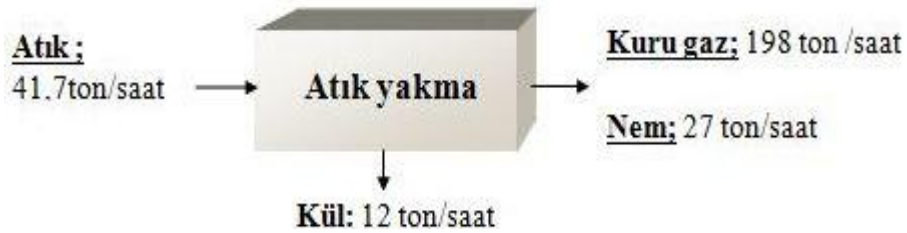
Bileşen	Avrupa Yakası %	Asya Yakası %
Kağıt- Karton	12,4±2,77	10,79±3,82
Cam	3,47±1,09	4,15±2,53
Pet	1,25±0,54	1,54±0,57
Poşet	9,77±1,12	9,43±1,79
Plastikler	2,3±0,57	2,39±0,84
Metaller	1,04±0,58	1,18±0,53
Organik Atık	51,09±4,28	49,72±5,81
Elekt.-Elektronik Atık	0,17±0,32	0,17±0,23
Tehlikeli Atıklar	0,33±0,38	0,3±0,26
Tetrapak	0,75±0,27	0,63±0,29
Tekstil	4,17±1,99	6,32±3,83
Çocuk Bezi	5,21±2,66	4,54±2,52
Park-Bahçe Atıkları	1,12±1,17	1,2±1,91
Diğer Yanabilir	5,31±2,8	6,48±2,58
Diğer Yanmayan	1,61±1,9	0,95±1,25

Bu karakterizasyon sonucunda İstanbul için ortalama üst ve alt kalorifik değer kalorifik değerler sırasıyla 3945±234 ve 1968±144 olarak elde edilmiştir. Anadolu yakasında (4129±194 ve 2139±129) bu değerler daha yüksek, Avrupa yakasında (3857±484 ve 1886±375) ise daha düşüktür. Bu değerler göz önünde bulundurularak hesaplamada kullanılan atık özellikleri Çizelge 5.27’de verilmiştir. (İpek v.d 2011)

**Çizelge 5.27 : 2010 yılı KKA için tasarlanan yakma sistemi verileri**

	KKA 2010
Beslenecek yakıt minimum ısı değeri (LHV)(kcal/kg)	1960
Beslenecek yakıt miktarı(ton) - saatte	41,7
Nem İçeriği	%41

Çizelge 5.27’deki veriler kullanılarak kütle ve enerji dengeleri hesaplanan sistem için kullanılan hava fazlası %70’dir. Sistem bu hava fazlalığı kullanıldığı durumda yeterli sıcaklığa ulaşmakta ve atıklar ek yakıt ilavesi olmadan yanabilmektedir. Sistemde oluşan kütle dengesi Şekil 5.7’de ısı dengesi Çizelge 5.28’de görülmektedir.



**Şekil 5.7 : 2010 yılı KKA yakılması sonucu oluşan kütle dengesi**

**Çizelge 5.28 : Sistemde oluşan ısı dengesi**

Girişteki enerji MJ/h	34,2x10 <sup>4</sup>
Sistemdeki toplam kayıp MJ/h	0,54x10 <sup>4</sup>
Çıkıştaki enerji MJ/h	33,6x10 <sup>4</sup>
Fırın içerisinde ulaşılan sıcaklık °C	1010

Buhar üretimi yapılırken sistemde aynı kabuller yapılarak kullanılabilir ısı enerjisi Çizelge 5.29'daki gibi hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.29 : Sistemde buhar üretmek amacıyla kullanılan enerji miktarı**

Girişte gazın ısı içeriği MJ/s	Girişte gazın sıcaklığı °C	Buhar basıncı MPa	Buhar Sıcaklığı °C	Kazandan Çıkan Gazın Sıcaklığı °C	Sıcaklık Farkı °C	Kullanılabilir ısı enerjisi MJ/s
33,6 x 10 <sup>4</sup>	1010	0,7	350	433	577	15x10 <sup>4</sup>

Sistemde buhar üretiminde önceki sistemlerde bulunan kabuller (Çizelge 5.7) yapılarak buhar miktarı Çizelge 5.30'daki gibi hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.30 : Üretilen buhar miktarları**

Toplam üretilen buhar miktarı ton/saat	Net buhar miktarı ton/saat	Besleme suyu ısıtmak için kullanılan buhar miktarı ton/saat	Kondens olarak geri dönen kısım ton/saat
62	54	7	12

Sistemde enerji üretimi daha önce hesaplandığı şekilde hesaplanmıştır. Bunun sonucunda Sistemde üretilen güç 13662,3 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde atık başına üretilen enerji 0,32MWh/ton atık olarak hesaplanır.

Sistemde baca gazı sıcaklığı elektrik üretmek amacıyla buhar elde edildikten sonra 433 C ye düşürülmektedir. Daha sonra önceki sistemlerde olduğu gibi 0,3 MPa basınçta 133,54 °C ısıtmada kullanılmak üzere buhar üretimi gerçekleştirilecektir. 433 °C deki baca gazını 133,54 °C de buhar üretiminde kullandığımız zaman çıkış gazının sıcaklığı yaklaşık sıcaklığı 40 °C kabul edilerek 173,54 °C olarak hesaplanmıştır. Bu veriler kullanılarak buhar üretmek amacıyla baca gazından alınan enerji miktarı aşağıdaki formül kullanılarak  $69 \times 10^3$  MJ/h olarak hesaplanmıştır.

Atık ısı hesaplaması yapılırken önceki sistemde yapılan kabuller aynı şekilde kabul edilerek yapılmıştır. Bunun sonucunda hesaplanan buhar miktarları Çizelge 5.31' de görülmektedir.

**Çizelge 5.31 : 2010 yılı KKA yakma sistemi için atık ısı hesaplamaları**

Buharlaşmada Kullanılan Isı (MJ/h)	68x10 <sup>3</sup>
Üretilecek Buhar Miktarı (ton/h)	32
Üretilen Net Buhar Miktarı (ton/h)	30

Buhar üretiminden sağlanabilecek enerji ise buharın kütlesinin ve belli sıcaklık ve basınçtaki entalpi değerleri kullanılarak 0,55 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır.

Sistemde baca gazı sıcaklığını düşürmek için kullanılan soğutma suyu miktarı önceki hesaplamalarda olduğu gibi hesaplanarak Çizelge 5.32’de verilmiştir. Sistemde kullanılan suyun debisi ise 3,53 m<sup>3</sup>/dak olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.32 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarı ve baca gazı debisi**

Sisteme giren su ton/saat	27
Sistemde oluşan doymuş su ton/saat	44
Soğutmada kullanılan su ton/saat	17
Soğutma suyu debisi m <sup>3</sup> /dak	3,53

Sistemde ton atık başına üretilen gaz debisi 4188 m<sup>3</sup>/ton atık olarak hesaplanmıştır. Bu değer ve Çizelge 5.9’daki emisyon faktörleri kullanılarak sistemde oluşan kirletici miktarları belirlenmektedir. Sistemde oluşan kirleticiler Çizelge 5.33’ de görülmektedir.

**Çizelge 5.33 : 2010 yılı KKA yakılması sonucu oluşan kirletici emisyonlar**

Kirletici emisyonlar	Baca gazındaki miktarları Mg/m <sup>3</sup>	Kirleticilerin kütleli debileri Kg/saat
Pb	17,7	4
Cd	0,9	0,23
Hg	0,46	0,12
HCl	531	133
SO <sub>2</sub>	282	71
NO <sub>x</sub>	298	75
CO	33	8
PM	2091	525

Baca gazında bulunan emisyonları desarj limitlerine uygun hale getirmek için çeşitli kontrol sistemleri kullanılmıştır. Bunlar; asit gaz ve ağır metal giderimi ve partikül madde kontrolü amacıyla %99,9 verimle çalışan bez filtre ve asit gaz giderimi içinde %92 verimle çalışan ıslak yıkayıcılar ve azot oksit giderimi için %70 verimde katalitik indirgeyidir. Bu arıtma tekniklerinin kullanılması durumunda emisyon değerleri ve bu kirleticilerin limit değerleri Çizelge 5.34’ de görülmektedir.

**Çizelge 5.34 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları ve limit değerleri**

Kirletici Emisyonlar	Emisyon Limit Değerleri Kg/saat	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları kg/saat
Pb	0,5	0,00002
Cd	0,01	0,0000009
Hg	-	0,0000005
HCl	20	3,4
SO <sub>2</sub>	60	1,81
NO <sub>x</sub>	40	1,91
CO	500	0,211
PM	15	0,0021

Kirleticilerin ideal şartlardaki konsantrasyonları ve yönetmelikteki limit değerler ise Çizelge 5.35’de bulunmaktadır.

**Çizelge 5.35 : Kirletici konsantrasyonları ve limit değerler**

Kirletici Emisyonlar	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları mg/m <sup>3</sup>	Yönetmelikteki değerler Mg/m <sup>3</sup>
Pb	0,0195	0,5
Cd	0,0010	0,5
Hg	0,0005	0,05
HCl	46,7361	200
SO <sub>2</sub>	24,8286	2000
NO <sub>x</sub>	98,5840	200
CO	2,9210	200
PM	2,3003	150

**d)2020 yılı karışık kentsel atık kalorifik değer verileri ile yakma model hesaplamaları**

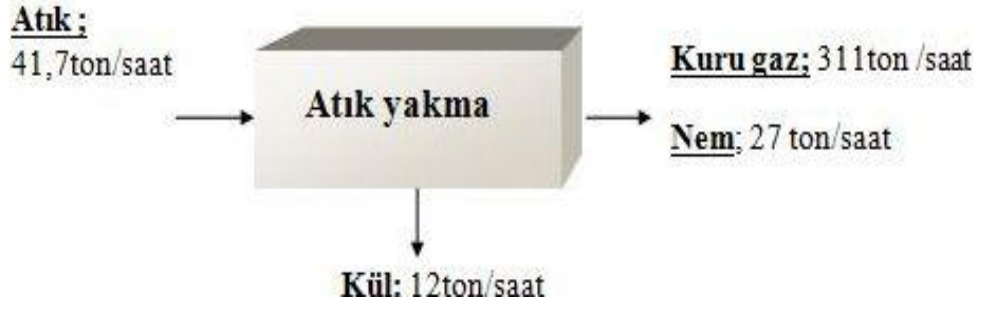
2020 yılı için İstanbuldaki atıkların 2800 kcal/kg kalorifik değere sahip olması beklenmektedir. Bu değer kullanılarak yakma tesisi için kütle ve enerji dengeleri oluşturulmuş ve bu karakterizasyonda atık kullanılan sistemlerde üretilebilecek elektrik enerjisi hesaplanmıştır.

Atık yakma sisteminde kullanılan atık özellikleri Çizelge 5.36’de görülmektedir.

**Çizelge 5.36 : Yakma sisteminde kullanılan atık verileri**

	KKA 2020
Beslenecek yakıt minimum ısı değeri (LHV)(kcal/kg)	2800
Beslenecek yakıt miktarı(ton) - saatte	41,7
Nem İçeriği	%30

Sistem %100 hava fazlası kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre sistemdeki kütle ve enerji dengesi Şekil 5.8 ve Çizelge 5.37 ‘de görülmektedir.



**Şekil 5.8 :** 2800 kcal/kg kalorifik değerinde atık için yakma sisteminde oluşan kütle dengesi

**Çizelge 5.37 :** Sistemde oluşan ısı dengesi

Girişteki enerji MJ/h	48,6x10 <sup>4</sup>
Sistemdeki toplam kayıp MJ/h	0,6x10 <sup>4</sup>
Çıkıştaki enerji MJ/h	48,1x10 <sup>4</sup>
Fırın içerisinde ulaşılan sıcaklık °C	1008

Sistemde fırında ulaşılmaması istenen sıcaklık 1000 °C olduğu için bu özellikteki atıklar ek yakıt ilavesi olmadan sistemde yanabilirler. Sistemde buhar üretiminde önceki sistemlerle aynı kabuller yapılmıştır. Sistemde buhar üretiminin yapılabilmesi için kullanılabilir enerji ve üretilen buhar miktarları Çizelge 5.38 ve Çizelge 5.39’da görülmektedir.

**Çizelge 5.38 :** Sistemde buhar üretmede kullanılacak enerji miktarı

Girişte gazın ısı içeriği MJ/s	Girişte gazın sıcaklığı °C	Buhar basıncı MPa	Buhar Sıcaklığı °C	Kazandan Çıkan Gazın Sıcaklığı °C	Sıcaklık Farkı °C	Kullanılabilir ısı enerjisi MJ/s
48,1x 10 <sup>4</sup>	1008	0,7	350	433	575	23,4x10 <sup>4</sup>

**Çizelge 5.39 :** Sistemde üretilen buhar miktarı

Toplam üretilen buhar miktarı ton/saat	Net buhar miktarı ton/saat	Besleme suyu ısıtmak için kullanılan buhar miktarı ton/saat	Kondens olarak geri dönen kısım ton/saat
95	84	11	40

Sistemde enerji üretimi daha önce hesaplandığı şekilde hesaplanmıştır. Bunun sonucunda Sistemde üretilen güç 21252 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde atık başına üretilen enerji 0,51 MWh/ton atık olarak hesaplanır.

Sistemde önceki hesaplamalardaki ile aynı kabuller yapılarak düşük basınç ve sıcaklıkta prosesde veya farklı endüstrilerde kullanılmak üzere kullanılacak buhar miktarı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda üretilen buhar miktarı Çizelge 5.40’ da görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.40 : 2020 yılı KKA yakma sistemi için atık ısı hesaplaması**

Buharlaşmada Kullanılan Isı (MJ/h)	98,71x10 <sup>3</sup>
Üretilen Net Buhar Miktarı (ton/h)	44

Buhar üretiminden sağlanabilecek enerji ise buharın kütesinin ve belli sıcaklık ve basınçtaki entalpi değerleri kullanılarak 0,76 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır

Sistemde baca gazını istenilen sıcaklığa düşürmek için kullanılan soğutma suyu miktarı ise Çizelge 5.41’de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.41 : Baca gazı soğutma suyu ve baca gazı debisi**

Gazın Adyabatik Sıcaklığı °C	Sisteme giren su ton/saat	Sistemde oluşan doymuş su ton/saat	Soğutmada kullanılan su ton/saat	Soğutma suyu debisi m <sup>3</sup> /dak	Baca gazı debisi m <sup>3</sup> /dak
61	27	53	25	0,5	7004

Sistemde emisyon hesaplamalarında karışık kentsel atık için daha önce kullanılan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Sistemde arıtma öncesi oluşan emisyonlar Çizelge 5.42’de görülmektedir.

**Çizelge 5.42 : Arıtma öncesi kirletici emisyonlar**

Kirletici Emisyonlar	Baca Gazındaki miktarları mg/m <sup>3</sup>	Kütlesel debileri
Pb	12,5	4,5
Cd	0,64	0,23
Hg	0,33	0,12
HCl	373,4	134
SO <sub>2</sub>	198,4	71
NO <sub>x</sub>	210,04	75
CO	23,34	8
PM	1470,6	529

Sistemde seçilen baca gazı arıtma sistemi önceki hesaplamalarda kullanılan baca gazı arıtım sistemleri seçilmesi durumunda çıkış baca gazında ulaşılan kirletici emisyonlar ise Çizelge 5.43’de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.43 : Arıtma sonrası baca gazı emisyonları**

Kirletici Emisyonlar	Baca gazındaki miktarları Kg/h	Emisyon Limit Değerleri Kg/saat
Pb	0,004494	0,5
Cd	0,000231	0,01
Hg	0,0001176	-
HCl	10,752	20
SO <sub>2</sub>	5,712	60
Nox	22,68	40
CO	0,672	500
PM	0,5292	15

Kirleticilerin ideal şartlardaki konsantrasyonları Çizelge 5.44' da görülmektedir.

**Çizelge 5.44 : Kirletici konsantrasyonları ve limit değerler**

Kirletici Emisyonlar	Arıtma sonrası baca gazı emisyonları mg/m <sup>3</sup>	Yönetmelikteki değerler Mg/m <sup>3</sup>
Pb	0,0137	0,5
Cd	0,0007	0,5
Hg	0,0004	0,05
HCl	12,3	200
SO <sub>2</sub>	17,5	2000
NO <sub>x</sub>	18,5	200
CO	2,05	200
PM	1,62	150

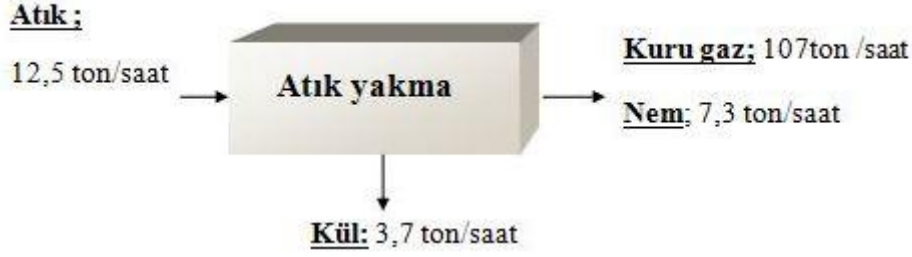
**a)2020 yılı karışık kentsel atık kalorifik değer verileri ile yakma model hesaplamaları**

Gazlaştırma modelinde kullanılan atık özellikleri yakma sisteminde de kullanılarak hesaplanamalar yapılmıştır. Kullanılan atık özellikleri ve tesisi kapasitesi Çizelge 5.45'te görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.45 : Yakma sisteminde kullanılan atık özellikleri**

	AKY
Beslenecek yakıt minimum ısı değeri (LHV)(kcal/kg)	2776
Beslenecek yakıt miktarı(ton) - saatte	12,5
Nem İçeriği	%21

Sistemde %100 hava fazlası kullanılarak oluşturulan kütle dengesi Şekil 5.9'da görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.9 :** Sistemde oluşan kütle dengesi

Sistemde girişteki ısı enerjisi ve sistemde oluşan kayıplarla hesaplanan ısı dengesi Çizelge 5.46’ de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.46 :** Sistemdeki ısı dengesi

Girişteki enerji MJ/h	$16 \times 10^4$
Sistemdeki toplam kayıp MJ/h	$0,4 \times 10^4$
Çıkıştaki enerji MJ/h	$15,6 \times 10^4$
Fırında ulaşılan sıcaklık C	1061

Sistemde bu enerji içeriğine sahip gaz 1061 °C’ye çıkmaktadır. Dolayısıyla sisteme ek yakıt ilavesi gerekmemektedir. Sistemde enerji üretmek amacıyla buhar üretimi yapıldığı kabul edilmiştir.. Buhar özellikleri önceki sistemlerdeki ile aynı kabul edilmiş ve buhar üretiminde kullanılabilir enerji Çizelge 5.47’de görülmektedir.

**Çizelge 5.47 :** Buhar üretiminde kullanılabilir enerji miktarı

Girişte gazın ısı içeriği MJ/s	Girişte gazın sıcaklığı °C	Buhar basıncı MPa	Buhar Sıcaklığı °C	Kazandan Çıkan Gazın Sıcaklığı °C	Sıcaklık Farkı °C	Kullanılabilir ısı enerjisi MJ/s
$15,6 \times 10^4$	1061	0,7	350	433	628	$8 \times 10^4$

Sistemde üretilen buhar miktarı ise Çizelge 5.48’ daki gibidir.

**Çizelge 5.48 :** Üretilen buhar miktarı

Toplam üretilen buhar miktarı ton/saat	Net buhar miktarı ton/saat	Besleme suyu ısıtmak için kullanılan buhar miktarı ton/saat	Kondens olarak geri dönen kısım ton/saat
33	29	4	7

Sistemde enerji üretimi daha önce hesaplandığı şekilde hesaplanmıştır. Bunun sonucunda Sistemde üretilen güç 7337 kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde atık başına üretilen enerji 0,58 MWh/ton atık olarak hesaplanır. Sistemde önceki hesaplamalarda olduğu gibi düşük basınç ve sıcaklıkta buhar üretimi gerçekleştirildiğinde proses ısıtmada veya çeşitli endüstrilerde kullanılmak üzere üretilen buhar miktarı çizelge 5.49’deki gibi hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.49 : AKY yakma için atık ısıdan üretilen buhar miktarı**

Buharlaşmada Kullanılan Isı MJ/h	35x10 <sup>3</sup>
Üretilen Net Buhar Miktarı ton/h	15,5

Buhar üretiminden sağlanabilecek enerji ise buharın kütlesinin ve 133,5 °C ve 0,3 MPa basınçtaki entalpi değerleri kullanılarak 0,96 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır.

Sistemde baca gazını atmosfere desarj etmek için 50 °C'ye kadar düşürüleceği kabul edilerek kullanılan soğutma suyu miktarı ise Çizelge 5.50'de görüldüğü gibidir.

**Çizelge 5.50 : Sistemde kullanılan soğutma suyu miktarı ve baca gazı debisi**

Gazın Adyabatik Sıcaklığı °C	Sisteme giren su ton/saat	Sistemde oluşan doymuş su ton/saat	Soğutmada kullanılan su ton/saat	Soğutma suyu debisi m <sup>3</sup> /dak	Baca gazı debisi m <sup>3</sup> /dak
58	7	14	7	0,12	2000

Atık kaynaklı yakıt için hesaplanan arıtma öncesi kirleticilerin saatlik kütledebileri ve baca gazındaki konsantrasyonları Çizelge 5.51'de görülmektedir.

**Çizelge 5.51 : Arıtma öncesi baca gazı kirleticileri**

Kirletici Emisyonlar	Baca Gazındaki miktarları mg/m <sup>3</sup>	Kütledebileri Kg/saat
Pb	43	1,34
Cd	2	0,07
Hg	1,15	0,035
HCl	1310	40
SO <sub>2</sub>	696	21,25
NO <sub>x</sub>	737	22,5
CO	81,89	2,5
PM	5159,16	157,5

Önceki yakma analizi hesaplamalarda kullanılan baca gazı arıtma sistemleri kullanılması durumunda çıkış gazındaki kirletici miktarları ve Endüstriyel Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde verilen limit değerler Çizelge 5.52'deki gibidir.

**Çizelge 5.52 :** Arıtma sonrası baca gazında kalan kirletici emisyonlar ve yönetmelik limit değerleri

Kirletici Emisyonlar	Baca Gazındaki miktarları Kg/saat	Yönetmelikteki değerler Kg/h
Pb	0,012	0,5
Cd	0,001	0,01
Hg	0,0003	-
HCl	11,20	20
SO <sub>2</sub>	15,89	60
Nox	16,80	40
CO	1,87	500
PM	1,47	15

Arıtma sonrası baca gazı emisyonlarının konsantrasyonlarının ideal gaz denklemine göre düzenlenmiş hali ve Endüstri Tesislerinden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliğinden alınan limit değerlerle karşılaştırılması ise Çizelge 5.53’de görülmektedir.

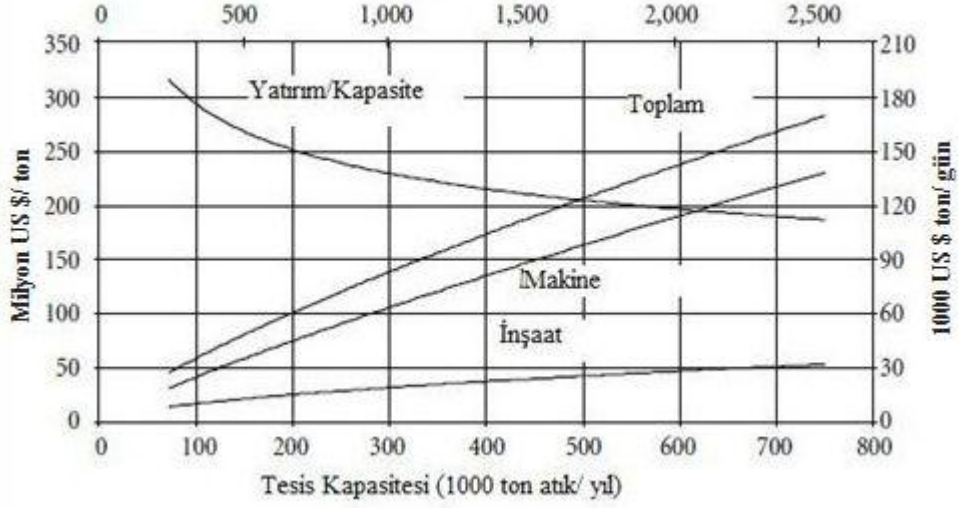
**Çizelge 5.53 :** Arıtma sonrası baca gazında kalan kirletici emisyonlar ve yönetmelik limit değerleri

Kirletici Emisyonlar	Baca Gazındaki miktarları mg/m <sup>3</sup>	Yönetmelikteki değerler Mg/m <sup>3</sup>
Pb	0,0482	0,5
Cd	0,0025	0,5
Hg	0,0013	0,05
HCl	43	200
SO <sub>2</sub>	61	2000
Nox	65	200
CO	7	200
PM	6	150

### 5.2.1 Atık yakmada maliyet analizi

Atık yakma tesislerinde maliyet diğer bertaraf yöntemleriyle (düzenli depolama) karşılaştırıldığında daha yüksek olmaktadır. 1998 yılı itibariyle Amerikada tesisin büyüklüğü, bölgedeki enerji satışından sağlanan gelire göre net arıtma maliyeti \$25-\$100 arası değişmekte ortalama \$50’ dır. Bu fiyat düzenli depolama alanları için \$10-\$40 olarak belirlenmiştir. Atık bertaraf sistemlerinde sistemin pahalı olması planlama aşamasında oldukça kritik bir konudur. Sistemin tasarlanan şekilde işletilememesinin yol açabileceği kayıpların engellenmesi için atık özelliklerinin ve sistemin her elemanının detaylı bir çalışma sonucu belirlenmesi gereklidir. Atık yakmada maliyet analizi pek çok faktöre bağlıdır. Bunlar yılda ya da günde yakılan atık miktarı, atığın kalorifik değeridir. Düşük kapasiteli tesislerde maliyet yüksek

kapasiteli tesislere göre daha fazla olmaktadır. .sistemde kullanılacak olan ekipmanın maliyetleri ise seçilen enerji geri kazanım sistemine göre değişmektedir. Bu çalışmada tasarlanan sistemler orta düzeyde baca gazı arıtımı içeren, buhar üretimini gerçekleştirmek amacıyla buhar türbini ve baca gazı arıtma için gerekli ekipmanları içeren 1000ton/gün kapasiteli tesistir. Bu sistem için ilk yatırım maliyeti şekil 5.10 den okunduğu gibi  $140 \times 10^6$  \$'dır.



**Şekil 5.10 : Yatırım maliyetleri (The World Bank,1999)**

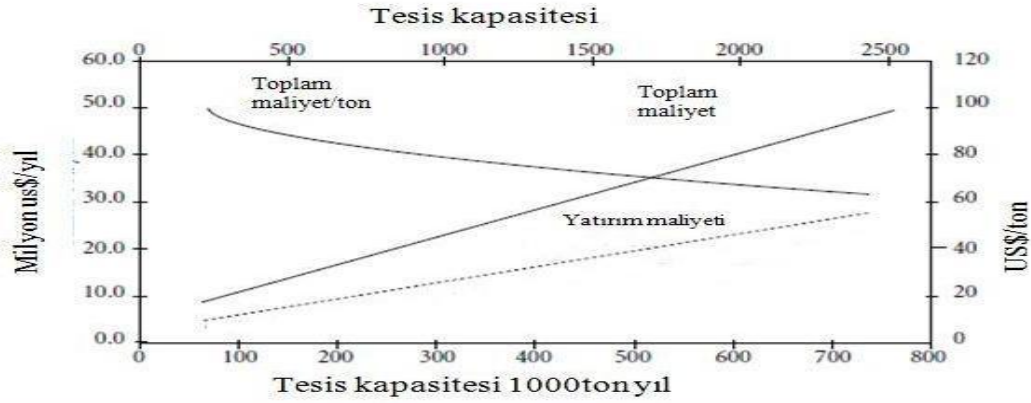
Yıllık yatırım maliyeti ise inşaat işleri toplam maliyetin %40ını mekanik ekipmanın ise ilk yatırım maliyetinin%60 ını oluşturduğu kabul edilerek aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

İnşaat işleri:  $0,40 \times 140 \times 10^6 \$ \times 0,10185 = 5700 \times 10^6 \$/yıl$

Mekanik ekipman ve teçhizat:  $0,60 \times 140 \times 10^6 \$ \times 0,14903 = 21519 \times 10^6 \$/yıl$  olmak üzere toplamda  $18219 \times 10^6 \$/yıl$  olarak hesaplanmıştır.

Ton/gün başına yatırım maliyeti ise;  $140 \times 10^6 \$ /1000t/gün = 14000\$/ton$ . gün'dür.

Yıllık işletme ve bakım maliyeti ise kül ve diğer istemeyen atıkların bertarafından kaynaklanan işletmeden kaynaklanan maliyettir. Bu hesaplamada ise işletme maliyeti ton başına Şekil 5.11'den görüldüğü gibi  $50\$/ton$ 'dur



**Şekil 5.11** : Yıllık atık yakma maliyeti (The World Bank, 1999)

Dolayısıyla işletme ve bakımdan kaynaklanan yıllık toplam maliyet;

$$50\$/\text{ton} \times 330000\text{ton}/\text{yıl} = 16,5 \times 10^6 \text{ \$ /yıl}$$

Taban külü bertarafı yaklaşık olarak ton başına 5\$ hava kirliliği kontrol sistemlerinden kaynaklanan atıklar için 100\$ diğer değişkenler işletme giderleri içinse ton başına 12\$ maliyet kabul edilmiştir. Bunun sonucunda; kül bertarafından kaynaklanan maliyet atığın %25 inin taban külü olarak çıktığı ve Katı madde oranının %60 olduğu kabul edilerek;

$$5\$/\text{ton} \times (0,25 \times 330000 \times 0,6) = 247500\$/\text{yıl} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Baca gazı arıtma sistemlerinden kaynaklanan maliyet ise aynı şekilde atığın %2,2' sinin filtre külü olarak çıktığı kabul edilerek;

$$100\$ \times (0,022 \times 330000 \times 0,6) = 435600\$/\text{yıl} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Sistemde diğer değişkenler için oluşabilecek ortalama maliyet 10\$ /ton atık kabul edildiğinde ise bundan kaynaklanan maliyet 3960000\$/yıldır.

Sistemdeki toplam işletme ve bakım maliyeti toplamda  $21 \times 10^6$  \$ /yıl olarak hesaplanır.

Atık yakma sistemlerinde satılan enerjiden ve düzenli depolama alanına gönderilen atık miktarının azaltılmasıyla gelir sağlanmaktadır. Enerji satışında üretilen enerjinin yarısı biyokütle kaynaklı kabul edilip teşvik kapsamında 0,133 \$ diğer yarısı ise 0,06 \$'a satıldığında elde edilen gelir, ton başına yaklaşık 500 kwh elektrik üretildiği düşünülürse;

$$500\text{kwh}/\text{ton} \times 330000 \times 0,19 \text{ \$/kwh} = 15,7 \times 10^6 \text{ \$ /yıl}$$

Daha az atık depolamadan kaynaklanan gelir ise düzenli depolama maliyeti 15 \$ /ton kabul edildiğinde;

$15 \text{ \$/ton} \times (330000-99000)=3,4 \times 10^6 \text{ \$ /yıl}$  olarak hesaplanır dolayısıyla net işletme maliyeti;

$21-15,7-3,4=1,9 \times 10^6 \text{ \$ /yıl}$

Yıllık toplam maliyet

$1,9 \times 10^6 + 18 \times 10^6 = 19,9 \times 10^6 \text{ \$ /yıl}$  olarak hesaplanır. İşlenen ton atık başına maliyet ise;  $19,9 \times 10^6 / 330000 = 60 \text{ \$/ton}$  atık olarak hesaplanır.

Termal bertaraf sistemlerinin içinde bulunduğu atık yönetim senaryosunda hane başına maliyet ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

Hane başına maliyet hesaplamasında İstanbul için kişi başı yıllık gelir yaklaşık olarak 20000\$/kişi yıl kabul edilmiştir. 4 kişilik hane için harcanabilir gelir toplam gelirin %60'ı ve Şekil 5.54' den senaryo 2a için kişi başı ortalama harcama ihtiyacı alınarak; termal bertarafın atık yönetiminin %80 lik kısmını oluşturduğu yönetim senaryosu için hane başına maliyeti;

$3 \text{ kişi/hane} \times 15000 \text{ \$ /kişi} \times 0,60 \times 0,05 = 180 \text{ \$/hane yıl} = 15 \text{ \$/hane ay}$  olarak hesaplanır.

Hesaplanan maliyete atık toplamadan kaynaklanan aylık maliyetin ilave edilmemiştir. Net maliyet hesaplanırken toplama maliyetinin eklenmesi ve hane başına alınan ÇTV vergisinin çıkarılması gereklidir.

**Çizelge 5.54 : Senaryolara göre kişi başı ortalama harcama ihtiyacı dağılımı(Öztürk,2010)**

Alt -Bölge	Ortalama kişi başı hanehalkı geliri/2003-2023 (%60*kişi başı GSYİH Milyon YTL/kişi/yıl)	Kişi Başı Ortalama Harcama İhtiyacı (Hanehalkı Geliri Yüzdesi %)				
		Senaryo 1a	Senaryo 1b	Senaryo 1c	Senaryo 2	Senaryo 2a
1a.İstanbul/İzmir	7.628	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%
1b.Diğer Büyükşehir Belediyeleri	8.549	0,30%	0,4%	0,3%	0,4%	0,4%
1c.Diğer Belediyeler	5.468	0,40%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
2a.Ankara	6.712	0,40%	0,4%	0,4%	0,6%	0,5%
2b.Antalya/İçel	5.744	0,60%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%
2c.Diğer Büyükşehir Belediyeleri	4.671	0,60%	0,6%	0,6%	0,7%	0,6%
2d.Karadeniz'deki Diğer Belediyeler	4.028	0,40%	0,4%	0,6%	0,4%	0,5%
2e.Diğer Belediyeler	3.761	0,50%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%
3a.Gaziantep	3.920	0,70%	0,7%	0,7%	0,1%	0,8%
3b.Diğer Büyükşehir Belediyeleri	2.954	0,90%	0,9%	0,9%	1,2%	0,9%
3c.Diğer Belediyeler	2.446	0,60%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%

### 5.3 Gazlaştırma Sistemi Sonuçları

Gazlaştırma sistemi için mevcut program kullanılmıştır. Bu model çeşitli kalorifik değer, su muhtevasına sahip atıklar gazlaştırılmıştır ve sonunda açığa çıkan sentez gazın enerjisi belirlenmiştir. Ekte verilen Çizelge A1'de çeşitli özellikte ve kütlede atıklar için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen model sonuçları görülmektedir.

Gazlaştırma sistemlerinde yakma sistemlerine göre daha düşük nem muhtevası olan atıklar kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu sistemlerde atık öncelikle termal kurutma sistemleriyle kurutulmuş nemi azaltılmaktadır.

Atık yakma analizinde kullanılan Çizelge 5.45' deki atık özellikleri gazlaştırma modelinde de kullanılarak sonuçları incelenmiştir. Bunun sonucunda oluşan kütle dengesi şekil 5.12' de görülmektedir.



**Şekil 5.12** : Gazlaştırma sisteminde oluşan kütle dengesi

Bu sistemde gazlaştırma sisteminde %93 saflıkta oksijen verilmektedir. Verilen oksijen miktarı 3,8 ton/saattir. Sistemde oluşan sentez gaz yakma sistemine oranla oldukça düşük miktardadır. Sistem saf oksijenle çalıştığı için oluşan baca gazı miktarıda oldukça azdır buna karşın oluşan sentez gazın kalorifik değeri ise yüksektir. Sistemde ek yakıt ilavesi gerekmemektedir. Sisteme hava verilmesi durumunda oluşan sentez gazın enerji içeriği düşmekte ve daha yüksek debilerde baca gazı oluşmaktadır. Gazlaştırma sistemlerinde basit çevrim ve kombine çevrim kullanılmaktadır. Basit çevrimde yakma sistemlerinde olduğu gibi sıcak gaz buhar üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde enerji elde etmede sağlanan verim kombine çevrimlere kıyasla daha düşüktür. Kullanılan modelde elektrik üretiminin kombine çevrimle sağlandığı durumlar için hesaplamalar yapılmıştır. Bu sistemde gazlaştırma verimi %63 olarak verilmektedir. Kombine çevrimde reaktörden çıkan ham sentezgaz temizlendikten sonra gaz motorlarına gönderilmektedir. Çeşitli proseslerden geçtikten sonra gaz motorlarına gönderilen sentez gazın kütleli debisi 10ton/saat ve ihtiva ettiği enerji 2100 kcal/kg 'dır. Gaz türbinlerinden alınan enerji 7,02 MW olarak verilmiştir.

Reaktörden çıkan ham sentez gazın sıcaklığı 982 °C'dir. Sentez gazın soğutulmasıyla kazanılan enerji 1,36 MW olarak hesaplanmıştır. Gaz türbinin egzoz gazları kullanılarak üretilen buhardan alınan enerji ise 3,87 MW olarak verilmiştir. Toplamda tesiste üretilen enerji 10,89 MW'tır. Sistemde ton başına elde edilen enerji 0,87 MW olarak hesaplanmıştır.

Ancak gazlaştırma sistemlerinde sentez gaz temizlemeden, reaktörde bulunan torchlardan saf oksijen tesisinden kaynaklanan kayıplar bulunmaktadır. Bunlardan kaynaklanan toplam kayıp 3,89 MW olarak verilmiştir. Dolayısıyla sistemdeki net enerji üretimi 7 MW ton başına enerji üretimi ise; 0,56 MWh/ton atık olarak hesaplanmıştır.

#### 5.4 Termal Bertaraf Seçeneklerinin Karşılaştırılması

İstanbul için düzenli depolama alanları uzun vadede artan atık miktarı için en uygun çözüm olmaktan çıkmaktadır. Büyükşehirlerde yapılması öngörülen termal bertaraf teknikleri oluşan atık sorununu gidermede büyük oranda çözüm getirecektir. Buna karşın termal bertaraf sistemleri yapılış durumunda detaylı fizibilite çalışmaları gerektiren sistemlerdir. Bu sistemlerin gerekli koşullar sağlanmadığı takdirde ciddi mali kayıplara ve çevre açısından pek çok olumsuz duruma sebep olabileceği ortadadır.

Gazlaştırma sistemi yakma sistemine göre daha yeni bir teknoloji olmasına karşın evsel atık bertarafında kullanımı çok yaygın değildir. Gazlaştırma sisteminde aynı özellikteki atıktan daha fazla enerji kazanımı mümkün olmaktadır. Gazlaştırma sistemi stokiometrik oksijen oranının altında gerçekleştiği için sisteme daha az hava verilmesi sistemde daha düşük miktarda baca gazı oluşmaktadır. Gazlaştırma sisteminin özelliğine göre saf oksijenle beslenmesi durumunda çok daha düşük miktarlarda baca gazı oluşumu görülmektedir. Dolayısıyla baca gazı arıtma sistemlerinin kapasiteleri daha düşük olabilmektedir. Gazlaştırma sistemlerinde birçok teknolojiye atıklar reaktöre basınç altında beslenmektedir ancak yakma sistemlerinde böyle bir gereksinim yoktur. Gazlaştırma sistemlerinde atık beslemeden kaynaklanan hatalar reaktör içerisinde deformasyonlara sebep olabilmektedir. Bunun yanında sistemde oluşan kül inert yapıdadır tehlikeli atık olarak değerlendirilmemektedir.

Yakma teknolojisi ise evsel atık bertarafında yaygın olarak kullanılmakta olup atığın heterojen yapısına daha az duyarlı ve işletilmesi gazlaştırmaya kıyasla daha basit olan sistemlerdir.

Bu çalışmanın sonucunda İstanbul'da değişik kalorifik değer ve nem muhtevalarına sahip atıkların yakılması sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Gazlaştırma sisteminde kullanılan atık karakterizasyonları mevcut model kullanılması dolayısı ile sınırlıdır.

1.Ek yakıt ihtiyacı;

Atık yakma sistemlerinde ek yakıt ihtiyacı atıkların tasarladığımız sistem için kabul edilen 1000 °C sıcaklığa ulaşması için gereklidir. Atığın kalorifik değeri ve sisteme verilen hava ile ilgili olarak atığın 1000 °C'ye ulaşması kendiliğinden sağlanabilir.

Sistemde 1500 kcal/kg kalorifik değere sahip atık için çeşitli hava fazlalık oranları kullanılarak hesaplamalar yapılmış ancak %50 hava fazlalığı kullanıldığı durumda dahi sistem 1000 °C sıcaklığa ulaşamamıştır.

Diğer kalorifik değerler içinse çeşitli hava fazlalık oranları kullanıldığında 1000 °C sıcaklığa ek yakıt ilavesi olmadan ulaşıldığı görülmüştür. Çizelge 5.56' de görüldüğü gibi 1500 kcal/kg kalorifik değere sahip atık ek yakıt ilavesi saatte 2,8 tondur. Bu diğer sistemlere göre ilave maliyet demektir.

**Çizelge 5.55 : Kalorifik değerlere kullanılan hava fazlası ve ek yakıt miktarları**

Kalorifik Değer Kcal/kg	Ek yakıt ihtiyacı Ton/sa	Hava fazlalık oranları
1500	2,8	%100
1960	-	%70
2000	-	%80
2800	-	%100
2776	-	%100

Gazlaştırma sisteminde de 2776 kcal/kg kalorifik değerde atık ek yakıt kullanımı gerekmemektedir. Gazlaştırma sisteminde hava yerine %93 saflıkta oksijen kullanılmıştır. Sistemde oksijen kullanımı sisteme verilen oksitleyici kütlesini azaltmış aynı zamanda da çıkış baca gazı miktarının çok düşük olmasını sağlamıştır.

## 2.Sistemde üretilen ısı ve güç miktarı;

Atık yakma sistemlerinde temel amaç atığın hacmini küçültmek ve patojenleri gidermek olsada sistemde üretilen buharı enerji kaynağı olarak kullanmak mümkündür. Sistemde üretilen buharın sıcaklığı basıncı değiştiği zaman üretilen enerji miktarıda buna göre değişmektedir. Üretilen bu enerjinin satılması sistemde ton başına net üretim maliyetini büyük oranda etkilemektedir. Türkiyede biyokütle kaynaklı enerji yenilenebilir enerji kapsamında değerlendirilerek üretilen enerjinin yaklaşık olarak %50 si bu fiyatla satılabilmektedir. Atık yakma sistemlerinde atığın yaklaşık %50 sinin biyokütle kaynaklı olduğu düşünülürse üretilen enerjinin %50si yenilenebilir enerji kapsamında değerlendirilmelidir. Dolayısıyla üretilen ısı enerjisinin teşvik kapsamında değerlendirilen kısmı 4 ¢, diğer kısmı ise 2¢'ten satılmalıdır. Üretilen elektrik enerjisinin ise aynı şekilde %50 si 13,3¢ kalan kısmı ise 7¢'ten satıldığı kabul edilmiştir. Buna göre ton başına atıktan elde edilen gelir Çizelge 5.56'da görülmektedir.

**Çizelge 5.56 :** Yakma sisteminde üretilen enerji miktarları ve sağlanan gelir

Isıl değer kcal/kg	Birleşik ısı güç üretimi		
	Isı MWh/t	Güç MWh/t	Gelir US\$/t
1500	0,62	0,36	5,5
1960	0,55	0,32	4,9
2000	0,59	0,34	5,22
2800	0,76	0,51	7,45
2776	0,96	0,58	8,7

Elde edilen enerjinin yenilenebilir enerji teşviği kapsamında değerlendirilmediği durumda ise elde edilen gelir Çizelge 5.57’de görülmektedir.

**Çizelge 5.57 :** Üretilen enerjinin teşvik kapsamı dışında olması durumunda sağlanan gelir

Isıl değer kcal/kg	Birleşik ısı güç üretimi		
	Isı MWh/t	Güç MWh/t	Gelir US\$/t
1500	0,62	0,36	3,76
1960	0,55	0,32	3,34
2000	0,59	0,34	3,56
2800	0,76	0,51	5,09
2776	0,96	0,58	5,98

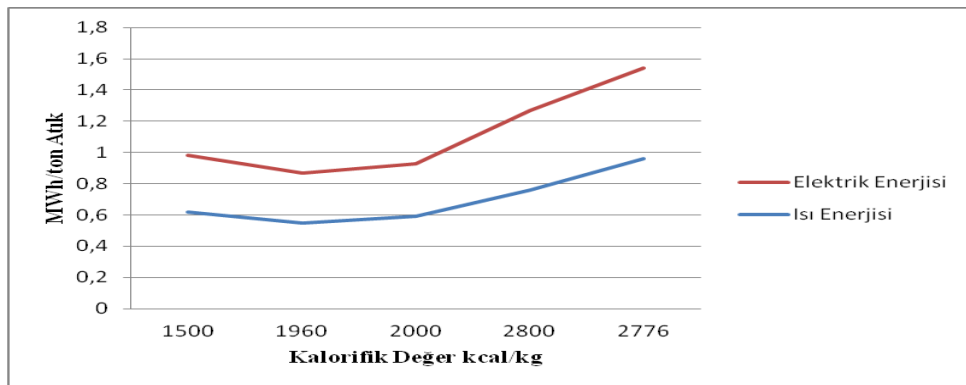
Gazlaştırma sistemlerinde ise 2776 kcal/kg kalorifik değerdeki atıktan toplam 11 MW elektrik enerjisi elde edilmektedir. Dolayısıyla ton başına enerji miktarı 0,88 MW ve sağlanan gelir ise 8,9 US\$/t olmaktadır. İlk yatırım maliyeti ise gazlaştırma sistemlerinde 1000 tonluk tesis için yaklaşık olarak 150 milyon \$’dır. Plazma reaktörlerinin kullanıldığı durumlarda ise maliyet daha fazla olmaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada İstanbul için, atık yönetimi master planlarında kurulması öngörülen termal bertaraf sistemleri için İSTAÇ tarafından yapılan 2010 öncesi, 2010 yılı verileri ile 2020 yılı için beklenen karakterizasyon verileri kullanılarak fizibilite analizleri yapılmıştır.

İstanbul için yapılan uygulama sonuçlarında da görüldüğü gibi, 2010 öncesi dönemde atığın nem muhtevasının fazla olması ve kalorifik değerinin düşük olması termal bertaraf sistemlerinde ek yakıt ilavesini gerekli kılmaktaydı. 2010 yılı atık karakterizasyon çalışması sonuçları ve 2020 yılı için öngörülen atık karakterizasyonları kullanıldığında ise karışık kentsel atıkların ek yakıt ilavesi olmaksızın bertaraf edilebilebileceğini göstermektedir.

Termal bertaraf sistemlerinde enerji geri kazanımı büyük önem arz etmektedir. Bu sistemlerde baca gazından en yüksek derecede enerji geri kazanımı sağlayan teknolojiler ve buna imkan veren atık özellikleri seçilmelidir. İstanbul için uygulanması düşünülen termal bertaraf sistemi için elektrik ve buharın birlikte üretildiği durum sistemin verimli olması açısından önemlidir. Aksi halde büyük miktarda enerjinin baca gazının soğutulup atmosfere verilmesi ile kaybedilmesi sözkonusudur. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi atığın kalorifik değerinin artması sistemden üretilen ısı ve güç miktarını artırmaktadır.



Şekil 6.1: Kalorifik değer ısı-güç ilişkisi

Grafikte 1500 kcal/kg kalorifik değerdeki atıktan yüksek miktarda enerji üretiminin ana sebebi sisteme ilave edilen ek yakıttan sağlanan enerjidir. Ancak ısıl değeri 1500 kcal/kg'dan büyü l diğer atıklardan üretilen enerjiler tamamen atık kaynaklıdır. Elde edilen enerjinin yenilenebilir teşvik kapsamında değerlendirilmesi durumunda kalorifik değeri ortalama 2000kcal/kg olan atık için yıllık elde edilebilecek olan gelir yaklaşık olarak 1,774.800 US\$ teşvik kapsamında değerlendirilmemesi durumunda ise 1,210.400 US\$ olarak hesaplanmıştır.

Gazlaştırma sistemi, yakma sistemine göre daha düşük su muhtevalı atıklar ile çalışmaktadır. Dolayısıyla İstanbul genelinde oluşan atıkların ön işlemden geğirilmeden gazlaştırma teknolojisi ile bertarafı mümkün değildir. Ancak gazlaştırma sistemlerinde aynı özellik ve miktardaki atıktan daha fazla enerji üretmek mümkündür. Ayrıca gazlaştırma sistemlerinde düşük miktarda oluşan atık gaz, kullanılması gereken hava kirliliği kontrol sistemlerinin daha küçük kapasitelerde olmasını sağlamaktadır. Gazlaştırma sisteminin bir diğer avantajı ise işlem sonucunda oluşan külün inert yapıda olmasıdır. Dolayısıyla yakma prosesi sonucunda oluşan kül için tehlikeli atık bertaraf yöntemleri uygulanması gerekebilirken gazlaştırma sisteminde buna ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunun yanında gazlaştırma sistemleri yakma sistemlerine oranla evsel atık bertarafında daha az kullanılan ve atık bertaraf, besleme koşulları yakmaya göre daha kompleks sistemlerdir. Dolayısıyla işletme koşulları doğru sağlanamadığı takdirde gazlaştırma teknolojisinin, yakmaya oranla oluşturabileceği sorunların daha fazla olması muhtemeldir.

Atık gazlaştırma sistemlerinde atık çoğunlukla basınç altında bertaraf edilmektedir bu da uygulanacak olan sistemin işletilmesini daha karmaşık yapabilmektedir. Dünyada evsel atık bertarafında yaygın olarak kullanılan basınçsız çalışan teknolojiler; Envirotherm, Westinghuse Plasma, Thermoselect, PRM gazlaştırma teknolojileridir. Bunların dışında da gazlaştırma teknolojisi bulunmasına rağmen bu teknolojilerin kullanımı; bu sistemlerin kömürle atığın karıştırılmasını gerektirmesi, çok yüksek kapasiteli olması veya teknolojiyi üreten firmaların teknoloji satmak yerine ekipman ve sistem satmak arzusunda olmasından dolayı yatırım maliyetinin yüksek olması bu sistemlerin kullanımını sınırlamaktadır.

Gazlaştırma teknolojilerinden en yaygın olan sistemlerden biri olan Thermoselect evsel atıkların %100 bertaraf edilmesine yönelik olarak geliştirilmiş üstün bir

teknoloji olup Japonya’da çalışmakta olan 7 adet tesisi bulunmaktadır.

İstanbul Büyükşehir Belediyesi Atık Yönetimi Master planında termal bertaraf sistemlerinin, öngörülen tarihlerde işletmeye alınması durumunda ilk yıllarda atıkların kalorifik değerinin yüksek olduğu ilçelerden toplanan atıkların beslenmesi gerekecektir. İstanbul için hazırlanan Atık Yönetimi Master Planında esas alınan verilere göre ilçeler itibarı ile atık özellikleri Ek A.1’de bulunan Şekil A.1’ de görülmektedir.

Şekil A.1’de görüldüğü gibi Anadolu yakasında atıkların kalorifik değeri Avrupa yakasındaki atıklardan daha yüksektir. Kurulması düşünülen termal bertaraf tesisleri için atıkların bu bölgeden özellikle nem muhtevasının düşük, kalorifik değerinin yüksek olduğu Beykoz gibi ilçelerden toplanması sistemin ekonomik sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. Çekmeköy, Kadıköy gibi nem oranının yüksek olduğu bölgelerde ise atıklar ön kurutma gibi ön işlemler sonrasında termal yolla bertaraf edilebilir.

Avrupa yakasında düşük kalorifik değerli atıkların oluştuğu ilçelerde atıklar çeşitli ön işlemlerden geçirilerek termal yolla bertaraf edilebilir. Bunlar atığın termal yolla kurutulması veya karışık atığın  $\Phi 80$  mm elekten geçirilmesiyle içerisindeki kaba malzemelerin ayrılması sağlanır daha sonra elek altındaki kısım hızlı kompostlaştırmada 3 hafta süreyle tutulduğunda kalorifik değeri yaklaşık 2500kcal/kg’a getirilmekte ve termal yolla bertarafı mümkün yakıt haline dönüştürülmektedir. İstanbul geneli için düşünüldüğünde ise atıkların karakterizasyonu termal yolla bertaraf edilebilecek özelliktedir.

Ancak 4. Bölümde verilen 2009 yılı Aktarma istasyonları bazında kalorifik değer dağılımında göz önünde bulundurmak gerekirse ilçelerin atık verilerin değişkenliği dikkate alınarak bölgelerin atık karakterizasyonlarındaki değişimler için sağlıklı projeksiyonlar yapılmalıdır. Bu değerlendirmeler sonucunda işletmeye alınacak olan termal bertaraf sisteminin yeri ve özelliklerinin netleştirilmesi daha sağlıklı olacaktır.

Bu çalışmanın sonucunda İstanbul için termal bertaraf sistemlerinden yakma ve gazlaştırma sisteminin belirli ön koşullar altında uygulanabilirliği görülmektedir. Termal bertaraf sistemleri kalorifik değerinin yüksek olduğu semtlerden atık toplayarak işletmeye alınabilir.

Bunun yanında bazı ilçelerde büyük restoran ve kafelerden mutfak atıkları ayrı

toplanmak suretiye nem muhtevası atık herhangi bir ön işleme uğramadan yaklaşık %5 oranında azaltmak mümkündür.

Yakma sistemleri için maliyet analizinden de görüldüğü gibi önemli oranda atık sorununa çözüm getiren bu sistemler hane başına yansıtılan makul maliyetlerle yapılabilmektedir. Sonuç olarak kütleli yakma sistemi pek çok açıdan İstanbul için uygulanabilir özellikle bir bertaraf sistemi olarak görülmektedir. İstenilen özellikte atık temininin sürekliliği, seçilecek olan teknolojinin gerekli en uygun işletme koşullarında işletilmesi ve atık ısının mutlaka bölgesel ısıtmada kullanılması durumunda İstanbul'da kentsel katı atık sorununa büyük ölçüde çözüm getireceği görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akpınar, N., 2006.** Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Apaydın, O., 2008.** Katı atıklardan madde ve enerji kazanımı Lisansüstü Ders Notları
- Aykol, K., 2008.** *Evsel Katı Atıkların Geoteknik Modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., Napoli, R.M.A., 2003,** Energy from gasification of solid wastes, Waste Management.
- Bowen, B. H., Irwin M. W., 2006,** Coal Gasification & Fischer-Tropsch CCTR Basic Facts File #1, Purdue University
- Brunner, P.H., Morf, L. & Rechberger, H., 2004.** *Thermal waste treatment – a necessary element for sustainable waste management. In solid waste: Assessment, monitoring and remediation*, Elsevier, by I. Twardowska, H.E. Allen, A.F. Kettrup and W.J. Lacy, London, UK
- Büyükbektaş, F., Varınca, K., B., 2008.** Entegre Atık Yönetimi Kavramı ve AB Uyum Sürecinde Atık Çerçeve Yönetmeliği, İstanbul.
- CH2M Hill International Ltd., 2009.** Final Report: *Waste to energy review of Alternatives*.
- Çalık, Ö., 2011,** *Kojenerasyon Enerji Tesislerinde Bölgesel Isıtma, 17. Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı Konferansı '11*, İstanbul
- Doğru, B., 2006.** Atık Yönetimi ile İlgili AB Direktifleri ve Türk Mevzuatına Aktarımları, İstanbul.
- Durmuşoğlu, E., 2006.** Katı Atıklar ve Kontrolü Lisans Ders Notları.
- ENVEST Planners Konsorsiyumu. (2005).** T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. Yüksek Maliyetli Çevre Yatırımlarının Planlanması için Teknik Yardım Projesi (EHCIP) Düzenli Depolama Direktifi'ne Özgü Yatırım Planı., Ankara
- Erdem, M.A., Çubukçu Ercan, E., Ateş, E., Erdoğan, D., 2008.** AB Uyum Sürecinde Evsel Katı Atıkların Entegre Yönetimi, Kent Yönetimi, *İnsan ve Çevre Sorunları '08 Sempozyumu* İstanbul.
- Erdem, M., A., Türkmen, M., Ercan, Çubukcu, E., 2010.** Türkiye'de Evsel Atık Yönetiminde Yakma Teknolojileri, İstanbul.
- Erdin, E.,** Katı Atık Ders Notları, İzmir.
- European Commission, 2006.a.** Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.

- European Commission, 2006.a. 2006.b** Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plant.
- European Environment Agency, 2009.** *Air pollutant emission inventory guidebook* Technical report No 9/2009.
- Güneş, S., 2009.** Atık ısıdan faydalanma ve özel bir fabrika uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gökçek ,Z., 2009.** Gazlaştırma Teknolojileri ile Atıklardan Katma Değer Üretimi,UMDE Gazlaştırma Teknolojileri Tanıtım Dosyası.
- İpek, U., Gören, S., Özkaya, B., Çapar, B., 2011.**İstanbul Büyükşehir Belediyesi Entegre Atık Yönetim Planı,
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi,2010.** *İstanbul Entegre Yakma Sistemleri Ön Çalışma Raporu*
- JBIC Pilot Study Team Japan Environmental Consultants Ltd.,2006** Pilot Study for Project Formation for Solid Waste Management Improvement Project in Turkey.
- Kaçar,Y.,1999.** Evsel Katı Atıklardan Yakma Prosesi İle Enerji Eldesi,*3.Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi* ,İzmir.
- Karaduman, B., Öztürk, İ., Özabalı A., Eriçyel, K., 2009.** Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Yönetim Planı, İstanbul.
- Karakaya, İ., 2008.** İstanbul İçin Stratejik Kentsel Katı Atık Yönetimi Yaklaşımı ,*Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kathiravale, S., Yunus, M. N. M., Sopian, K., Samsuddin ,A. H. , Rahman, R. A., 2003.** Modeling the heating value of Municipal Solid Waste, Fuel , 82, 1119-1125t.
- Kayalak, T.Ç., 2007.** Kırıkkale İlinin Evsel Katı Atıklarının Bertarafının Çevresel ve Ekonomik Boyutuyla İncelenmesi,*Yüksek Lisans Tezi*,Gazi Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Klein A. and Themelis N. J., 2003.** Energy Recovery from Municipal Solid Wastes by Gasification, *North American Waste to Energy Conference (NAWTEC 11)*11 Proceedings, ASME International, Tampa FL , p. 241-252, 2003.
- Kleis,H., Vølund B&W and Dalager,S. R.,2003.** 100 Years of Waste Incineration In Denmark.
- Klein, A., 2002,Gasification:** An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes, Columbia.
- Mahini,A., S., and Gholamalifard, M., 2006.** Siting MSW landfills with a weighted linear combination methodology in a GIS environment, Iran.
- Okutan,H., 2009.** Atıktan Enerjiye; Yakma, Piroлиз ve Gazlaştırma Uygulamaları, *5. Uluslararası Geri Dönüşüm, Çevre Teknolojileri ve Atık Yönetimi Fuarı*, İstanbul.
- Oymak, O.,Batu, A.,Akışkan Yataklı Kazanlar**
- Öztürk, İ., 2010.** *Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları*,İstanbul.

- Öztürk, İ., Demir, İ., Özabalı, A., Tezer, H., 2005** İstanbul İçin AB Çevre Mevzuatı ile Uyumlu Entegre Katı Atık Yönetimi Stratejik Planı.
- Öztürk, İ., Demir, İ., Akgül, H.O., Yıldız, Ş., Özabalı, A., Tezer, H.B., 2007.** İstanbul İçin AB ile Uyumlu Entegre Katı Atık Yönetimi Stratejik Planı, İstanbul.
- Philips, J., 2006** Different Types of Gasifiers and Their İntegration With Gas Turbines, In Handbook of Gas Turbines By National Energy Technology Labratory.
- Ratafia-Brown, J.A., Manfredo, L. M., Hoffmann, J.W., Ramezan, M., 2002.** An Environmental Assessment of IGCC Power Systems, Pittsburg.
- Renewable Energy Yearbook,1993.** Saint Quen II Incineration Plant ,France.
- R&R Bilimsel ve Teknik Hizmetler Ltd. Şti & DHV Consultants,2010,** Katı Atık Yakma Tesisleri İçin Teknolojiler ve Yer Seçim
- Ratafia-Brown, J.A., Manfredo, L. M., Hoffmann, J.W., Ramezan, M., 2002.** An Environmental Assessment of IGCC Power Systems, Pittsburg
- Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., Balahorli, V., 2010.** Evsel Katı Atık Termal Bertaraf Yöntemleri ve İstanbul'a Uygulanabilirliği, Mühendislik ve *Fen Bilimleri Dergisi*,3, 109-116.
- Savage, G.M., D.L. Bordson, and L.F. Diaz, 1988** “Important Issues Related to Air Pollution at Municipal Solid Waste Facilities”, *25th Annual Governmental Refuse Collection and Disposal Association (GRDA) Conference in St. Paul, Minnesota, USA*
- Saral, A.,** Nokta Kaynaklar ve Yanma Kaynaklı Emisyonlar
- Sezer, K., 2008.** Karışık Kentsel Atık Kompost Tesisi Ünitelerinde Atık Profilinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Solena Group, Inc., 2011,** Clean Technology Report Summary
- Tanrısever, T., 2009.** Reaksiyon Isılarının Ölçülmesi, Fiziksel Kimyasal Yöntemler Ders Notları
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 1991.** Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, *T.C. Resmi Gazetesi No: 20814*, Tarih: 14.03.1991
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 1993.** Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği. *T.C. Resmi Gazetesi No: 21586*, Tarih: 20.05.1993
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2004.a.** Hafriyat Toprağı ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği. *T.C. Resmi Gazetesi No: 25406*, Tarih: 18.03.2004
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2004.b.** Atık Pil ve Akümülatörlerin Kontrolü Yönetmeliği. *T.C Resmi Gazetesi No: 25569*,Tarih: 31.08.2004
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010.a.** Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. *T.C Resmi Gazete No:27533*, Tarih:26.03.2010
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010.b.** Atıkların Yakılmasına İlişkin Yönetmelik. *T.C Resmi Gazete No:27721*, Tarih: 06.10.2010

- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2011.** Ambalaj ve Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, *T.C Resmi Gazetesi No: 28035*, Tarih: 24.0.2011
- T.C. İçişleri Bakanlığı, Mahalli İdareler Genel Müdürlüğü, 2010.** 2009 yılı Mahalli İdareler Genel Faaliyet Raporu, Ankara.
- Tchobanoglous, G. and Kreith, F., 2002.** 2nd Edition ,Handbook of Solid Waste Management, The McGraw Hill-Companies, New York.
- Tezcakar, M., Can, O., 2010,** Atıktan Enerji Eldesinde Termal Bertaraf Teknolojileri, *IWES Bildiriler Kitabı*, 150-155
- The World Bank, 1999..** Decision Makers' Guide to Municipal Solid Waste Incineration, Washington, D.C.
- UNEP Questionnaire, 2010.** Waste Incineration, USA
- United Nations Environment Programme, 2003.** Draft Guidelines on Best Available Techniques (BAT) and Best Environmental Practices (BEP) for the Incineration of Municipal Waste, Villarica
- United Nations Environment Programme, 2005.** Solid Waste Management.
- United Technologies Research Center, 2002.** Final Report :Biomass Gasification and Power Generation Using Advanced Gas Turbine Systems, East Hartford.
- Van der Drift A., Boerrigter, H., Coda, B., Cieplik, M. K., Hemmes, K., 2004.** Entrained Flow Gasification Of Biomass; Ash behaviour, feeding issues, and system analyses.
- Vesilind, P.A., Worrell, W.A. & Reinhart, D.R., 2002.** Solid Waste Engineering, Brooks/Cole, Pacific Grove, USA.
- Vølund B&W, 2006.** Plant Fact Sheet :Waste to Energy Plant ,Reno Nord Aalborg, Denmark.
- Yun, Y., Chung, S. W. and Yoo, Y.D., 2003.** Syngas Quality in Gasification Of High Moisture Municipal Solid Wastes.
- Url-1 Türkiye İstatistik Kurumu websitesi, <http: [www.tuik.gov.tr](http://www.tuik.gov.tr) >** alındığı tarih 25.03.2011.





## **EKLER**

**EK A.1:** Yakma Modeli Oluşturmada Kullanılan izelgeler, 2020 yılında ulaşılması öngörülen kalorifik değer için Yakma ve Gazlaştırma Model Sonuçları

**EK A.1****Çizelge A.1 : Hava ve nemin entalpi değerleri**

Hava ve nem için entalpi değerleri					
T (°C)	H <sub>H2O</sub> (kcal/kg)	H <sub>hava</sub> (kcal/kg)	T (°C)	H <sub>H2O</sub> (kcal/kg)	H <sub>hava</sub> (kcal/kg)
66	12,01	606,62	621	152,31	880,44
93	18,69	620,34	649	159,75	895,12
121	25,39	633,73	677	167,23	910,14
149	32,12	646,96	704	174,76	925,07
177	38,85	660,12	732	182,32	940,08
204	45,66	673,23	760	189,92	955,46
232	52,47	686,37	788	197,54	970,94
260	59,33	699,57	816	205,21	986,40
288	66,23	712,82	871	220,65	1017,84
316	73,16	726,18	927	236,16	1050,06
343	80,14	739,59	982	251,80	1082,23
371	87,15	753,18	1038	267,54	1115,09
399	94,27	766,82	1093	283,37	1148,57
427	104,10	780,57	1149	299,29	1182,61
454	108,48	794,46	1204	315,29	1216,62
482	115,67	808,51	1260	331,36	1251,44
510	122,92	822,62	1316	347,51	1286,29
538	130,20	836,90	1371	363,72	1321,00
566	137,53	851,33	1427	380,01	1357,39
593	144,89	865,73	1482	396,34	1395,49

**Çizelge A.2 : Kuru hava ile nemin doygunlaşma özellikler(Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)**

Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)	Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)
16	0,011080	0,000	0,829	23	0,018170	6,217	0,861
16	0,011490	0,383	0,831	24	0,018810	6,742	0,864
17	0,119100	0,774	0,834	24	0,019460	7,274	0,866
17	0,012340	1,174	0,836	25	0,020140	7,830	0,869
18	0,012790	1,583	0,838	26	0,020840	8,394	0,871
18	0,013260	2,001	0,840	26	0,021560	8,972	0,874
19	0,013740	2,427	0,842	27	0,022310	9,563	0,877
19	0,014230	2,864	0,851	27	0,023080	10,170	0,879
20	0,014740	3,310	0,847	28	0,023870	10,792	0,882
21	0,015270	3,767	0,849	28	0,024680	11,428	0,885
21	0,015810	4,234	0,852	29	0,025520	12,080	0,888
22	0,016380	4,713	0,856	29	0,026390	12,748	0,890
22	0,017000	5,203	0,856	30	0,027280	13,404	0,893
23	0,017550	5,703	0,859	31	0,028210	14,136	0,896

**Çizelge A.3 :** (devam) Kuru hava ile nemin doygunlaşma özellikler(Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)	Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)
31	0,029160	14,858	0,899	52	0,095110	60,928	1,057
32	0,030140	15,597	0,902	52	0,098150	62,967	1,063
32	0,031150	16,357	0,905	53	0,101290	65,078	1,069
33	0,032190	17,134	0,908	53	0,104530	67,244	1,076
33	0,033260	17,933	0,911	54	0,107880	69,478	1,083
34	0,034370	18,751	0,915	54	0,111300	71,789	1,090
34	0,035510	19,592	0,918	55	0,114900	74,167	1,097
35	0,036680	20,453	0,921	56	0,118600	76,594	1,104
36	0,037890	21,338	0,924	56	0,122400	79,144	1,112
36	0,039140	22,244	0,928	57	0,126400	81,767	1,119
37	0,040430	23,175	0,931	57	0,130400	84,456	1,127
37	0,041750	24,132	0,935	58	0,134600	87,244	1,136
38	0,043120	25,116	0,938	58	0,139000	90,133	1,144
38	0,044530	26,124	0,942	59	0,143500	93,100	1,153
39	0,044980	27,159	0,946	59	0,148200	96,172	1,162
39	0,047480	28,226	0,950	60	0,153000	99,344	1,171
40	0,049020	29,317	0,954	61	0,158000	102,628	1,180
41	0,050610	30,440	0,958	61	0,163200	106,028	1,190
41	0,052250	31,593	0,962	62	0,168500	109,539	1,200
42	0,053940	32,778	0,966	62	0,174100	113,178	1,210
42	0,055680	33,994	0,970	63	0,179800	116,939	1,221
43	0,057470	35,247	0,974	63	0,185800	120,844	1,232
43	0,059320	36,536	0,978	64	0,192000	124,900	1,244
44	0,061230	37,841	0,983	64	0,198400	129,083	1,255
44	0,063190	39,216	0,987	65	0,205100	133,428	1,268
45	0,065220	40,612	0,992	66	0,221200	137,939	1,280
46	0,067310	42,050	0,997	66	0,219200	142,617	1,293
46	0,069460	43,532	1,002	67	0,226700	147,472	1,307
47	0,071680	45,053	1,007	67	0,234400	152,517	1,321
47	0,073970	46,221	1,012	68	0,242500	157,756	1,335
48	0,076330	48,231	1,017	68	0,250900	163,211	1,350
48	0,078770	49,889	1,022	69	0,259600	168,878	1,366
49	0,081280	51,600	1,028	69	0,268800	174,800	1,382
49	0,083880	53,800	1,033	70	0,278200	180,939	1,399
50	0,086550	55,167	1,039	71	0,288100	187,350	1,417
51	0,089310	57,028	1,045	71	0,298500	194,089	1,435
51	0,092160	58,950	1,051	72	0,309200	200,994	1,454

**Çizelge A.4 :** (devam) Kuru hava ile nemin doyunlaşma özellikler(Tchobanoglous and Kreith, F., 2002)

Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)	Sıcaklık (°C)	Nem oranı (kg H <sub>2</sub> O/kg KG)	Entalpi (kcal karışım/kg KG)	Hacim (m <sup>3</sup> /kg KG)
72	0,320500	208,278	1,474	86	0,927100	597,833	2,510
73	0,332300	215,878	1,494	87	0,979000	631,056	2,597
73	0,344600	223,828	1,516	87	1,035500	667,222	2,692
74	0,357500	232,133	1,538	88	1,097000	706,778	2,796
74	0,371000	240,850	1,562	88	1,165000	750,389	2,910
75	0,385100	249,972	1,586	89	1,240000	797,944	3,035
76	0,400000	259,544	1,612	89	1,322000	850,889	3,174
76	0,415600	269,600	1,639	90	1,414000	909,667	3,328
77	0,432000	280,161	1,668	91	1,517000	975,667	3,500
77	0,449300	291,283	1,697	91	1,633000	1049,722	3,695
78	0,467500	302,989	1,729	92	1,765000	1133,778	3,915
78	0,486700	315,339	1,762	92	1,915000	1230,000	4,167
79	0,507000	328,372	1,797	93	2,089000	1341,056	4,457
79	0,528400	342,144	1,833	93	2,292000	1471,333	4,797
80	0,551100	356,728	1,872	94	2,532000	1624,556	5,198
81	0,575200	372,178	1,913	94	2,820000	1808,556	5,679
81	0,600800	388,600	1,957	95	3,173000	2033,778	6,269
82	0,627900	406,033	2,003	96	3,614000	2316,556	7,006
82	0,656000	424,617	2,052	96	4,181000	2678,722	7,952
83	0,687800	444,450	2,105	97	4,939000	3163,333	9,184
83	0,720900	465,667	2,161	97	6,000000	3840,556	10,986
84	0,756300	488,344	2,221	98	7,594000	4860,000	13,645
84	0,794300	512,728	2,285	98	10,248000	6556,667	18,072
85	0,835200	538,950	2,358	99	15,540000	9937,222	26,896
86	0,879400	567,222	2,429	99	31,490000	20133,889	53,500

**Çizelge A.5 : Atık ısı hesaplamasında kullanılan gaz için entalpi değerleri**

Baca Gazı Özellikleri					
Sıcaklık	Özgül Isı	Sıcaklık	Özgül Isı	Sıcaklık	Özgül Isı
C	kcal/kgC	C	kcal/kgC	C	kcal/kgC
-150	0,245	548	0,240	1523	0,283
-100	0,241	573	0,240	1573	0,284
-50	0,240	598	0,241	1623	0,286
0	0,240	623	0,241	1673	0,287
20	0,240	648	0,242	1773	0,290
40	0,240	673	0,242	1873	0,292
60	0,241	723	0,244	1973	0,294
80	0,241	773	0,246	2073	0,296
100	0,241	823	0,249	2173	0,298
120	0,242	873	0,251		
140	0,242	923	0,254		
160	0,243	973	0,257		
180	0,244	1023	0,260		
200	0,245	1073	0,263		
250	0,247	1123	0,265		
300	0,250	1173	0,268		
350	0,252	1223	0,271		
400	0,255	1273	0,273		
448	0,240	1323	0,275		
473	0,240	1373	0,277		
498	0,240	1423	0,279		
523	0,240	1473	0,281		
548	0,240	1523	0,283		
573	0,240	1573	0,284		
598	0,241	1623	0,286		
623	0,241	1673	0,287		
648	0,242	1773	0,290		
673	0,242	1873	0,292		
723	0,244	1973	0,294		
773	0,246	2073	0,296		
823	0,249	2173	0,298		

**Çizelge A.6 : Atık ısı hesaplamasında kullanılan entalpi değerleri**

<i>Basınç</i>	<i>Suyun Özgül Entalpisi</i>		<i>Buharın Özgül Entalpisi</i>		<i>Basınç</i>	<i>Suyun Özgül Entalpisi</i>		<i>Buharın Özgül Entalpisi</i>	
	<i>(kJ/kg)</i>	<i>(kcal/kg)</i>	<i>(kJ/kg)</i>	<i>(kcal/kg)</i>		<i>(kJ/kg)</i>	<i>(kcal/kg)</i>	<i>(kJ/kg)</i>	<i>(kcal/kg)</i>
0,02	73,45	17,54	2533,64	605,15	3,5	584,28	139,55	2731,63	652,44
0,03	101	24,12	2545,64	608,02	4	604,68	144,43	2737,63	653,87
0,04	121,41	29	2554,51	610,13	4,5	623,17	148,84	2742,88	655,13
0,05	137,77	32,91	2561,59	611,83	5	640,12	152,89	2747,54	656,24
0,06	151,5	36,19	2567,51	613,24	5,5	655,81	156,64	2751,7	657,23
0,07	163,38	39,02	2572,62	614,46	6	670,43	160,13	2755,46	658,13
0,08	173,87	41,53	2577,11	615,53	6,5	684,14	163,4	2758,87	658,94
0,09	183,28	43,78	2581,14	616,49	7	697,07	166,49	2761,98	659,69
0,1	191,84	45,82	2584,78	617,36	7,5	709,3	169,41	2764,84	660,37
0,2	251,46	60,06	2609,86	623,35	8	720,94	172,19	2767,46	661
0,3	289,31	69,1	2625,43	627,07	8,5	732,03	174,84	2769,89	661,58
0,4	317,65	75,87	2636,88	629,81	9	742,64	177,38	2772,13	662,11
0,5	340,57	81,34	2645,99	631,98	9,5	752,82	179,81	2774,22	662,61
0,6	359,93	85,97	2653,57	633,79	10	762,6	182,14	2776,16	663,07
0,7	376,77	89,99	2660,07	635,35	11	781,11	186,57	2779,66	663,91
0,8	391,73	93,56	2665,77	636,71	12	798,42	190,7	2782,73	664,64
0,9	405,21	96,78	2670,85	637,92	13	814,68	194,58	2785,42	665,29
1	417,51	99,72	2675,43	639,02	14	830,05	198,26	2787,79	665,85
1,1	428,84	102,43	2679,61	640,01	15	844,64	201,74	2789,88	666,35
1,2	439,36	104,94	2683,44	640,93	16	858,54	205,06	2791,73	666,79
1,3	449,19	107,29	2686,98	641,77	17	871,82	208,23	2793,37	667,18
1,4	458,42	109,49	2690,28	642,56	18	884,55	211,27	2794,81	667,53
1,5	467,13	111,57	2693,36	643,3	19	896,78	214,19	2796,09	667,83
1,5	467,13	111,57	2693,36	643,3	20	908,56	217,01	2797,21	668,1
1,6	475,38	113,54	2696,25	643,99	21	919,93	219,72	2798,18	668,33
1,7	483,22	115,42	2698,97	644,64	22	930,92	222,35	2799,03	668,54
1,8	490,7	117,2	2701,54	645,25	23	941,57	224,89	2799,77	668,71
1,9	497,85	118,91	2703,98	645,83	24	951,9	227,36	2800,39	668,86
2	504,71	120,55	2706,29	646,39	25	961,93	229,75	2800,91	668,99
2,2	517,63	123,63	2710,6	647,42	26	971,69	232,08	2801,35	669,09
2,4	529,64	126,5	2714,55	648,36	27	981,19	234,35	2801,69	669,17
2,6	540,88	129,19	2718,17	649,22	28	990,46	236,57	2801,96	669,24
2,8	551,45	131,71	2721,54	650,03	29	999,5	238,73	2802,15	669,28
3	561,44	134,1	2724,66	650,77	30	1008,33	240,84	2802,27	669,31

**Çizelge A.7 : 2800 kcal/kg için model verileri**

Kütle(kg/sa)	41704
Kuru gaz katsayısı	0,0008
Nem katsayısı	0,00005
Nem oranı	31%
Kül	30%
Hava Fazlalık Oranı	100%
Nem/kuru Gaz	0,01
Soğutma Havası(st.m <sup>3</sup> /dak.)	56
Hava Yoğunluğu(kg/m <sup>3</sup> )	1,2
Desarj Noktasındaki sıcaklık	450
Enthalpy(kcal/kg)	52
Kül desarj sıcaklığı °C	316
Radyasyon Kaybı	1,50%

**Çizelge A.8 : 2800 kcal/kg için kütle ve enerji dengesi**

Atığın sulu kısmı(kg/sa)	12.900,00
Atığın kuru kısmı(kg/sa)	28.712,00
Kül(kg/sa)	12.484,00
Uçucu (yanabilen) kısım (kg/sa)	16.229,00
Toplam ısıl değer (kcal/sa)	116.018.233,00
Yanabilen kısmın ısıl değeri (kcal/kg)	7.148,00
Kuru gaz(kg/sa)	168.180,00
Nem (kg/sa)	11.042,00
Yanma ürünleri (kuru gaz ve nem) (kg/sa)	179.222,00
Stokiyometrik hava ihtiyacı	162.993,00
Hava fazlasıyla birlikte oluşan hava (kg/sa)	325.987,00
Hava fazlası (kg/sa)	162.993,00
Havayla birlikte sisteme verilen nem(kg/sa)	3.260,00
Toplam H <sub>2</sub> O(kg/sa)	27.202,00
Toplam kuru gaz (kg/sa)	331.174,00
Soğutma hava debisi(kg/sa)	4.077,00
Soğutma suyundan kaynaklanan yük kaybı (kcal/sa)	212.500,00
Külün ısıl değeri (kcal/kg)	72,00
Külden kaynaklanan kayıp (kcal/sa)	895.000,00
Radyasyondan kaynaklanan kayıp (kcal/sa)	1.740.273,49
Nem için düzeltme (kcal/sa)	1.745.000,00
Sistemdeki toplam kayıp	1.102.773,49
Çıkıştaki enerji(kcal/sa)	114.915.459,26
Girişteki enerji (kcal/sa)	116.018.232,75

**Çizelge A.9 : 2800 kcal/kg için fırında ulaşılan sıcaklık hesapları**

FIRIN İÇİ SICAKLIK	
°C	Kcal/sa
982	112.080.000,00
<b>1008</b>	<b>114.915.000,00</b>
1038	118.147.500,00

**Çizelge A.10 : 2800 kcal/kg için ek yakıt ihtiyacı**

Yakıt ilavesi	Fuel oil 2	Fuel oil 6
Kabul baca gazı sıcaklığı ile fırında ulaşılan sıcaklık arasındaki fark (kcal/sa)	gerekli değil	gerekli değil
Yakıt-Yağ Fraksiyonu	1,2	1,1
(fuel)net kcal/m3	gerekli değil	gerekli değil
kcal /kg	-	0,00
Yakıt miktarı m3/sa	0,00	0,00
(for incineration of fuel )Air kg/sa	0,00	0,00
Yakıtın yanması ile gelen hava kg/sa	0,00	0,00
Yakıtın yanmasıyla gelen su kg/sa	0	0,00
Yakıt ilavesi ile sistemdeki Kuru gaz kg/sa (total dry air)	331.173,00	331.173,00
Yakıt ilavesi ile sistemdeki H2O kg/sa (total water)	27.202,00	27.202,00
Yakıt ilavesi ile sistemdeki hava kg/sa	325.987,00	325.987,00
Eklenen yakıttan gelen enerji kcal/sa	0,00	0,00
Çıkıştaki enerji kcal/kg	114.915.459,00	114.915.459,00

**Çizelge A.11 : Buhar Üretimi**

Türbin için kabul edilen yaklaşım sıcaklığı	66
Giren gazın sıcaklığı C	1008,00
Sistemde oluşan kuru gaz (kg/h)	331.173,00
Sisteme giren nem (kg/h)	27.202,00
Buhar Basıncı (kabul)	0,75
Buhar sıcaklığı	662
Kazan çıkış sıcaklığı C	433
Kullanılabilir ısı enerjisi (kcal/h)	56.356.030,00
Blöf miktarının buhar miktarına oranı	0,04
Besleme suyu sıcaklığı	220
Besleme suyu entalpisi	188
Üretilen buharın kondens olarak dönen kısmı	0,2
Kondens Sıcaklığı	170

**Çizelge A.12 : (devam) Buhar Üretimi**

Kondens entalpisi	138
Ham suyu sıcaklığı	60
Ham suyu entalpisi	27
Kazandaki Radyasyon Kaybı	0,01
Kullanılabilir ısı enerjisi (kcal/h)	55.792.500,00
Atık besleme suyu(kg/H)	99.314,00
Sistemde oluşan toplam buhar (kg/h)	95.342,00
Blöf miktarı(kg/h)	3.973,00
Kondens olarak dönen kısım(kg/h)	19.068,00
Besleme suyu (kg/h)	11.402,00
Hava Gidericiye giren su (kg/h)	68.845,00
Net buhar miktarı(kg/h)	83.940,00

İlçe adı	Su muhtevası, %		Üst Isıl Değer, kal/g		Alt Isıl Değer, kal/g		Organik madde, %	
	Ortalama	Std. sapma	Ortalama	Std. sapma	Ortalama	Std. sapma	Ortalama	Std. sapma
Üsküdar	47,1	9,8	3782,8	242,7	1725,6	441,9	79,5	4,4
Ümraniye	43,8	5,6	3898,5	389,2	2052,5	397,6	81,2	5,9
Beykoz	37,3	7,1	3932,8	348,6	2007,2	500,4	83,5	3,7
Çekmeköy	46,7	2,9	4129,0	502,1	2161,9	291,7	85,9	1,6
Sancaktepe	43,4	6,4	4211,5	140,1	2119,7	262,8	83,5	5,8
Kadıköy	48,8	3,1	4069,8	438,4	2041,9	181,0	82,9	1,7
Ataşehir	45,9	5,1	4053,8	543,4	2015,4	327,6	81,1	3,8
Maltepe	46,6	1,4	3930,8	582,8	1998,2	259,0	79,6	5,3
Kartal	44,2	1,4	4131,3	233,1	2382,4	175,8	79,6	4,7
Pendik	41,0	2,7	4435,0	864,3	2442,7	580,2	80,7	6,9
Tuzla	41,5	3,0	4508,0	422,9	2400,9	196,9	82,8	3,7
Sultanbeyli	40,4	7,5	4467,0	294,9	2321,3	297,5	84,2	3,2
Eyüp	47,0	6,9	4559,5	1187,7	2128,5	689,6	83,4	3,9
Bakırköy	43,2	6,5	4362,5	418,4	2152,9	355,7	82,7	7,4
Sarıyer	43,8	7,8	3906,8	367,0	1879,3	375,4	84,3	7,3
Beşiktaş	42,2	8,1	3928,8	170,1	1854,6	341,0	83,2	8,4
Kağıthane	45,2	3,1	3903,3	402,6	1964,2	171,0	79,6	2,1
Bahçelievler	42,6	6,2	3819,3	416,3	2025,4	154,1	79,5	3,9
Fatih	44,4	5,7	3815,3	334,2	1979,9	353,1	78,2	3,6
Şişli	42,1	5,1	4111,3	532,0	2278,0	392,7	80,3	5,0
Güngören	41,9	10,2	4332,0	553,1	2172,0	630,5	79,1	5,3
Zeytinburnu	38,3	5,7	4233,5	380,9	1973,8	392,1	78,6	4,1
Beyoğlu	45,3	7,5	4113,0	753,4	1989,3	549,1	75,5	2,7
Sultanazizi	43,8	5,6	3933,8	381,9	1952,0	308,5	69,8	22,5
Bayrampaşa	45,8	4,0	3557,3	318,4	1755,7	288,0	68,8	5,0
Arnavutköy	47,3	6,3	3542,3	579,7	1799,0	336,3	71,6	7,1
Avcılar	42,4	6,1	3390,3	202,1	1605,4	367,3	82,0	0,8
Büyükkçekmece	45,9	1,9	3375,8	434,4	1565,9	256,0	83,5	5,1
Esenler	45,8	6,0	3498,0	262,8	1711,1	401,6	81,1	0,2
Beylikdüzü	41,6	1,5	3538,5	992,2	1656,2	562,0	79,4	6,8
Esenyurt	43,9	3,5	3910,5	337,7	1827,0	315,4	81,7	3,9
Gaziosmanpaşa	47,0	3,3	3986,0	176,0	1815,1	201,3	82,0	4,2
Bağcılar	40,9	6,1	4215,8	395,3	2001,8	225,0	84,9	6,9
Küçükçekmece	48,0	2,3	4392,8	539,8	2193,8	190,1	84,4	2,9
Başakşehir	41,8	5,6	4211,0	594,5	2132,8	582,9	83,0	7,1
Silivri	43,5	2,0	3033,5	878,9	1468,2	568,2	74,6	4,9
Çatalca	44,2	-	2744,0	-	1272,6	-	68,2	-
Anadolu Yakası	43,9	2,7	4129,2	193,7	2139,1	129,4	82,0	1,6
Avrupa Yakası	43,9	5,3	3856,6	483,7	1886,2	375,3	79,2	5,5
İstanbul	43,9	2,3	3945,0	233,9	1968,2	144,0	80,1	3,6

Şekil A.1: 2010 yılı ilçelere göre atık özellikleri

Kullanılan teknoloji Teknolojinin sahibi firma Beslenecek yakıt Tasarım şartları	Plazma Gazlaştırma Westinghouse Plazma Biomass+Tehlikeli Atıklar		Plazma Gazlaştırma Westinghouse Plazma RDF		Plazma Gazlaştırma Westinghouse Plazma RDF		Klasik Gazlaştırma PRM Energy Systems Biomass		Klasik Gazlaştırma PRM Energy Systems RDF		Klasik Gazlaştırma PRM Energy Systems Biomass	
	1	1	1	2	2	4	1	1	1	1	1	1
Reaktör adedi												
1 Beslenecek yakıt minimum ısı değeri (LHV)	3,800	2,776	2,776	2,776	3,800	3,800	3,800	2,776	2,776	3,800	3,800	kcal/kg
2 Beslenecek yakıt miktar - saatte	41.7	31.3	62.5	62.5	41.7	41.7	12.60	12.50	12.50	12.60	12.60	ton/saat
3 Beslenecek yakıt miktar - günde	1,000	750	1,500	1,500	1,000	1,000	302	300	300	302	302	ton/gün
4 Yılda gerekli olacak biomass miktarı	333,336	250,000	500,000	500,000	333,336	333,336	100,800	100,000	100,000	100,800	100,800	ton/yıl
5 Reaktöre beslenen enerji miktarı	158,334,600	86,750,000	173,500,000	173,500,000	158,334,600	158,334,600	47,880,000	34,700,000	34,700,000	47,880,000	47,880,000	kcal/saat
6 Reaktöre beslenen Metcoke/Antrasit kömürü	1,667	1,250	2,500	2,500								kg/saat
7 Metcoke/Antrasit kömürü LHV değeri	7,126	7,126	7,126	7,126								kcal/kg
8 Antrasit kömüründen gelen enerji	11,879,042	8,907,500	17,815,000	17,815,000								kcal/saat
9 Reaktöre beslenen toplam enerji	170,213,642	95,657,500	191,315,000	191,315,000	158,334,600	158,334,600	47,880,000	34,700,000	34,700,000	47,880,000	47,880,000	kcal/saat
10 Reaktöre beslenecek %93 safıktaki oksijen	14.7	5.4	10.7	10.7	12.6	12.6	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80	ton/saat
11 Eriyik / Köli	0.49	8.21	16.42	16.42	3.65	3.65	1.10	3.28	3.28	1.10	1.10	kg/saat
12 Reaktörden çıkacak HAM syngas miktarı	66,140	40,007	80,014	80,014	54,603	54,603	16,512	13,762	13,762	16,512	16,512	kg/saat
13 Reaktörden çıkan temiz ve kuru syngas miktarı	52,912	30,405	60,811	60,811	45,632	45,632	13,799	10,459	10,459	13,799	13,799	kg/saat
14 Temiz syngas ortalama ısı değeri	2,597	2,174	2,174	2,174	2,660	2,660	2,660	2,100	2,100	2,660	2,660	kcal/kg
15 Elde edilen syngas'ın ihtiva ettiği toplam enerji	137,402,954	66,101,166	132,202,331	132,202,331	121,367,080	121,367,080	36,701,111	21,963,645	21,963,645	36,701,111	36,701,111	kcal/saat
16 Gazlaştırma verimi	80.72%	69.10%	69.10%	69.10%	76.65%	76.65%	76.65%	63.30%	63.30%	76.65%	76.65%	%
17												
18 Temiz ve kuru syngas toplam enerjisi	38,167	18,361	36,723	36,723	33,713	33,713	10,195	6,101	6,101	10,195	10,195	kcal/zan
19 Titan 130 gaz türbini enerji ihtiyacı	10,181	10,181	10,181	10,181	10,181	10,181	10,181			10,181	10,181	kcal/zan
20 3 x Titan 130 türbin ihtiyacı	30,544		30,544	30,544	30,544	30,544				30,544	30,544	kcal/zan
21 Titan 130 gaz türbini üretim kapasitesi	15	15	15	15	15	15	15			15	15	MW
22 Titan 130 gaz türbinleri üretimi	45		45	45	45	45				45	45	MW
23 Artan syngas enerji miktarı	7,623				3,169	3,169						kcal/zan
24 Mars 90 gaz türbini enerji ihtiyacı	7,098	7,098										kcal/zan
25 Mars 90 türbinden alınabilecek enerji	9.44	9.44										MW
26 Taurus 70 gaz türbini enerji ihtiyacı			5,306	5,306								
27 Taurus 70 türbinden alınabilecek enerji			7.52	7.52								
28 Centaur 40 gaz türbini enerji ihtiyacı					3,035	3,035						kcal/zan
29 Centaur 40 türbinden alınabilecek enerji					3.51	3.51						MW
30 Gaz türbinlerinden alınan toplam enerji	54.44	24.44	52.52	52.52	48.51	48.51	15.00	7.02	7.02	15.00	15.00	MW
31												

Şekil A.2: Gazlaştırma model sonucu

Kullanılan teknoloji Teknolojinin sahibi firma Beslenecek yakıt Tasarım şartları	Plazma Gazlaştırma		Plazma Gazlaştırma		Plazma Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma	
	Westinghouse Plazma Biyomassa-Tehliksiz Ateşler Kombine çevrim	Westinghouse Plazma PDF Kombine çevrim	Westinghouse Plazma PDF Kombine çevrim	Westinghouse Plazma PDF Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim	PRM Energy Systems Biyomassa Kombine çevrim
Reaktör adedi	1	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	
32	Reaktörden çıkan ham syngas sıcaklığı	1000	1000	982	982	982	982	982	982	982	deg.	
33	Syngas soğutulması ile alınabilecek enerji	6.6	8.0	8.0	5.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	MW <sub>e</sub>	
34	Buhar kazanı ortalama verimi										93%	
35	Buhar kazanında alınacak termal enerji										41.34 MW <sub>e</sub>	
36	Buhar türbinini üretimi										11.57 MW <sub>e</sub>	
37	Gaz türbinleri ekzos gazları miktarı	189.5	176.3	176.3	164.4	49.8	49.8	19.1	19.1	19.1	kg/san	
38	Ekzos gazları çıkış sıcaklığı	496	486	486	496	496	496	443	443	443	deg.	
39	Bu gazlardan elde edilecek 65 barg buhar	80.60	81.23	81.23	69.9	19.44	19.44	7.4	7.4	7.4	ton/saat	
40	Bu gazlardan elde edilecek 3.5 barg buhar	17.20	15.10	15.10	13.6	3.72	3.72	1.41	1.41	1.41	ton/saat	
41	Türbin ekzos gazlarından üretilebilecek enerji	25.11	22.51	22.51	21.73	6.67	6.67	2.51	2.51	2.51		
42	Toplam buhar türbininde alınacak enerji	31.71	30.50	30.50	27.53	8.47	8.47	3.87	3.87	3.87	MW <sub>e</sub>	
43												
44	Toplamda üretilebilecek BRÜT enerji	86.15	83.02	83.02	76.04	23.47	23.47	10.89	10.89	10.89	MW <sub>e</sub>	
45												
46	Plazma torch'lara harcanan enerji	2.54	6.60	6.60							MW <sub>e</sub>	
47	Oksijen tesisinde kullanılacak enerji	4.68	3.65	3.65	4.04	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	MW <sub>e</sub>	
48	Syngas kompresyonu için gerekli enerji	9.16	10.85	10.85	9.16	2.29	2.29	1.72	1.72	1.72	MW <sub>e</sub>	
49	Gaz temizleme için gerekli enerji	2.20	2.40	2.40	2.20	0.84	0.84	0.62	0.62	0.62	MW <sub>e</sub>	
50	Diğer tüketimler (pompalar, fanlar, vs.)	0.85	1.10	1.10	0.55	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	MW <sub>e</sub>	
51	Toplam İÇ TÜKETİM	19.43	24.60	24.60	15.95	4.68	4.68	3.89	3.89	3.89	MW <sub>e</sub>	
52												
53	Tesisin NET ENERJİ ÜRETİMİ	66.72	58.42	58.42	60.10	18.80	18.80	7.00	7.00	7.00	MW <sub>e</sub>	
54												

Şekil A.3: (devam) Gazlaştırma model sonucu

Kullanılan teknoloji Teknolojinin sahibi firma Beslenecek yakıt Tasarım şartları	Plazma Gazlaştırma		Plazma Gazlaştırma		Plazma Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma		Klasik Gazlaştırma	
	Westinghouse Plazma Biomass+Tehlikeli Atıklar Kombine çevirim	Westinghouse Plazma ROF	Westinghouse Plazma ROF	Westinghouse Plazma Kombine çevirim	Westinghouse Plazma ROF	Westinghouse Plazma Kombine çevirim	PRM Energy-Systems Biomass	PRM Energy-Systems Kombine çevirim	PRM Energy-Systems Biomass	PRM Energy-Systems Kombine çevirim	PRM Energy-Systems Biomass	PRM Energy-Systems Bazıt çevirim
Reaktör adedi	1	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	1
55 Yılda hedeflenen ortalama işletme süresi	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
56 Yılda hedeflenen enerji üretimi	533,760,000	208,540,597	467,323,010	480,760,000	150,360,000	150,360,000	150,360,000	150,360,000	150,360,000	150,360,000	98,035,349	98,035,349
57 YEK kanunu ile beklenen satış fiyatı	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151	0.151
58 YEK kanunu ile beklenen yıllık satış geliri	80,597,760	31,489,630	70,565,774	72,594,760	22,704,360	22,704,360	22,704,360	22,704,360	22,704,360	22,704,360	14,803,338	14,803,338
59												
60 İşletme teslimi Biomass maliyeti	50	-44	-44	50	50	50	50	-44	-44	50	50	50
61 Yakıt giderleri	7,575,818	-5,000,000	-10,000,000	7,575,818	2,290,909	2,290,909	2,290,909	-2,000,000	-2,000,000	2,290,909	2,290,909	2,290,909
62 Metcoke/Antrast giderleri	2,381,429	1,785,714	3,571,429	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63 Plazma Torch elektrod giderleri	320,000	320,000	640,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64 İşçilik, bakım-tamir, vs. giderler	1,150,000	1,150,000	1,750,000	850,000	400,000	400,000	400,000	400,000	400,000	400,000	400,000	400,000
65 Öngörülmevenler ve diğer giderler	1,500,000	1,500,000	2,000,000	1,500,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000	1,000,000
66 GİDERLER TOPLAMI	12,927,247	-244,286	-2,038,571	9,925,818	3,690,959	3,690,959	3,690,959	-600,044	-600,044	3,690,959	3,690,959	3,690,959
67												
68 YILLIK İŞLETME KARI	67,670,513	31,733,916	72,604,346	62,668,942	19,013,401	19,013,401	19,013,401	9,056,044	9,056,044	11,112,379	11,112,379	11,112,379
69												
70 Alınabilecek tehlikeli sanayi atıkları min. oranı	10.00%	10.00%	10.00%									
71 Alınabilecek tehlikeli sanayi atıkları min. miktarı	4.17	3.13	6.25									
72 Yıllık alınabilecek tehlikeli atık minimum miktarı	33,334	25,000	50,000									
73 Tehlikeli atıklar ortalama ısı değeri (LHV)	5,000	5,000	5,000									
74 Alınabilecek tehlikeli sanayi atığı bertaraf ücreti	200	200	200									
75 Yıllık tehlikeli atık bertaraf geliri	6,666,720	5,000,000	10,000,000									
76 Tasarruf edilecek biomass miktarı	43,860											
77 Tehlikeli atık alımı ile yakıt tasarrufu tutarı	996,818											
78 Tehlikeli atık alımı ile gelirler toplamı	7,663,538	5,000,000	10,000,000									
79												
80 VERGİ ÖNCESİ İŞLETME KARI	75,334,051	36,733,916	82,604,346	62,668,942	19,013,401	19,013,401	19,013,401	9,056,044	9,056,044	11,112,379	11,112,379	11,112,379
81												

Şekil A.4: (devam) Gazlaştırma model sonucu



## **ÖZGEÇMİŞ**

Elif Aynur 16.08.1987 tarihinde İstanbul'da doğmuştur. 2004 yılında Erenköy Kız Lisesinden mezun olmuştur. Aynı yıl Kocaeli Çevre Mühendisliği bölümünde 1 yıl hazırlık eğitimi gördükten sonra lisans eğitimine başlamıştır. 2008 yılında Erasmus Programı kapsamında 1 dönem Universitat Rovira I Virgili'de Çevre Mühendisliği Yüksek Lisans Programında öğrenim görmüştür. 2009 yılında "Mezbahalarda oluşan atık suların bertarafı" konulu bitirme tezini vererek mezun olmuştur. 2009 yılında İTÜ'de Çevre Bilimleri ve Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.