**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

# FARKLI ÖZELLİKTEKİ EVSEL ATIKLARDAN BİYOLOJİK KURUTMA YÖNTEMİ İLE YAKIT NİTELİKLİ ÜRÜN ELDE EDİLMESİ

**MUTALA MOHAMMED**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

# FARKLI ÖZELLİKTEKİ EVSEL ATIKLARDAN BİYOLOJİK KURUTMA YÖNTEMİ İLE YAKIT NİTELİKLİ ÜRÜN ELDE EDİLMESİ

MUTALA MOHAMMED

Prof.Dr. Aykan KARADEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Doç. Dr. İsmail ÖZBAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç. Dr. Mehmet İŞLEYEN
Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniv. .....

Prof. Dr. Mehmet KOBYA
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv. .....

Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya GÖKTAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.05.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu araştırmada farklı özellikteki atık kompozisyonundan biyolojik kurutma yöntemi ile alternatif enerji kaynak olarak biyo-kurutulmuş material elde edilmiştir.

Her şeyden önce, O'nun bildirdiklerinin dışında insanlar O'nun ilminden hiçbir şeyi tam olarak bilemezler hükmü gereğince bu araştırma çalışmalarını yürütme gücünü ve O'nun ilminden bir şeyleri kavramayı bana nasip eden Allah'a (S.W.T.) hamd ederim. Bu tez konusunu ilk olarak ortaya çıkaran Sn. Prof. Dr. Ertan DURMUŞOĞLU'nun katkı ve desteği olmaksızın böyle bir çalışmayı tamamlayabilmemin mümkün olmayacağı kanaatindeyim. Tezin her aşamasında yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen, katkısı, ve rehberliği ile tez danışmanlığımı gerçekleştiren KOÜ/Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sn. Prof. Dr. Aykan KARADEMIR'e sonsuz saygı ve şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Tez yardımcı danışmanım Sn. Doç. Dr. İsmail ÖZBAY'a yaptıkları büyük yardımlar, entelektüel yorumlar ve doktora çalışmalarım boyunca bana değerli önerilerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca tez izleme jürimde yer alan Bursa Teknik Üniversitesi/Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sn. Doç.Dr. Mehmet İŞLEYEN hocama tez aşamam süresince gösterdiği destekten dolayı teşekkür ederim. KOÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından doktora tezim için maddi destek sağlayan KOÜ/Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırma bir çok insanın yardımıyle gerçekleştirildi. Dolayısıyla Kocaeli Üniversitesi/Çevre Mühendisliği Bölümündeki meslektaşlarım Eylem TOPKAYA, Çisil GÜLÜMSER ve Ödül KILIÇOĞLU'na verdikleri destekten dolayı çok teşekkür ederim. Tez süreci boyunca deneysel çalışmalarında laboratuvar imkanlarını kullanmama izin veren İZAYDAŞ-Laboratuvar Şefi Sn. Erkan BAYSAL ve diğer İZAYDAŞ laboratuvar çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Kalorifik değer ve klor analizlerinde desteğini gördüğüm Bumerang Atık Bertaraf ve Geri Kazanım-Laboratuvarı teknisyeni Sn. Mehmet Tevfik KAYMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Kocaeli Üniversitesi'ndeki eğitimim süresince verdiği destek, rehberlik ve teşvik için KOÜ/Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sn. Doç. Dr. İsmail ÖZBAY başta olmak üzere tüm akademik kadrosuna burada geçirdiğim süre boyunca gösterdikleri manevi destekten ötürü saygı ve şükranlarımı sunarım. Doktora çalışmalarımda yaptıkları cesaretlendirme ve moral desteği nedeniyle KOÜ/Jeoloji Mühendisliği Bölümünden Sn. Prof. Dr. Tahir Serkan IRMAK ve Jeofizik Mühendisliği Bölümünden Sn. Prof. Dr. İrfan YOLCUBAL'a ayrıca teşekkür etmek isterim.

Kocaeli Üniversitesi, Türkiye'de doktora çalışması fırsatının verilmesi ve verilen ayrıcalık için Turk Hükümeti Bursu Kurulu'na minnettarım. Son olarak, doktora çalışmalarım boyunca koşulsuz duaları, sevgileri ve sabırları için canım annem Atıka YUSIF'a, sevgili eşim Sherika ADAMS'a ve kardeşlerime samimi ve özel teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs – 2018 Mutala MOHAMMED

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... i
İÇİNDEKİLER ..... ii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... iv
TABLOLAR DİZİNİ ..... v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... vi
ÖZET ..... viii
ABSTRACT ..... ix
GİRİŞ ..... 1
1. KATI ATIK YÖNETİMİNDE BİYOLOJİK PROSESLER ..... 6
1.1. Atıktan Yakıt Elde Edilmesinde Kullanılan Terminolojiler ..... 7
1.1.1. Atıktan yakıt üretimi (AYÜ) ..... 7
1.1.1.1. Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) ..... 7
1.1.1.2. Katılardan türetilmiş yakıtlar (KTY) ..... 8
1.2. Atık Yönetiminde Kullanılan Biyolojik Arıtma Teknolojileri ..... 9
1.2.1. Anaerobik (Havasız) arıtma ..... 9
1.2.2. Aerobik arıtma (Kompostlaştırma) ..... 10
1.2.3. Mekanik biyolojik arıtma (MBA) ..... 11
1.2.4. Biyo-kurutma prosesi ..... 14
1.2.4.1. Biyo-kurutma prosesini etkileyen faktörler ..... 16
1.2.4.1.1. Nem içeriği ..... 16
1.2.4.1.2. Hava-akış debisi ..... 18
1.2.4.1.3. Sıcaklık ..... 18
1.2.4.1.4. Gözenek arttırıcı (GA) madde ..... 19
1.2.4.1.5. Karıştırma ..... 20
1.3. Katılardan Türetilmiş Yakıt (KTY) Üretimi ..... 20
1.4. KTY / ATY'nin Kalitesi ve Sınıflandırılması ..... 21
1.4.1. Ekonomik parametreler ..... 24
1.4.1.1. Biyokütle içeriği ..... 25
1.4.1.2. Kalorifik değer ..... 25
1.4.1.3. Nem içeriği ..... 26
1.4.2.Teknik özellikler ..... 26
1.4.2.1. Klor içeriği ..... 26
1.4.2.2. Kül içeriği ..... 28
1.4.2.3. Yığın yoğunluğu ..... 28
1.4.3. Çevresel parametreler ..... 29
2. MALZEME VE YÖNTEM ..... 30
2.1. Numune Hazırlanması ..... 30
2.1.1. Deney düzeneği tasarımı ..... 33
2.2. Proses Optimizasyonu ..... 35
2.2.1.Taguchi yöntemi kullanılarak deney tasarımı ..... 36
2.3. Çalışmada Gerçekleştirilen Analizler ..... 39

3. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 45
3.1. Biyo-Kurutmada Kullanılan Atık Malzemelerinin Özellikleri ..... 45
3.2. Biyo-Kurutma Prosesinin Performansı ..... 46
3.3. Atıkların Fiziksel Bileşenlerinin Ve Özelliklerinin Biyo-Kurutma Prosesine Etkileri ..... 49
3.4. Gözenek Arttırıcı Maddelerin Biyo-Kurutmaya Etkisi ..... 54
3.5. Optimum Koşulların Analizi ..... 54
3.5.1.Optimum koşullar ..... 54
3.5.2.ANOVA sonuçlar ..... 59
3.5.3.Performans karakteristiklerinin tahmini ..... 60
3.6. KTY'nin Nitel Sınıflandırması ..... 62
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 65
4.1. Sonuçlar ..... 65
4.2. Öneriler ..... 67
KAYNAKLAR ..... 69
EKLER ..... 79
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER ..... 85
ÖZGEÇMİŞ ..... 86

## ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 1.1. Termal olarak geri kazanımlı atıkların biyolojik arıtma tesislerinde sınıflandırılmasında kullanılan terminolojiler ..... 8
Şekil 1.2. Anaerobik ayrışma prosesi ..... 10
Şekil 1.3. Basitleştirilmiş aerobik kompostlaştırma prosesi ..... 11
Şekil 1.4. KTY üretimi için şematik proses ..... 12
Şekil 1.5. 2015 yılının sonlarında Avrupa'daki MBT tesisleri ..... 13
Şekil 1.6. Biyo-kurutma prosesinin basitleştirilmiş şematiği ..... 16
Şekil 1.7. Biyokurutmada sıcaklığın havanın su tutma kapasitesi üzerine olan etkis ..... 17
Şekil 1.8. ERFO'e göre ATY ve KTY arasındaki farkılar ..... 22
Şekil 1.9. Çeşitli atık bileşenlerin klor içeriği ..... 27
Şekil 2.1. Çalışmanın deneysel süreci ..... 31
Şekil 2.2. Çalışmanın temel aşamaları ..... 32
Şekil 2.3. Biyo-kurutma öncesi atıkların görünüşü ..... 33
Şekil 2.4. Biyo-kurutma reaktörü (Biyo-reaktör) ..... 34
Şekil 2.5. Optimizasyon için dizayn edilen Taguchi yöntemi adımlarının şematik gösterimi ..... 37
Şekil 2.6. Selektif çözündürme yöntemi ile biyokütle içeriğinin tayini ..... 43
Şekil 3.1. Kağıt, plastik ve gözenek arttırıcı maddelerinin su emme kapasitelerinin eğrisi ..... 46
Şekil 3.2. Biyo-kurutma indeksi ..... 48
Şekil 3.3. Hacim ve nem kaybı yüzdesi ..... 51
Şekil 3.4. Ağırlığın azaltılması ve sızıntı suyu üretimi ..... 51
Şekil 3.5. Zamana karşı ağırlık kaybı yüzdesi profili ..... 52
Şekil 3.6. Biyo-kurutma prosesi sırasında sıcaklık dinamiği ..... 53
Şekil 3.7. Nem içeriği için ana etkiler ..... 56
Şekil 3.8. Kalorifik değer için ana etkiler ..... 56

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için (SRF) sınıflandırma sistemi ..... 23
Tablo 1.2. Sınıflandırmanın genişletilmiş versiyonu ..... 23
Tablo 1.3. Farklı ülkelerdeki SRF özellik karakteristikleri ..... 24
Tablo 1.4. Çevresel parametrelerin sınıflandırılması ..... 29
Tablo 2.1. Deney tasarımında kullanılan değişkenlerin düzeyleri ..... 37
Tablo 2.2. $L_9$ ($3^4$) orthogonal sıralı Taguchi deney tasarımı ..... 37
Tablo 2.3. Laboratuar analizlerinde kullanılan standart yöntemler ..... 40
Tablo 3.1. Ham materyallerin karakterizayonu ..... 45
Tablo 3.2. Deney setlerindeki atık kompozisyonları ..... 47
Tablo 3.3. Atık maddelerin özellikleri ..... 49
Tablo 3.4. Biyo-kurutma prosesinden elde edilen sonuçların özeti ..... 50
Tablo 3.5. $L_9$ ($3^4$) dikey sıralı ve NI ile KD ortalama deney sonuçları ..... 55
Tablo 3.6. NI için S/N oranları ve yanıt ortalaması - "daha düşük daha iyi" (SB) ..... 57
Tablo 3.7. KD için S/N oranları ve yanıt ortalaması - "daha yüksek daha iyi" (LB) ..... 58
Tablo 3.8. Varyans analizi sonuçları – NI ..... 59
Tablo 3.9. Varyans analizi sonuçları – KD ..... 60
Tablo 3.10. NI ve KD'nin optimum seviye ve performans değerleri ..... 60
Tablo 3.11. NI ve KD için tahmin ile doğrulama testlerinin sonuçlarının karşılaştırılması ..... 61
Tablo 3.12. Elde edilen KTY'nin sınıflandırılması ..... 63

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | | |
|---|---|---|
| C | : | Karbon |
| C/N | : | Karbon/Azot |
| $CH_4$ | : | Metan |
| Cl | : | Klor |
| $CO_2$ | : | Karbon dioksit |
| H | : | Hidrojen |
| $H_2O$ | : | Su |
| $H_2O_2$ | : | Hidrojen peroksit |
| $H_2S$ | : | Hidrojen sülfür |
| $H_2SO_4$ | : | Hidrojen sülfat |
| Hg | : | Cıva |
| $HNO_3$ | : | Nitrik asit |
| K | : | Potasyum |
| N | : | Azot |
| $NH_3$ | : | Amonyum |
| PAH | : | Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar |
| PCB | : | Poliklorlu Bifenil |
| S | : | Kükürt |

### Kısaltmalar

| | | |
|---|---|---|
| AB | : | Avrupa Birliği |
| ANOVA | : | Analysis of Variance (Varyans Analiz) |
| ASTM | : | American Society for Testing and Materials (Test ve Malzeme Derneği) |
| ATY | : | Atıktan Türetilmiş Yakıt |
| AYÜ | : | Atıktan Yakıt Üretimi |
| CDM | : | Clean Development Mechanism (Temiz Gelişim Mekanizma) |
| CEN | : | European Committee for Standardization (Avrupa Standardizasyon Komitesi) |
| DOE | : | Design of Experiment (Deneylerin tasarımı) |
| FW | : | Food Waste (Gıda atığı) |
| GA | : | Gözenek Arttırıcı Madde |
| GCV | : | Gross Calorific Value (Üst Kalorifik Değer) |
| GKY | : | Geri Kazanılmış Yakıt (Recycled Fuel) |
| KKA | : | Kentsel Katı Atıklar |
| KTY | : | Katı Atıktan Türetilmiş Yakıt |
| LB | : | "Larger the better" (En büyük (yüksek) En İyi) |
| LDPE | : | Low Density Polyethylene (Düşük – Yoğunluklu Poli Etilen) |
| MBA | : | Mechanical Biological Treatment (Mekanik Biyolojik Arıtma) |
| MRF | : | Material Recovery Facility (Maddesel Geri Kazanım Tesisleri) |
| NCV | : | Net Calorific Value (Net Kalorifik Değer) |
| OA | : | Orthogonal Arrays (Dikey sıralar) |

| | | |
|---|---|---|
| Pa | : | Paper (Kağıt) |
| Pl | : | Plastic (Plastik) |
| RDF | : | Refuse Derived Fuels (Atıktan Türetilmiş Yakıt) |
| S/N | : | Signal/Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı) |
| SB | : | “Smaller the better” (En küçük (düşük) En iyi) |
| SDM | : | Selective Dissolution Method (Selektif Çözündürme Yöntemi) |
| SHB | : | Serbest Hava Boşluğu |
| SRF | : | Solid Recovered Fuels (Katı Atıktan Türetilmiş Yakıt) |
| VS | : | Volatile Solids (Uçucu Katı Madde) |
| WDF | : | Waste Derived Fuels (Atıktan Yakıt Üretimi) |

## FARKLI ÖZELLİKTEKİ EVSEL ATIKLARDAN BİYOLOJİK KURUTMA YÖNTEMİ İLE YAKIT NİTELİKLİ ÜRÜN ELDE EDİLMESİ


## ÖZET.

Yapılan bu çalışmanın amacı: gözenek arttırıcı madde ile atık kompozisyonunun biyo-kurutma prosesi üzerindeki etkilerini belirlemenin yanında biyo-kurutulmuş maddenin nem ve enerji içeriklerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesidir. Atık kompozisyonlarının oluşturulmasında gıda, kağıt ve plastik atıklar kullanılırken, gözenek arttırıcı madde olarak ise ağaç budama atıkları kullanılmıştır. Biyo-kurutma işlemi tüm atık matrislerinde 7 gün süreyle 0,9 $m^3$ hacimli ve havalandırmanın difüzörler ile sağlandığı reaktörde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar biyo-kurutma işleminin atıkların ağırlık, hacim ve nem içeriğini azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İlave olarak, başlangıçtaki nem içeriğinin, biyo-kurutma üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve sıcaklık ve su giderme oranı ile birlikte uçucu katı biodegrasyonunu etkilediği belirlenmiştir. Biyo-kurutma indeksi (BI), biyo- kurutma sürecinin performansını göstermiştir. Elde edilen bulgulardan, başlangıç nem içeriğini önemli oranda etkileyen gözenek arttırıcı madde kullanımının gerçekleştirildiği biyo-kurutma prosesinin, biyo-kurutulmuş malzemelerin enerji içeriğini arttırmak ve nem içeriği, hacim ve ağırlık azaltımını gerçekleştirmek bakımından organik atıkların ön işleminde umut verici bir proses olduğu görülmektedir. Optimizasyon amaçlı olarak kullanılan Taguchi yöntemiyle, nem içeriği ve kalorifik değer için optimum koşullar elde edilmiştir. Etkin parametrelerin ortaya konulması için gerçekleştirilen ANOVA analizine göre gıda atıkları, hem nem içeriği hem de kalorifik değer üzerinde daha belirgin etkiye sahip olmuştur. Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından Katı Atıktan Türetilmiş Yakıt (KTY) sınıflamasına göre biyo-kurutulmuş maddenin kalitesi sınıflandırılmıştır.



**Anahtar kelimeler:** Biyo-kurutma, Gıda Atığı, Gözenek Arttırıcı Madde, Kalorifik Değer, Nem İçeriği, Optimizasyon.

**PRODUCTION OF QUALITY SOLID FUEL FROM DIFFERENT WASTE COMPOSITION BY BIOLOGICAL DRYING PROCESS**


## ABSTRACT

The main objectives of this research were to determine the effects of bulking agent, waste composition on bio-drying process as well as optimizing moisture and energy content of a bio-dried material. The waste component consisted food waste, paper, plastic and pruning waste as bulking agent. The laboratory experiment consisted of a 0.9 $m^3$ bio-drying reactor equipped with a matrix temperature measuring and air supply system. All the bio-drying process was conducted for a period of 7 days. Four different sets of experiments were conducted to assess the effect of bulking agents on bio-drying process of food waste. The weight, volume and moisture content reduction were determined after the bio-drying process. Three sets of experiments were carried out to indicate the performance of the bio-drying process using bio-drying index. For optimization purposes, Taguchi approach was used to determine the influence of waste composition for the optimization of moisture content and calorific value of food waste via bio-drying process. The results revealed optimum configurations for moisture content and calorific value. ANOVA analysis indicated that FW had more prominent effect on both moisture content and calorific value. The predicted and measured values were very close to each other. Additionally, the results realized in the confirmatory experiments at optimized conditions of calorific value was found to be higher than the test runs of Taguchi design, suggesting that Taguchi method was very successful in the optimization of bio-drying factors for moisture content and calorific value. The quality of the bio-drşed material produced was determined according to the SRF classification system by CEN.



**Keywords:** Bio-drying, Food Waste, Bulking Agent, Calorific Value, Moisture Content, Optimization.

# GİRİŞ

Artan nüfus ve gelişen kentleşmenin beraberinde getirdiği en önemli çevre problemlerinden bir tanesi de katı atıklardır. Gelişmekte olan ülkelerde kentsel katı atıklar, içeriğindeki gıda atıkları oranının fazla olmasından dolayı yüksek nem içeriğine sahiptirler (He ve diğ., 2005). Kentsel katı atıkların yönetimi; gerek nüfus artışı sonucu atık miktarlarının artması, gerekse yaşam standartlarındaki yükseliş nedeniyle tüketim oranlarının artışı nedeniyle önemli sorun haline gelmektedir. Bu sebeple, atık yönetiminin oluşturulması sırasında sanayileşmekte ve gelişmekte olan ülkelerde artan atık miktarlarının nasıl yönetileceği önemli bir konu haline gelmiştir. Bu sorunlarla mücadele etmek amacıyla kompostlaştırma, anaerobik arıtma, yakma, piroliz, gazlaştırma ve düzenli depolama gibi birçok teknoloji uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan yöntem depolamadır (Laner ve diğ., 2012). Ancak depolamada pek çok sorunla karşı karşıya kalınmaktadır (Zhang ve diğ., 2008). Depolama işlemi esnasında kentsel katı atıkların yapısında bulunan organik maddelerin biyolojik olarak parçalanması sonucu oluşan gazlar işletme sorunlarından birisidir. İkinci temel sorun ise oluşan sızıntı sularının neden olabileceği yeraltı suyu kirlenmesidir. Aynı zamanda, sızıntı suyunun yayılması sonucu toprak kirliliği ve depolama sonucu oluşan gazların emisyonu ile küresel ısınma sorunu ortaya çıkmaktadır (Pantini ve diğ., 2014; Scaglia ve diğ., 2010; Thomsen ve diğ., 2012; White ve Beaven, 2013). Bogner ve diğ. (2008); ve Harborth ve diğ. (2013)'e göre antropojenik metan emisyonunun başlıca kaynaklarından biri de depolamadır.

Avrupa Birliği (AB) 1999'da yeni atık yönetim direktiflerini yayınlamıştır. Bu direktiflere göre (1999/31/EC) üye ülkelerin, depolamaya giden biyolojik olarak bozunabilir (biyo-bozunur) atık miktarlarını kademeli olarak azaltması gerekmektedir (European Commission, 1999). Bundan dolayı kompostlaştırma, organik atık yönetiminde alternatif bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, kompostlama, atık organik fraksiyonunun toprak iyileştirici veya organik bir gübre olarak kullanılabileceği potansiyel olarak güvenli, sürekli ve sağlıklı bir ürüne

dönüştürülmesi işlemidir (Zhang ve diğ., 2013). Ancak yüksek işletim maliyeti, uzun işletme süresi ve çıkan ürünün düşük kalitesi gibi nedenler, kompostlaştırmanın organik atık yönetiminde uygun bir teknoloji olarak kullanılmasını engellemektedir (Velis ve diğ., 2009; Liang ve diğ., 2003).

Son zamanlarda katı atık yönetiminde bir arıtma seçeneği olan yakma teknolojileri enerji geri kazanımı da sağlamaktadır. Bu arıtma yöntemi çoğu araştırmacılar ve endustriler tarafından büyük ilgi görmektedir. Avrupa Birliği (AB) atık direktiflerine göre atık yakma, yakma tesislerinin enerji verimliliğine bağlı olarak ya bertaraf veya enerji geri kazanım teknolojisi olarak kategorize edilmektedir (EC, 2008). Yakma prosesinin tasarımı ve işletilmesi pek çok ısı özelliklerine (kalorifik veya ısıl değeri) bağlıdır. Biyo-bozunur atıkların, düşük alt ısıl değerlerinden (3-6,7 MJ/kg) ve yüksek nem içeriklerinden (> % 70) dolayı enerji potansiyeli açısından değerlendirilmesi çok güçtür (Cheng ve diğ., 2007). Bu nedenle atıkların enerji içeriğini arttırmaya yönelik biyolojik kurutma (biyo-kurutma; bio-drying) yöntemi önemli bir teknoloji olmaktadır (Adani ve diğ., 2002; Zhang ve diğ., 2008; Bezama ve diğ., 2007). Örneğin gıda atıkları gibi biyolojik olarak parçalanabilen atıkların yüksek nem içeriği enerji geri kazanımının verimliliğini azaltmaktadır Bu nedenle biyo-bozunur yönetimindeki uygulamalar, bertaraftan ziyade faydalı kullanıma yönelik yöntemlere kaymaktadır.

Biyo-kurutma, biyo-bozunur atık içeren bir atık akımından nem içeriğini uzaklaştırmak için biyolojik faaliyetleri oluşan ısıyla ısıtıldığı ve toplam ağırlığının düşürüldüğü bir süreçtir. Biyo-kurutma proseslerinde kurutma oranları, biyolojik ısının yanında zorunlu havalandırmanın yanında biyolojik ısı ile de arttırılmaktadır (Zhang ve diğ., 2009; Velis ve diğ., 2009). Bu işlem ile yüksek nem içeriğinin giderilmesi yanında organik bozunma da sınırlanarak, çimento imalatı gibi endüstriyel sektörlerde konvansiyonel fosil yakıtlara alternatif bir enerji kaynağı elde edilerek enerji tasarrufuna sağlanmış olacaktır. Sonuç olarak, biyo-kurutma konsepti ile kentsel katı atıklardan yakıt üretimi son zamanlarda araştırmacılar arasında yeni bir ilgi odağı olmuştur. (Adani ve diğ., 2002; Garg ve diğ., 2009; Pires ve diğ., 2007; Rada ve diğ., 2007; Rada ve diğ., 2010; Ragazzi ve Rada, 2012; Séverin ve diğ., 2010; Velis ve diğ., 2013; Zawadzka ve diğ., 2010).

Biyo-kurutma, pratik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir atık işleme yöntemi olup, bu şekilde Katı Atıktan Türetilmiş Yakıt (KTY; ya da SRF, Solid Recovered Fuel) üretimi ile biyolojik olarak parçalanabilen önemli miktardaki atığın depolama alanına gitmesi engellenmekte, böylelikle gaz ve sızıntı suyu emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlanabilmektedir. Dolayısıyla depolama alanı kaynaklı sera etkisi yapan gazların salımı da biyo-kurutma ile azaltılmış olmaktadır..

Velis ve diğ. (2010)'e göre biyo-kurutma prosesi ile üretilen herhangi bir atıktan türetilmis yakıtlar (WDF, Waste Derived Fuel), Katı Atıktan Türetilmiş Yakıt (KTY) veya Atıktan Türetilmis Yakıt (ATY; ya da Refuse Derived Fuel-RDF) olarak adlandırılır. Biyo-kurutma prosesleri, birincil ürün olarak kısmen stabilize edilmiş kararlı ve yüksek kaliteli bileşime sahip bir yakıt elde etmek için kullanılmaktadır. KTY, kalite yönetimi doğrultusunda WDF olarak yorumlanabilir ancak bir ATY ile karşılaştırıldığında daha iyi kalite göstermesi gerekmemektedir.

Kompostlaştırma, anaerobik arıtma ve diğer atık arıtma teknolojilerinde gerçekleştirilmiş birçok çalışma mevcutken, biyo-kurutma teknolojisine yönelik yapılan çalışmalar daha sınırlıdır. Gerçekleştirilen biyo-kurutma çalışmalarında daha çok tarımsal atıklar ve atıksu arıtma çamurları (Hansjoerg ve diğ., 2004; Yang ve diğ., 2014); evsel katı atıklar (Tambone ve diğ., 2011; Tom ve diğ., 2016) ve kağıt hamuru ile kağıt (Navaee-Ardeh ve diğ., 2006; Frei ve diğ., 2006) çamurlarına odaklanılmıştır. Dolayısıyla biyo-kurutma yöntemi özellikle yüksek nem içeriği olan evsel atıklarda henüz detaylı olarak çalışılmamıştır. Ayrıca gerçekleştirilen biyo-kurutma çalışmalarında daha çok sentetik örnekler kullanılmıştır (Tom ve diğ., 2016). Bu çalışmalar biyo-kurutma prosesinin gerçek bir profilini temsil etmemektedir. Biyo-kurutma ile ilgili araştırmalarda daha çok prosesi etkileyen faktörlere odaklanılırken giriş maddelerinin bileşiminin dikkate alınmadığı görülmektedir. Pilot çalışmaların etkili bir endüstriyel prosese dönüştürülebilmesi için giriş maddelerinin proses verimine etkisinin incelenmesi oldukça önemlidir. Genel olarak, KTY işleme tesislerinin girdileri, değişik koşullar altında üretilen farklı atıkların bir karışımıdır. Tehlikeli olmayan katı atıklar, evsel ve ticari katı atıklar ile ambalaj atıkları gibi üretim ve evsel katı atıkların yüksek enerji içerikli fraksiyonlarını içermektedir (Ragazzi ve Rada, 2012). Yakıt veya KTY üretimi için kullanılan en popüler atık grupları kağıt, hurda lastikleri, plastik atıklar ve odun atıklarıdır. Bu çalışmada KTY

elde etmek amacıyla gıda atıklarının biyolojik olarak kurutulmasına odaklanılmıştır. Optimum kalorifik değer ve nem içeriği elde etmek için her birinde farklı oranlarda gıda, plastik, kağıt ve ağaç budama (gözenek arttırıcı madde) atıklarının yer aldığı atık matrislerinde biyo-kurutma gerçekleştirilmiştir.

Araştırmanın Amacı:

Enerji ihtiyacı yoğun sanayilerin çoğunluğu, sera gazı emisyonlarını azaltmanın bir yolu olarak kömür gibi fosil yakıtların tüketilmesinin azaltılması için çaba göstermektedir. Uluslararası enerji merkezi raporlarına göre, Avrupa'da tüketilen elektriğin % 25'i sadece kömürden üretilmektedir (IEA Clean Coal Centre, 2006). Bununla birlikte, kömür, yüksek karbon içeriğinden dolayı önemli miktarda sera gazı emisyonlarına ($CO_2$) neden olmaktadır. Sonuç olarak, enerji endüstrileri sürdürülebilir kalkınma için alternatif enerji kaynağı olarak ekonomik ve çevresel yönleriyle başarılı olabilecek atıktan türetilmiş yakıtların kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Bu bağlamda evsel ve endüstriyel atıklardan elde edilen KTY, alternatif yakıt olarak kayda değer bir ürün olarak tanımlanmaktadır.

Öte yandan enerji geri kazanımının atık hiyerarşisinde önemli bir rolü vardır ve hammaddelerin enerji içeriğini geliştirilmesi araştırmacılar ve sanayiler arasında önemli bir çalışma konusudur. Bu proseslerden elde edilen enerji yakma tesislerinde kullanılabilmektedir. Ancak katı atıklardaki yüksek nem içeriği yakma sistemlerinde önemli sorunlara yol açabilmektedir. Özellikle biyo-bozunur atıklar ile birlikte yüksek nem içeriği olan atıkların yönetimi son derece önemlidir. Bu atıkların uygunsuz yönetimi hem çevre hem de sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Genelde minimum % 50 nem içeriğine sahip kentsel katı atıklar KTY üretmek için uygundur. Atıkların yakıt üretiminde kullanılmasına yönelik çeşitli çalışmalar olmasına karşın, araştırmacıların ilgisi daha çok atıkların iyi bir şekilde depolanmasına veya enerji geri kazanımlı/kazanımsız yakılmasına yönelik olmaktadır. Bununla birlikte kaynak verimliliğine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar gerek endüstriyel imalat süreçlerinde atık üreten sanayilerin bu atıklarını değerlendirmesine gerekse çimento ve kireç üretim tesisleri ya da kömürle çalışan enerji santralleri gibi yüksek oranda enerji tüketen endüstrilerin alternatif yakıt arayışına çözüm olmuaktadır. Ayrıca Kyoto Protokolü'nün bir sonucu olarak iklim değişikliğini en aza indirgenmesi ve "$CO_2$

sertifikası" ticareti ile yapılan takas veya temiz gelişim mekanizma (CDM – Clean Development Mechanism) sertifikalarının alınabilmesi için, biyojenik materyallerin yüksek paya sahip olduğu alternatif ikincil yakıtlara olan ihtiyaç güçlenmektedir.

Atıklardan ikincil yakıt olan KTY üretiminin sağlanabilmesi amacıyla uygulanan biyo-kurutma prosesleri atığın kalorifik değerini arttırmada en uygun teknolojilerden birisidir. Bu teknoloji, ekonomik değeri olmaması nedeniyle malzeme geri dönüşümünde kullanılamayan atıklar için sürdürülebilir bir alternatif olmaktadır. Bu çalışma öncesinde biyo-kurutma prosesi ile KTY üretimi için yüksek nem içerikli atıkların potansiyel kullanımı üzerine literatürde çok fazla yayın görülmemektedir. Yapılan bu çalışma literatürdeki bu eksikliğin giderilmesine katkı sağlarken, çalışma laboratuvar ölçekli bir düzeyde gerçekleştirilmiş olsa da, kullanılan biyo-reaktör, bir endüstriyel ölçeği temsil edecek kadar büyük olduğundan elde edilen veriler sanayi ölçeğindeki projelere de destek sağlayacaktır.

Yapılan bu çalışmanın amacı biyo-kurutma prosesleriyle KTY üretilerek, endüstriyel uygulamalar için alternatif bir enerji kaynağı sağlamaktır. Bu amaca yönelik olarak bu çalışma aşağıda ifade edilen 4 temel kısımdan oluşmaktadır.

(1) Atık kompozisyonunun üretilen KTY kalitesi üzerine etkisinin belirlenmesi.
(2) Gözenek arttırıcı maddenin gıda atıkların biyo-kurutulmasına etkisi.
(3) Biyo-kurutma için optimum atık karışım faktörlerinin belirlenmesi.
(4) Avrupa Standardizasyon Komitesine (CEN) göre üretilen yakıtın sınıflandırılması (CEN/TS 15359 standart).

# 1. KATI ATIK YÖNETİMİNDE BİYOLOJİK PROSESLER

Gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerdeki kentsel katı atıkların artması başlıca çevresel sorunlardan biridir. Bu sorunlar, artan nüfus, insanların değişen hayat tarzları, gelişim ve daha az biyo-bozunur malzemeler ile ürünlerin tüketimine bağlı olarak meydana gelmektedir. Günümüzde dünya nüfusunun yarısından fazlası gelişmekte olan ülkelerde yaşamaktadır (Tacoli, 2012). Dünya Bankası'nın raporuna göre 2050'li yıllarda gelişmiş ülkelerdeki nüfusun % 86'sını, gelişmekte olan ülkelerin ise % 64'ünü kent nüfusu oluşturacaktır (World Bank, 2012). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde kentsel katı atıkların yönetimi önemli bir problem olarak görülmektedir. Bu sorunlarla mücadele etmek amacıyla kompostlaştırma, anaerobik arıtma, yakma, piroliz, gazlaştırma ve düzenli depolama gibi birçok teknoloji araştırılmış ve geliştirilmiştir (Arena, 2012; Marshall ve Farahbakhsh, 2013). Ancak çevresel sınırlamalar veya mevzuat nedeniyle bu teknolojilerin bazılarının kullanımı giderek zorlaşmaktadır. Bunun sonucunda biyolojik arıtma son 20 yılda çalışmaların odağı haline gelmiştir.

Avrupa Birliği'nde atık önleme ve yönetim mevzuatı, beş farklı atık hiyerarşisi adımında özetlenmektedir (European Commission, 2008). Bu hiyerarşide, atık azaltma (önleme-azaltım) en iyi seçenektir. Ardından yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım, en son seçenek olarak depolama yer almaktadır (Garg ve diğ., 2009). Tamamen sürdürülebilir bir atık yönetim sisteminde, tüm atık akımları için tek bir işlem uygun değildir (Ionescu ve diğ., 2013; Menikpura ve diğ., 2013). Enerji geri kazanımı, atık yönetimi hiyerarşisinin en üstünde olmamasına rağmen, önemli miktarda kentsel katı atıklar, bu yöntem sayesinde düzenli depolama sahasından ayrılabilmektedir.

Günümüzde entegre atık yönetim sistemlerinin tasarlanmasında enerji geri kazanımlı yakma teknolojileri hacim azaltımı açısından önemli olsa da etkin şekilde uygulanabilirliğinin arttırılması için atığın yakıt özelliklerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar da artmaktadır. Atıklardan yakıt elde edilmesiyle ilgili literatürde farklı terminolojiler bulunmaktadır.

## 1.1. Atıktan Yakıt Elde Edilmesinde Kullanılan Terminolojiler

Atıktan yakıt üretimi (AYÜ)'nde atıktan türetilmiş yakıt (ATY) ve katıklardan türetilmiş yakıt (KTY) olmak üzere iki temel terminoloji kullanılmaktadır.

### 1.1.1. Atıktan yakıt üretimi (AYÜ)

Hızlı nüfus artışı, artan atık üretim hacmi ve depolama işleminin atık bertaraf yöntemi olarak başarısız olmasından dolayı, atıklardan elde edilen yakıtlar konvensiyonel fosil yakıtlarına alternatif olmaktadır. Depolama alanında metan ($CH_4$) ve karbon dioksit ($CO_2$) gibi sera gazlarının oluşmasından dolayı, atık hiyerarşisine göre enerji geri kazanımlı bertaraf yöntemleri en çok tercih edilen seçenek olarak görülmektedir. Genel olarak AYÜ, kentsel katı atıkların çeşitli mekanik ve biyolojik uygulamalar ile muamele edilmesi sonucu elde edilen yakıtlar olarak tanımlanmaktadır. AYÜ, elde edilen yakıtın klor ve ağır metal içeriğinden dolayı başlangıçta başarılı olamamıştır. Ancak 1999 yılında depolama direktifinin yürürlüğe girmesiyle birlikte, AYÜ teknolojilerindeki araştırma ve bu teknolojilerin sanayileşmesinde artış gözlenmiştir. Avrupa Birliği atıktan yakıt üretimini 1.3 milyon tona çıkarmıştır (CEN, 2003). AYÜ için kullanılan başka terimler de bulunmaktadır. Tehlikesiz özellikteki Katılardan Türetilmiş Yakıt (KTY-Solid Recovered Fuel), Geri Kazanılmış Yakıt (GKY-Recycled Fuel) ve benzeri yöntemler buna örnek olarak gösterilebilir. Son zamanlarda Avrupa Birliği'nde yeni yönetmeliklerin oluşturulması nedeniyle Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY-Refuse Derived Fuel) terimi kesin bir tanıma sahip değildir.

#### 1.1.1.1. Atıktan türetilmiş yakıt (ATY)

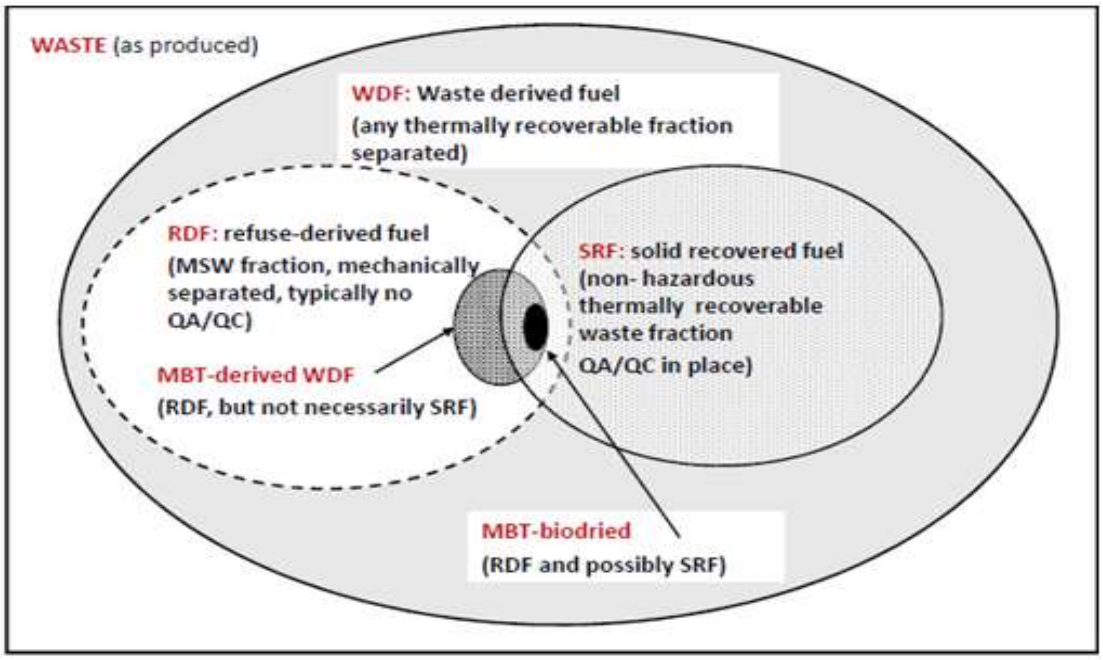
ATY terim olarak atıktan yanmayan malzemenin ayrılarak yanabilir bir ürün elde edilmesidir. Diğer yandan ATY terimi, atık yığınlarından elde edilen ve kalorifik değere sahip olan materyaller için de kullanılmaktadır. Kentsel, ticari veya endüstriyel atıkların mekanik biyolojik arıtımı ile üretilmektedir. Bu şekilde elde edilen yakıtlar çimento fırınlarından enerji santrallerine kadar birçok tesiste kullanılabilmektedir. Ayrıca ATY, bir çok ülkede en basit anlamda katı atıkların ısıl geri kazanımlı atık fraksiyonları olarak tanımlanmaktadır. Örneğin Amerika Birleşik

Devletlerinde ATY terimi, Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) standartlarına göre belli bir kalitedeki AYÜ'ler için geçerli olmaktadır.

#### 1.1.1.2. Katılardan türetilmiş yakıtlar (KTY)

KTY teriminin herhangi bir resmi tanımı mevcut değildir ve ülkeden ülkeye farklı şekilde yorumlanmaktadır. Atık terimi, evsel atıklar ve ticari atıklar için genel bir terimdir. Avrupa ülkelerinde, KTY genellikle, evsel, ticari veya endüstri proseslerinden çıkan, tehlikesiz ve yüksek ısıl değere sahip olan içerikten türetilen yakıtlar için kullanılmaktadır. KTY terimi, CEN/TC 343'de verilen standartları sağlayan oldukça homojen bir yapıya sahip ikincil bir yakıt veya hem orjinal (tehlikeli olmayan atıktan elde edilmiş) hemde belli bir yakıt kalitesi seviyesi anlamında tanımlanan kalite özelliklerini karşılayan atıktan türetilmiş yakıtı ifade eder (Glorious, 2014).

KTY, ATY'den daha homojen ve daha az kirletici olması bakımından yeni bir terminolojidir. Avrupa Standardizasyon Komitesi'ne (CEN) göre KTY CEN/TS 15359'da verilen özelliklere sahip, yakma tesislerinde enerji geri kazanımı için kullanılan ve tehlikesiz atıklardan üretilmiş katı yakıt olarak tanımlanır. Terminolojiler arasındaki fark Şekil 1.1'de gösterilmektedir.




Şekil 1.1. Termal olarak geri kazanımlı atıkların biyolojik arıtma tesislerinde sınıflandırılmasında kullanılan terminolojiler (Velis ve diğ., 2010)

## 1.2. Atık Yönetiminde Kullanılan Biyolojik Arıtma Teknolojileri

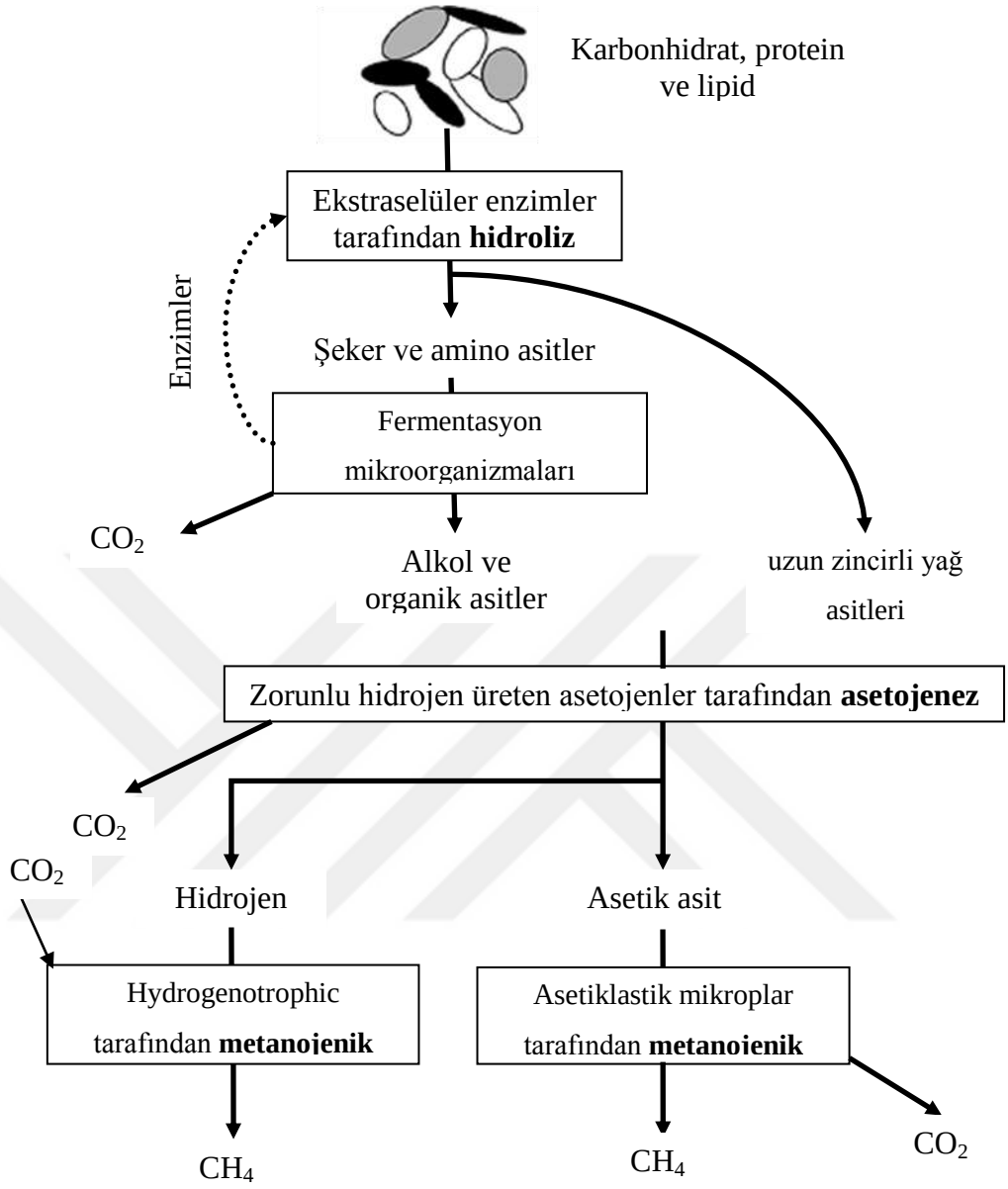
Biyolojik arıtma teknolojileri, biyo-bozunur atık fraksiyonunun komposta benzeyen ürünlere ve biyolojik olarak stabilize edilmiş katı yakıtlara dönüştürüldüğü aerobik veya anaerobik biyolojik prosesleri ifade etmektedir. Aynı zamanda proses sürecinde anaerobik degradasyon ile biyogaz üretilmektedir.

### 1.2.1. Anaerobik (Havasız) arıtma

Anaerobik degradasyon, organik bileşiklerin havasız koşullar altında mikroorganizmalar tarafından parçalanmasıyla oluşan doğal biyolojik bir süreçtir ve bu işlem sürecinde biyogaz üretilmektedir (Basu, 2013). Anaerobik degradasyon; hidroliz, asidifikasyon, asetogenez ve metanogenez evrelerini içeren karmaşık bir prosestir. Anaerobik biyokimyasal ayrışma süreci adımları Şekil 1.2'de verilmiştir.

Üretilen biyogazda birincil ürünler, metan ($CH_4$) ve karbondioksitten ($CO_2$) oluşmaktadır. Bunların dışında amonyum ($NH_3$), hidrojen sülfür ($H_2S$), su ($H_2O$) ve merkaptanlar (sülfonlanmış hidrokarbonlar) da biyogazın bileşiminde bulunmaktadır. Teorik olarak tüm organik maddeler parçalanabilmektedir ve anaerobik degradasyon için organik materyal seçimi sıcaklık, atığın kompozisyonu, nem içeriği gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Evsel katı atıklar için biyogaza ait gaz bileşimi % 68-72 $CH_4$, % 18-20 $CO_2$ ve % 8 $H_2S$'dür (Elango ve diğ., 2007).

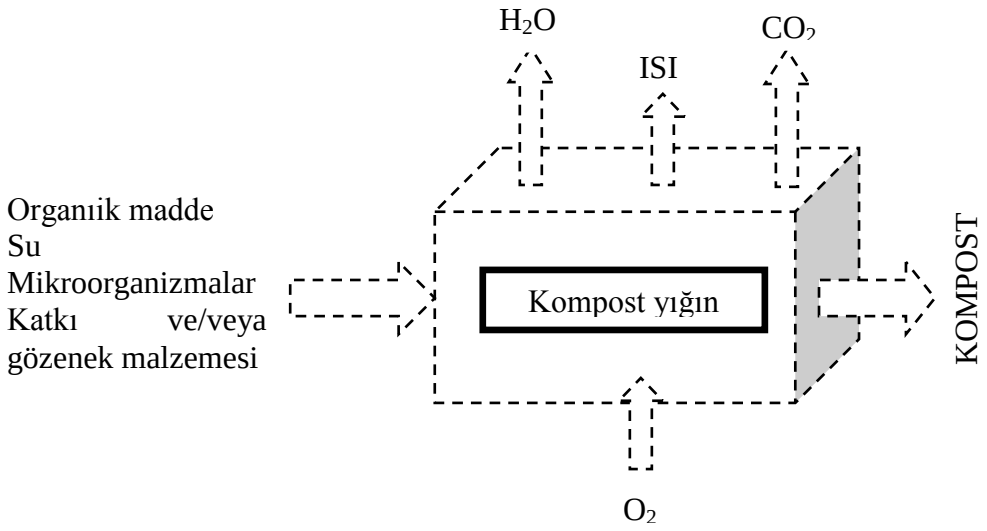
Anaerobik degradasyon sürecinden üretilen biyogaz doğrudan elektrik ve ısı üretimi için kullanılabilmektedir. Aynı zamanda bir yakıt haline dönüştürülebilmektedir. Anaerobik degradasyonun en önemli avantajlarından birisi de depolama alanlarından kaynaklanan metan emisyonlarının azaltılmasıdır. Degradasyon sonrası elde edilen ürün gübre olarak kullanılabilmektedir.




Şekil 1.2. Anaerobik ayrışma prosesi (Angelidaki ve Batstone, 2011)

### 1.2.2. Aerobik arıtma (Kompostlaştırma)

Kompostlaştırma, organik maddelerin kontrollü şartlar altında humus ve humus benzeri stabil ürünlere kadar biyolik parçalanması işlemidir (Tchobanoglous ve diğ., 1993). Bu proses egzotermik bir süreçtir olup, proses sırasında enerji açığa çıkmaktadır. Aynı zamanda kompostlaştırma sırasında önemli ölçüde ısı, karbondioksit ($CO_2$) ve su buharı ($H_2O$) üretilmektedir. Basitleştirilmiş bir kompostlaştırma işleminin safhaları Şekil 1.3'de gösterilmiştir.




Şekil 1.3. Basitleştirilmiş aerobik kompostlaştırma prosesi

Kompostlaştırma ile elde edilen ürünün tarım alanlarında organik gübre olarak kullanılması sonucu atıkların doğadaki madde döngüsüne katılması sağlanmaktadır. Kompostlaştırmanın tercih edilme nedenleri; mevcut veya oluşabilecek koku probleminin ortadan kaldırılması, gübre değeri olan ve toprak şartlandırıcısı olarak kullanılabilecek ürünlerin elde edilmesi, patojenik mikroorganizmaların yok edilmesi, organik atıkların kütlesinin ve hacminin azaltılması, biyo-bozunur atıkların, kararlı bir ürüne dönüştürülmesi, ve N, P, K gibi maksimum makro nütrient ve mikro besi elementleri içeriğinin muhafaza edilmesidir (İzzet ve diğ., 2010).

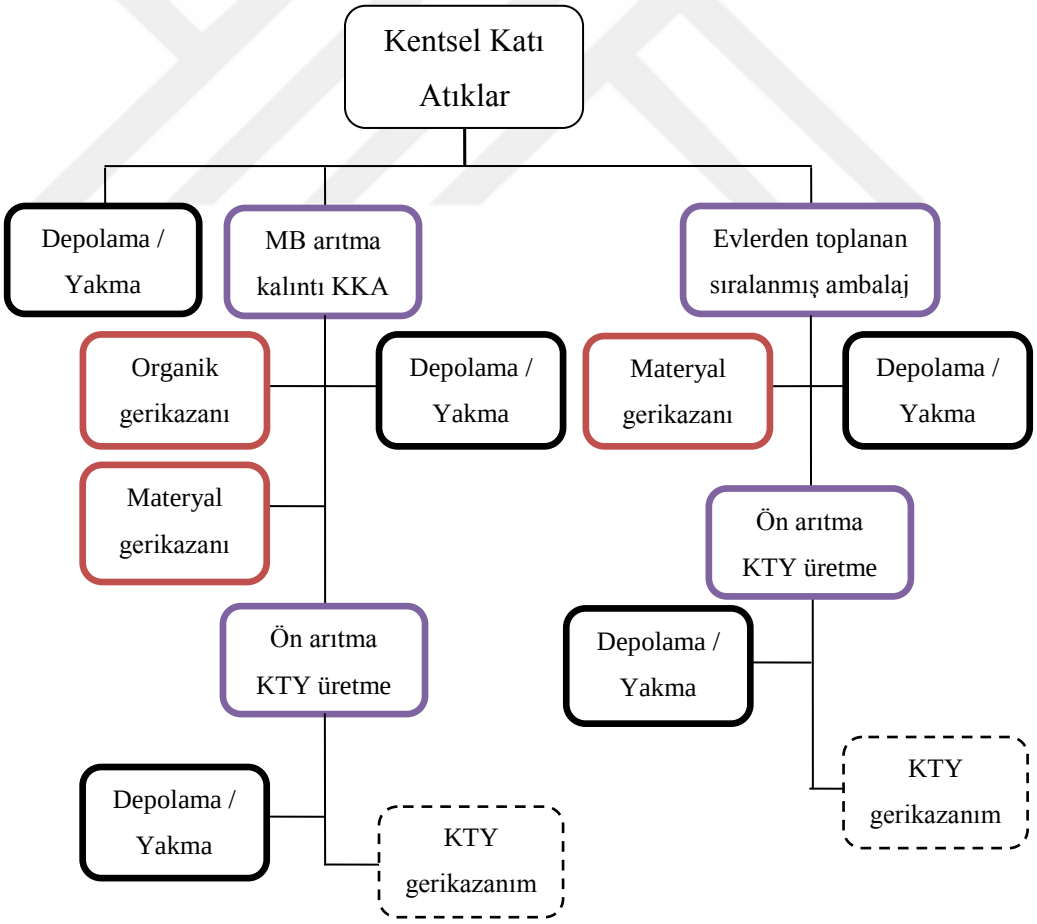
Atık yönetimi açısından kompostlaştırma, kaynakta ayırma ile üretilen atık miktarının azaltılmasını sağlayacak bir geri kazanım yöntemi olarak düşünülmektedir. Kompostlaştırma prosesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerden bazıları proseste çok önemli roller oynarken, diğerleri söz konusu bu önemli faktörlerin değişimi ve gelişimini etkilemektedir (İzzet ve diğ., 2010). Kompostlaştırmaya etki eden faktörler: organik maddenin bileşimi, karbon/azot (C/N) oranı, su miktarı, sıcaklık, pH, havalandırma, karıştırma ve tane boyutudur.

### 1.2.3. Mekanik biyolojik arıtma (MBA)

Mekanik biyolojik arıtma (MBA), mekanik, biyolojik ve fiziksel prosesin kombinasyonu ile kentsel katı atıkların değerli ürünlere (komposta benzeyen ürünler, biyogaz, degradasyon ürünleri ve stabilize edilmiş kalıntılar vb.) dönüştürülmesidir (Abeliotis ve diğ., 2012). Mekanik biyolojik arıtmanın (MBA)

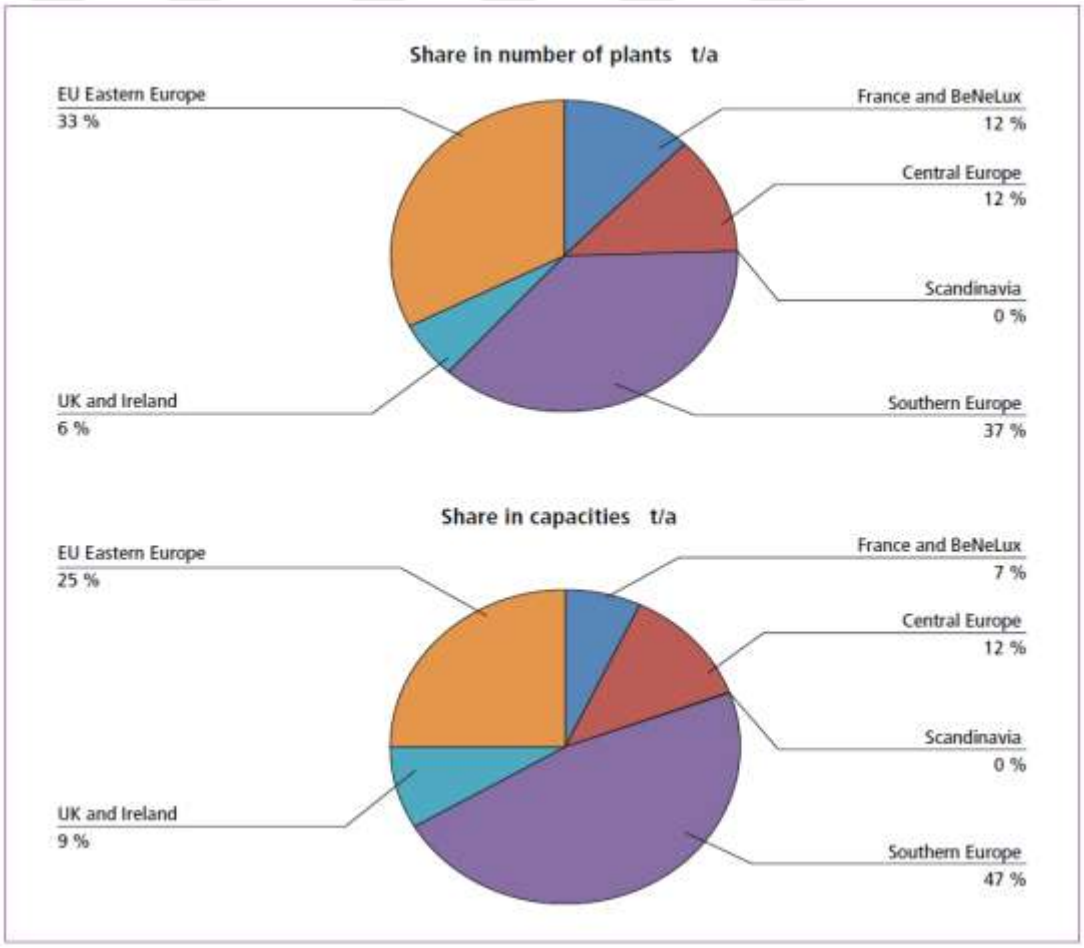
amacı: atıklarda organik maddelerin stabilize edilmesi, metan gazı ($CH_4$) emisyonunun minimize edilmesi, depolama alanlarında sızıntı suyu üretiminin önlenmesi ve depolama alanına atılacak olan atıkların nihai hacminin azaltılmasıdır. Aynı zamanda MBA, enerji geri kazanımı için atıktan yakıt üretmek üzere tasarlanabilmektedir (Velis ve diğ., 2009). KTY'nin atık yönetimindeki rolü Şekil 1.4'te gösterilmektedir.

MBA hem karışık atıklar hem de kaynağında ayrılmış atıklar için uygulanabilmektedir. Bunlara ilaveten MBA'dan elde edilen yüksek kalorifik ürün ATY olarak sınıflandırılabilmektedir. Bununla birlikte elde edilen ATY, yalnızca ayrıntılı proseslerden geçtikten sonra KTY olabilmektedir. Bu ürün, fosil yakıtlara alternatif olarak çimento fırınları ve enerji santralleri gibi enerjinin yoğun olarak tüketildiği endüstrilerde kullanılabilmektedir.




Şekil 1.4. KTY üretimi için şematik proses

MBA tesisleri Avrupa'da pek çok ülkede mevcut olup, özellikle, Almanya, İtalya, Avusturya ve İspanya'da yüksek kapasiteli tesisler kurulmuştur. Geçmiş yıllara göre MBA tesislerinin sayısı ve kapasiteleri önemli oranda artmaktadır. Avrupa'da 2015 sonu itibariyle yaklaşık 490 MBA tesisi aktif hale geçmiş; dolayısıyla yıllık olarak yaklaşık 47 milyon ton bertaraf kapasitesine ulaşılmıştır (Şekil 1.5). Ayrıca Fransa, İngiltere ve bazı Doğu Avrupa ülkelerinde de MBA sistemine geçilmekte ve önemli tesisler tasarlanmaktadır (Döing, 2015). Farklı ülkelerde farklı amaçlarla MBA kullanımı mevcuttur. Örneğin İtalya, Almanya ve Avusturya'da MBA proseslerinin kullanım amacı, depolama öncesi atıkları stabilize etmekken, diğer Avrupa ülkelerinde düşük kaliteli kompost üretimi MBA yaklaşımın bir parçasıdır. Bunların dışında, MBA uygulamalarında önemli bir gelişim kaydedilmemiştir.




Şekil 1.5. 2015 yılının sonlarında Avrupa'daki MBT tesisleri (Döing, 2015)

### 1.2.4. Biyo-kurutma prosesi

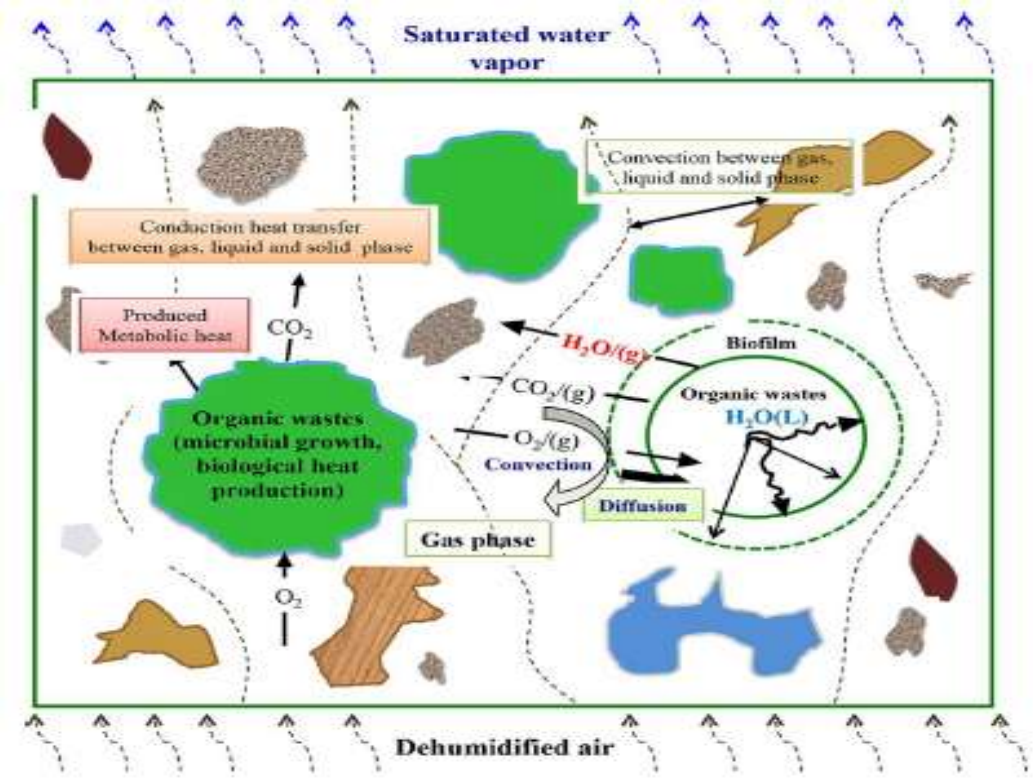
Biyo-bozunur evsel atıkların geri dönüşümünde kompostlaştırma en önemli alternatiflerden birisidir. Ancak, söz konusu kompost işleminin oldukça uzun sürmesi, istenilen kalitede bir kompostun elde edilmesinde yaşanan güçlükler ve sonuçta elde edilen kompostun değerlendirilmesi sırasında yaşanan zorluklar, biyo-bozunur atıkların bertarafında başka alternatiflerin dikkate alınmasını ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda, atıkların yakıt olarak değerlendirilmesi önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Atıkların yakılması, uygulamada yaygın bir yöntem olmakla beraber, yakılacak olan atıkların bazı şartları sağlaması beklenmektedir. Bunların içinde en önemli parametre, atığın enerji içeriğidir. Evsel katı atıklar ön işleme ile iyileştirilerek, hem hacimsel azalım sağlanması hem de enerji elde edilmesi mümkündür (Tchobanoglous ve diğ., 1993). Ancak, evsel katı atıkların nem içeriğinin yüksek olması enerji üretimini olumsuz yönde etkilemektedir. Biyo-kurutma yöntemi; havalandırma ve ısı etkisi ile başta hacim ve nem azaltımı olmak üzere iyi bir ön işlem ve çözüm olarak kabul edilmektedir (Sugni ve diğ., 2005; Rada ve diğ., 2007; Zhang ve diğ., 2008; Velis ve diğ., 2009; Shao ve diğ., 2010; Tambone ve diğ., 2011). Temel olarak biyo-kurutma, kentsel atıkları kurutmak ve kısmen stabilize etmek için mekanik-biyolojik arıtma tesislerinde kullanılan bir tür aerobik ayrıştırmadır (Velis ve diğ., 2009).

Kompostlaştırmaya benzer bir proses olan biyo-kurutma, mümkün olan en düşük bekletme süresinde (7-15 gün) yüksek kaliteli kurutulmuş malzeme üretmek için gerçekleştirilen ön arıtım işlemidir (Choi ve diğ., 2001; Velis ve diğ., 2009). Kompostlaştırmada biyokütleyi tam ayrıştırma hedeflenirken, biyo-kurutmada yüksek su içeriğine sahip olan atıklardan su içeriğinin giderilmesi hedeflenmektedir. Kısa süreli bir proses olan biyo-kurutma prosesinde, düşük uçucu katı tüketimine sahip atıklardaki yüksek orandaki nemin buharlaşması için ekzotermik reaksiyonlardan faydalanılmaktır (Rada ve diğ., 2007). Biyo-kurutma süresince nem içeriği; (1) su moleküllerinin buharlaştırılması (sıvı fazdan gaz faza değişim), (2) atıklardan buharlaşan suyun hava-akışı ile taşınması ve çıkan gazlarla giderilmesi şeklinde iki ana adımla azaltılmaktadır (Navaee-Ardeh ve diğ., 2006; Velis ve diğ., 2009; Sadaka ve diğ., 2011). Buna ek olarak, biyo-kurutma, etkili bir hacim azaltma işlemi eğilimine sahip olup, kısa süreli depolama, taşıma ve taşıma sırasında koku

emisyonunun azaltılması gibi avantajlara da sahiptir. Kompostlama işleminde, uçucu katı maddelerin tüketimi ile substratın mineralize edilmesi istenirken, biyo-kurutma prosesinde, atık maddelerin kalorifik değerini korumak için biyolojik bozunmanın azaltılması hedeflenmektedir (Zawadzka ve diğ., 2010). Biyo-kurutma prosesinin basitleştirilmiş şematik diyagramı Şekil 1.6'da gösterilmektedir.

Biyo-kurutma reaktörlerinde atıkların kurutulması, hava ve ısı yayılımı ile gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, yüksek hava akım oranları ve karıştırma ile etkin kurutma sağlanmaktadır. Biyo-kurutma, mekanik-biyolojik arıtma (MBA) tesislerinde kentsel katı atıkların işlenmesi için önemli bir alternatiftir. Biyo-kurutma sonucunda özgün emisyon yükü bakımından düşük $CO_2$ içeren bir yakıt üretilir. Avrupa Birliği'nde KTY sınıflandırmasına göre atıktan elde edilen yakıtların enerji içeriklerinin minimum 15.000 kj/kg (3.sınıf) olması gerekmektedir. Görüldüğü gibi yüksek nem içeriğine sahip olan kentsel katı atıkların yakılabilmesi için enerji içeriğinin arttırılması gerekmektedir. Bu kapsamda, biyo-kurutma yöntemiyle atıkların nem içeriğinin düşürülmesi ve dolayısıyla da enerji içeriğinin artırılması mümkün olabilecektir. Biyo-kurutmalı MBA tesislerine olan ilgi yüksek olup, gelecek yıllarda dünyada bu ilginin daha da fazla artacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak, evsel katı atıklar ve özellikle biyo-bozunur atıkların çevreye zarar vermeden bertarafı, evsel atık yönetiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu kapsamda biyo-bozunur atıkların çöp depolama sahalarında depolanması kademeli olarak azaltılması ve sonuçta tamamen yasaklanacak olması göz önüne alındığında, söz konusu atıkların bertarafında alternatif yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.




Şekil 1.6. Biyo-kurutma prosesinin basitleştirilmiş şematiği (Yang ve diğ., 2017)

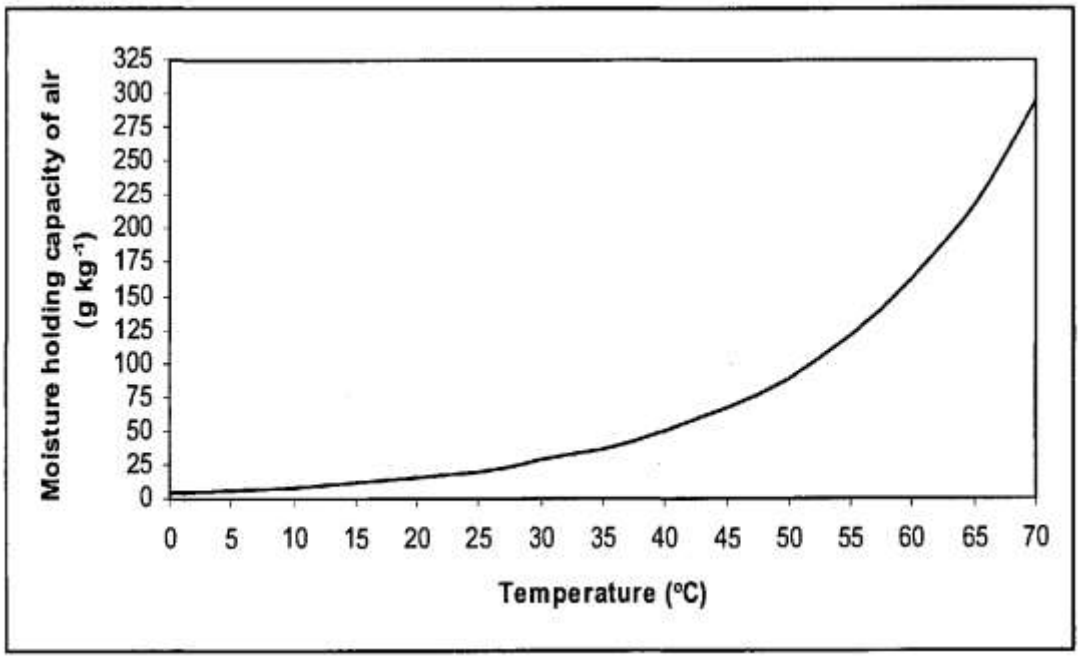
### 1.2.4.1. Biyo-kurutma prosesini etkileyen faktörler

Biyo-kurutma prosesinin performansı ve proses sonrası ürünlerin kalitesi bir çok faktöre bağlıdır. Bu faktörler: atığın fiziko-kimyasal özellikleri, başlangıç nem içeriği, hava-akış debisi, sıcaklık, gözenek arttırıcı madde, çalkalama ve karıştırmadır. Bu faktörler bağımsız olarak veya toplu olarak biyo-kurutmayı etkilemektedir. Biyo-kurutmaya etki eden faktörlerle ilgili detaylı açıklamalar aşağıda verilmiştir.

#### 1.2.4.1.1. Nem içeriği

Atıkların nem içeriği, biyolojik atık işleminin verimliliğini değerlendirmek için kritik parametrelerden birisidir. Atığın nem içeriğinin giderilmesinde kullanılan kurutma işlemlerinde sıcaklık ile katlanarak artan havanın su tutma kapasitesi kurutma süresini önemli ölçüde etkilemektedir. (Şekil 1.7). Adani ve diğ. (2002)'ye göre hızlı biyo-kurutma, 45 °C'ye yakın biyokütle sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Atığın başlangıç nem içeriği, mikrobiyal büyüme ve biyolojik bozunma ile ilgili biyokimyasal reaksiyonları etkilediğinden dolayı da biyo-kurutma işlemlerinde göz önünde bulundurulması gereken parametrelerden birisi olmaktadır. (Ryckeboer ve diğ., (2003). Başlangıç nem içeriğinin çok yüksek olması oksijen taşınımını

sınırlarken mikrobiyal aktiviteyi azaltır ve buna bağlı olarak da biyo-kurutmayı engeller (Navaee-Ardeh ve diğ., 2011). Buna karşılık, başlangıç nem içeriğinin düşük olması, mikrobiyal aktivite yavaşlaması sonucu kurutma performansının azalmasına neden olur. Etkili biyo-kurutma sağlanabilmesi için proses esnasında atık matrisinin başlangıç nem içeriği azaltılarak yüksek porozite sağlanması gerekmektedir (Yang ve diğ., 2014; Komilis ve diğ., 2011; Liang ve diğ., 2003; Petric ve diğ., 2009; Tremier ve diğ., 2009). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde biyo-kurutma işlemi uygulanan kentsel katı atıklar, kağıt hamuru ve kağıt, tarımsal atıklar ve atıksu arıtma çamurları için % 50 - 70 optimal nem içeriği ile çalışıldığı görülmektedir (Velis ve diğ., 2009; Zawadzka ve diğ., 2010). Daha yüksek nem içeriğine sahip evsel atıklarda biyo-kurutma yöntemi ile ilgili detaylı bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle yüksek nem içeriğine sahip gıda atıklarının biyo-kurutulması, bu çalışmanın temel araştırma alanı olarak ele alınmıştır.




Şekil 1.7. Biyo-kurutmada sıcaklığın havanın su tutma kapasitesi üzerine olan etkisi (Skourides, 2009)

Susuzlaştırılmış arıtma çamuru, gıda ve bahçe atığı gibi çoğu organik atıkların tipik nem içeriği ağırlıkça yaklaşık % 80 olup yüksek oranda su içermektedir. Bu aşırı nem içeriği partikül agregasyonunu etkileyerek boşluk alanını azaltmaktadır. Matristeki etkili hava hareketinin engellenmesi sonucu da aerobik bozunma kısıtlanmaktadır (Luo ve diğ., 2008; Chang ve diğ., 2010). Ayrıca aşırı nem, katı

parçacıklar arasındaki serbest hava boşluğunu (SHB) kolayca tıkamaktadır. Atık matrisi içerisindeki havanın miktar ve hareketinin belirlenmesinde SHB önemlidir. Genel olarak nem içeriği ile SHB'nin ters orantılı olduğu kabul edilmektedir. Mutfak atıklarının biyo-kurutulmasında başlangıç nem içeriği üst sınırı % 71,7 olarak kabul edilmektedir (Song ve diğ., 2017; Shao ve diğ., 2010).

#### 1.2.4.1.2. Hava-akış debisi

Literatürde biyo-kurutma işleminde proses kontrolü için hava-akış oranının hem laboratuvar hem de endüstriyel uygulamalarda temel işletme parametresi olduğu tespit edilmiştir. Hava-akış oranı hem matris sıcaklığını hem de kurutma verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Bu faktörün biyo-kurutma üzerine etkisi yakın geçmişte birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Adani ve diğ., 2002; Frei ve diğ., 2004; Navaee-Ardeh ve diğ., 2006; Sugni ve diğ., 2005). Skourides ve diğ. (2006) belediye katı atıklarının organik fraksiyonunun biyo-kurutulması ile ilgili yaptığı çalışmada, yüksek havalandırma oranlarında maksimum kurutma verimi elde etmiştir. Colomer-Mendoza ve diğ. (2013) ise bahçe atıklarının biyo-kurutmasında yüksek hava-akımı ile daha fazla ağırlık kaybının sağlandığını (% 40-57) ve düşük hava-akımında ise sızıntı suyu oluştuğunu göstermiştir. Yüksek hava-akımı daha fazla su giderimine neden olmasına rağmen, fiziksel kurumaya da neden olduğundan dolayı biyo-kurutma işlemlerinde optimal hava-akış oranının belirlenmesi gerekmektedir (Colomer-Mendoza ve diğ., 2013). Cai ve diğ. (2013), atıksu arıtma çamurunun biyo-kurutulmasında etkin havalandırmayı, matris sıcaklığını ve buharlaşmayı kontrol etmiş ve bunların su kaybını etkileyen bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, hava-akış oranındaki artış, taşınan suyun miktarını, su kaybını ve yüksek kalorifik değere sahip ürün miktarını arttırır. Buna karşın düşük hava-akış oranları uygulandığında önemli oranda nem içeriği giderilmezken sistemde ayrışma reaksiyonlarının arttığı belirlenmiştir (Cai ve diğ., 2013).

#### 1.2.4.1.3. Sıcaklık

Biyo-kurutma prosesinde sıcaklık parametresi su giderme oranını, biyolojik aktiviteyi ve enerji verimliliğini etkilediğinden dolayı önemli bir faktördür. Biyo-kurutma prosesi süresince tek yönlü hava kaynağı kullanımı sıcaklık gradienti oluşumuna katkı sağlar ve bu durum da çıkış matrisinin nem ve enerji içeriğinde

homojenite eksikliğine neden olur (Adani ve diğ., 2002; Sugni ve diğ., 2005). Buna karşın, Sugni ve diğ. (2005), reaktörlerle gerçekleştirilen biyo-kurutma prosesinde hava-akımının günlük çevriminin sıcaklık farklılıklarını ortadan kaldırdığını ve homojen bir nihai ürün elde edilmesine yol açtığını ileri sürmüştür.

Hava-akış oranının artması atıklardan nem kaybına pozitif etki yaratmasına rağmen, sıcaklık ve kalorifik değerleri üzerinde hiçbir etkisi yoktur (Zawadzka ve diğ., 2010). Margesin ve diğ. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, haftada iki kere döndürülen atık matrisinde 48 ± 5 $^{o}$C sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, kompostlama için düşük nem içeriği, düşük ortam sıcaklıklarından daha önemli bir sınırlayıcı faktördür. Karışık organik atık kompostlama çalışmalarında kış mevsimde maksimum 65 $^{o}$C'ye ve yaz mevsimde maksimum 71 $^{o}$C'ye ulaşılmıştır (Szabová ve diğ., 2010). Frei ve diğ. (2004) ve Navaee-Ardeh ve diğ. (2006), biyo-kurutma işlemi sırasında yüksek sıcaklıkların (>55 $^{o}$C) nemin buhar haline dönüşmesini arttırdığını ve ayrıca daha fazla nemi dışarıya atmak için matristen geçecek hava-akımının buhar basıncına ulaşmasını kolaylaştırdığını belirtmiştir.

#### 1.2.4.1.4. Gözenek arttırıcı (GA) madde

Gözenek arttırıcı madde, başlangıç nem içeriğini ve serbest hava boşluğunu (Free Air Space, FAS) ayarlamak için kullanılmaktadır. Proseste kullanılan GA madde yapısal destekle, yüksek porozite elde edilmesini sağlayarak, atık matrisleri içinde daha kolay oksijen taşınmasına olanak vermektedir. Biyo-kurutmada GA maddenin rolü ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Zhou ve diğ., 2014; Iqbal ve diğ., 2010; Frei ve diğ., 2004; Choi ve diğ., 2001; Zhao ve diğ., 2011; Yang ve diğ., 2014; Zhao ve diğ., 2012; Colomer-Mendoza ve diğ., 2013). Yang ve diğ. (2014), hava ile kurutulmuş çamurun, gözenekli yapısı ve yüksek su tutma kapasitesi nedeniyle GA madde olarak kullanıldığında, parçalanmış kauçuk ve talaşa kıyasla daha uygun bir biyolojik bozunma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bunun nedeni, hava ile kurutulmuş çamurun gözenekli yapısı ve yüksek su tutma kapasitesinden kaynaklanmaktadır (Yang ve diğ., 2014). Bu çalışmaya göre parçacıkların daha küçük veya daha ince olması ile substratın su tutma kapasitesinin daha güçlü olacağı sonucuna varılmıştır. Etkili biyo-kurutma prosesi için kullanılan GA maddenin fiziksel yapısını ve biyolojik parçalanabilirliğini dikkate almak

gerekmektedir. Zhao ve diğ. (2012) çalışmasında küçük partiküllü GA maddenin, büyük partikül boyutuna sahip GA maddeye kıyasla % 0,3 daha düşük su içeriğine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte biyo-kurutma prosesinde saman, talaş ve kombinasyonları kullanıldığında, talaşın bozunma kapasitesi düşük olmasına rağmen önemli biyolojik parçalanma potansiyeline sahip olduğu görülmüştür (Zhao ve diğ., 2011). Başka bir çalışmada bahçe atığına % 15 oranında GA madde ilave edildiğinde % 25 oranında neminin azaldığı görülmüştür (Colomer-Mendoza ve diğ., 2013). Küçük partikül boyutundaki parçacıklar, matriste yeterli gözeneklilik ve iç homojen gözenek boyutu dağılımı sağladığından dolayı biyo-kurutma prosesinde tercih edilmektedir. Bu özellikler etkin su emme oranını arttırmaktadır. Ancak küçük parçacıklı GA maddeler, biyo-kurutma esnasında sıkışmaya neden olabilmekte ve bu da nem giderimi üzerinde olumsuz etkiye neden olabilmektedir (Gea ve diğ., 2007).

#### 1.2.4.1.5. Karıştırma

Mikrobiyal aktivite, karıştırma sıklığından etkilenmektedir. Karıştırma işlemi biyo-kurutma sırasında yüksek mikrobik aktiviteyi sürdürmek için önemli bir faktördür. Mikroorganizmaların dağılmasını ve atık parçacıklarının fiziksel olarak parçalanmasını kolaylaştırır ve mikrobik büyüme için mevcut yüzeyin artmasını sağlar. Bunun dışında karıştırma, besin ve oksijen taşınmasını kolaylaştırır. Karışma işlemi, havalandırmayı artırmak için matris yapısı açılıp reaktöre giren yeni havaya daha fazla yüzey alanı sağlar ve böylece biyo-kurutma prosesinin hızlanmasına ve zamanla organik matrisin içeriğinin düşmesine neden olabilir.

### 1.3. Katılardan Türetilmiş Yakıt (KTY) Üretimi

Daha önce belirtildiği gibi KTY genellikle, tehlikeli olmayan atıklardan hazırlanmakta ve yakma tesislerinde enerji geri kazanımında kullanılabilmektedir. İtalya'da 1998 yılına kadar İngilizce RDF terimi kullanılmış, sonra İtalyanca çevirisi olan ‘Combustibili derivato di rifiuti – CDR terimi onun yerini almıştır. Hollanda'da, biyokütle ile diğer yüksek ısıl değere sahip atıklar arasında ayırım yapmak için SRF (KTY) kullanılmıştır. Üretilen yakıt, CEN standartlarında belirtilen sınıflandırma ve spesifikasyon gereksinimlerini karşılamalıdır (Velis ve diğ., 2013). KTY, uluslararası kaynak ve enerji verimliliği gündemine önemli katkıda bulunmaktadır. Genel olarak, KTY işleme tesislerinin girdileri, değişik koşullar altında üretilen atıkların bir

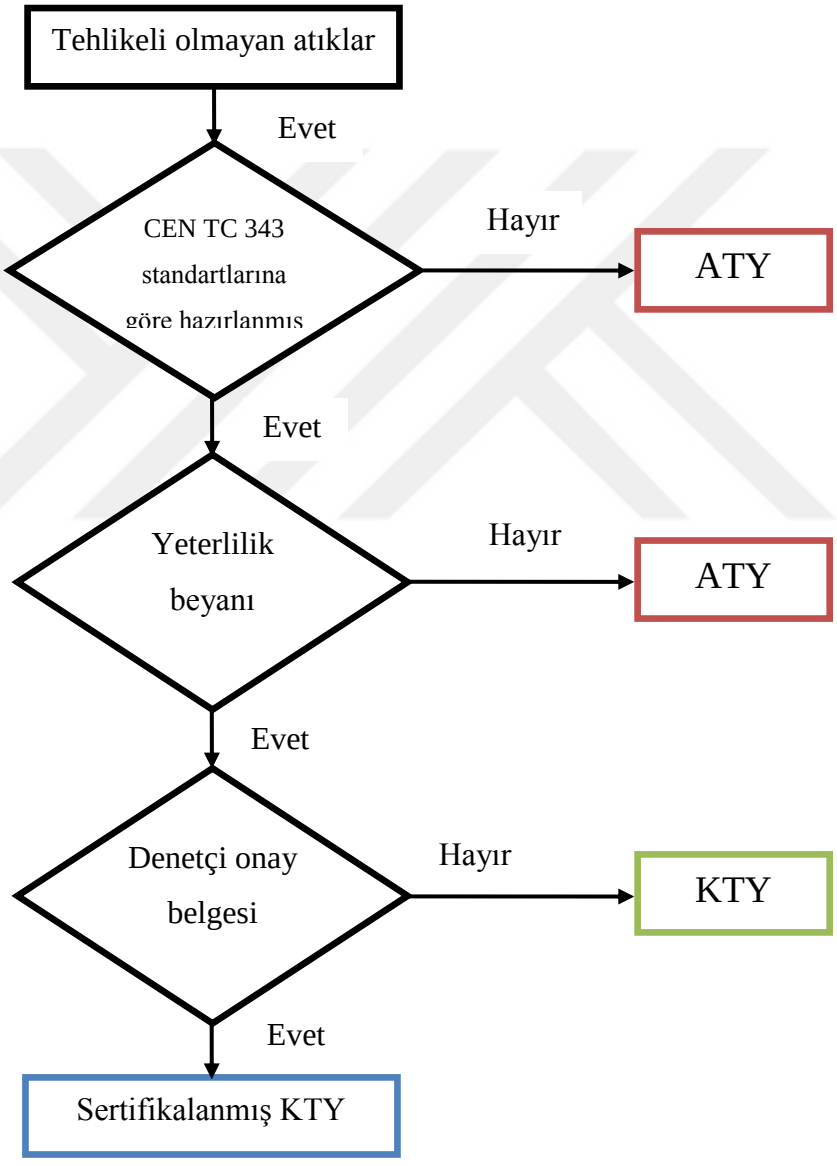
karışımıdır. Tehlikeli olmayan katı atıklar, evsel ve ticari katı atıklar ile ambalaj atıkları gibi yüksek kalorifik değerli atıkları ve arıtma çamuru, inşaat ve yıkım atıkları gibi üretilen spesifik atıkları içermektedir (Ragazzi ve Rada, 2012; Rada ve Andreottola, 2012). Buna karşılık yakıt veya KTY üretimi için kullanılan en popüler atık grupları kağıt, hurda lastikleri, plastik atıklar ve odun atıklarıdır. Yüksek kalorifik değere sahip bu atıklar, enerji geri kazanımlı yakma tesislerinde, alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır.

KTY tesislerinde Mekanik Biyolojik Arıtma Tesisi (MBT) işlemlerinden çıkan atıklar da kullanılabilir. Maddesel Geri Kazanım Tesisleri (MRF), Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY), ön arıtma, komposlaştırma (havalı arıtma) gibi prosesler Mekanik Biyolojik Arıtma ünitelerine örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada kullanılan KTY, biyo-kurutma işlemine maruz kalan yakıt veya biyolojik olarak kurutulmuş malzeme (bio-dried material) olarak ifade edilmektedir. Mekanik-biyolojik arıtma (MBA)'da biyo-kurutma ile edilen KTY, pratik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir atık arıtma çözümüdür ve önemli miktarda biyo-bozunur atığın depolama alanlarında bertarafını önlemeye yönelik olarak uygulanmaktadır. Atıkların biyolojik olarak kurutulmasına yönelik çalışmalar olmasına karşın, kurutma sistemini etkileyen parametrelerin optimizasyonuna yönelik bir çalışma görülmemiştir (Choi ve diğ., 2001; Adani ve diğ., 2002; Sugni ve diğ., 2005). Yaptığımız çalışmada yüksek nem içeriğine sahip gıda atıklarının biyo-kurutma yöntemi ile kurutulması ve bu yöntemi etkileyen faktörlerin kontrolü ile optimizasyonu detaylı olarak çalışılmıştır.

### 1.4. KTY / ATY'nin Kalitesi ve Sınıflandırılması

Literatüre göre ATY'yi sınıflandırmak için ilk yaklaşım Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) tarafından geliştirilmiştir. Bu kapsamda ATY, işleme türüne bağlı olarak yedi sınıfa ayrılmıştır (Alter, 1996). Bununla birlikte bu sınıflandırma, ATY'in kalitesine bağlı pazarlanabilirliğini sınırlandıran herhangi bir fiziksel ve kimyasal bir parametre içermemektedir. Pazar gereksinimlerini karşılamak için alternatif bir yakıt olarak KTY ortaya çıkmıştır. Tehlikeli olmayan atıklardan elde edilen KTY standartları ve teknik şartnamesi için Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından bir teknik komite kurulmuştur (CEN, 2007). KTY ile ilgilenmek üzere 2006 yılında oluşturulan CEN çalışma grubu tarafından KTY'lar için

sınıflandırma sistemi CEN/TSE 15359:2006:E standartı yayınlanmıştır. ATY ve KTY arasındaki farklar Şekil 1.8'de verilmektedir. Bu kapsamda standardize etme yaklaşımı; KTY üretim teknolojilerinin belirlenmesine, bu alanda faaliyette bulunacak kuruluşların teknolojik yeterliliklerine, lisanslandırma ihtiyaçlarının kolaylaştırılmasına ve KTY kullanıcılarının da proses ve teknolojik alt yapıları ile ilişkili olarak hangi KTY türlerini kullanabileceklerinin belirlenmesine fayda sağlayacaktır.




Şekil 1.8. ERFO'e göre ATY ve KTY arasındaki farkılar (ERFO, 2017)

KTY kalitesi, giren atık maddeler ve üretim teknolojisinden önemli ölçüde etkilenmektedir (Nasrullah ve diğ., 2013). KTY sınıfları, ekonomik (kalorifik değer), teknik (klor içeriği) ve çevresel parametrelerin (cıva içeriği) için belirlenen sınır değerlerle kıyaslama yapmak suretiyle tanımlanmaktadır. KTY'nin özellikleri ve sınıflandırılması, CEN15359 dokümanında verilen metodolojiye göre oluşturulmuştur ve sınıflandırma her parametre için beş sınıf içermektedir. KTY sınıflandırma sistemi Tablo 1.1'de verilmiştir. Sınıflandırmanın genişletilmiş versiyonu ise Tablo 1.2'de gösterilmektedir. Sınıf kodları, sınıf sayılarının bir birleşiminden oluşmaktadır. Her parametre aynı derecede önemlidir ve dolayısıyla kodlar tek bir sınıf numarası ile belirlenemez. Sınıf kodlarının belirlenmesinde her bir parametre birlikte değerlendirilmelidir. Bununla beraber, KTY göstergesi olarak her parametre, numuneler için belirlenmiş planlara, numune hazırlama ve analitik tekniklere göre belirlenmektedir. KTY'nin ticari değer açısından, yüksek korozyon potansiyeline sahip klor içeriği önemlidir.

Tablo 1.1. Katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için (SRF) sınıflandırma sistemi (CEN/TS 15359)

| Özellik kategori | Sınıflandırma özelliği | Tasarım sembol | Birim | İstatistiksel ölçü | Sınıflar | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Ekonomik | NCV[d] | $Q_{p.net}$ | MJ/kg | Orta[a] | ≥25 | ≥20 | ≥15 | ≥10 | ≥3 |
| Teknoloji | Klor | Cl | % w/w | Orta[a] | ≤0,2 | ≤0,6 | ≤1,0 | ≤1,5 | ≤3,0 |
| Çevre | Cıva | Hg | Mg/MJ | Ortan[b] | ≤0,02 | ≤0,03 | ≤0,08 | ≤0,15 | ≤0,5 |
| | | | | $80^{th}$ [c] | ≤0,04 | ≤0,06 | ≤0,16 | ≤0,30 | ≤1,0 |

[a] ortalama; [b] ortanca; [c] persantil; [d] Net kalorifik değer

Tablo 1.2. Sınıflandırmanın genişletilmiş versiyonu

| Özellikler | Birim | Sınıf 1 | Sınıf 2 | Sınıf 3 | Sınıf 4 | Sınıf 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Biyokütle içeriği (ar) | % (ortalama) | ≥90 | ≥80 | ≥60 | ≥50 | <50 |
| Net kalorifik değeri (ar) | MJ/kg (ortalam) | ≥25 | ≥20 | ≥15 | ≥10 | ≥6,5 |
| Nem içeriği | %wt/wt (ortalama) | ≤10 | ≤15 | ≤20 | ≤30 | <40 |
| Klor içeriği (d) | %wt/wt (ortalama) | ≤0,2 | ≤0,6 | ≤0,8 | - | - |
| Kül içeriği (d) | %wt/wt (ortalama) | ≤10 | ≤20 | ≤30 | ≤40 | <50 |
| Yığın yoğunluğu (ar) | $kg/m^3$ (ortalama) | >650 | ≥450 | ≥350 | ≥250 | ≥100 |
| Civa (Hg) (ar) | Mg/MJ (ortanca) | ≤0,02 | ≤0,03 | ≤0,06 | - | - |
| Kadmiyum (Cd) (ar) | Mg/MJ (ortanca) | ≤0,1 | ≤0,3 | ≤1,0 | ≤5.0 | ≤7,5 |
| Toplam ağır metaller (ar) | Mg/MJ (ortanca) | ≤15 | ≤30 | ≤50 | ≤100 | ≤190 |

EN 15359 sınıflandırma sisteminin dışında, Finlandiya, Italya, Almanya, İsveç, Birleşik Krallık (İngiltere), Belçika ve Hollanda gibi farklı ülkeler tarafından farklı KTY standartları da belirlenmektedir (Tablo 1.3). Ancak, bu standartlar spesifik olarak çimento sektörü içindir.

Tablo 1.3. Farklı ülkelerdeki SRF özellik karakteristikleri

| Özellikler | Birim | Italya | İspanya | Finlandiya (Sınıf I) | İsviçre |
|---|---|---|---|---|---|
| Nem içeriği | % | <25 | <1 | NA | <10 |
| Kalorifik değeri | kJ/kg | 15.000 | >20.920 | NA | 25,1-31,4 |
| Kül içeriği | % | 20 | <10 | NA | 0,6-0,8 |
| Klor içeriği | % (m/m) | 0,9 | NA | <0,15 | <1 |
| Kükürt içeriği | % (m/m) | 0,6 | <3 | <0,20 | <0,5 |
| Azot içeriği | % (m/m) | NA | <3 | <1,00 | NA |
| Potasyum ve sodyum içeriği | % (m/m) | NA | NA | <0,20 | NA |
| Alüminyum | % (m/m) | NA | NA | NA | NA |
| Civa | Mg $kg^{-1}$ | NA | NA | <0,1 | <5 |
| Kadmiyum | Mg $kg^{-1}$ | NA | NA | <1,0 | <5 |
| Kurşun | Mg $kg^{-1}$ | 200 | <2.500 | NA | <100 |
| Bakır | Mg $kg^{-1}$ | 300 | NA | NA | NA |
| Manganez | Mg $kg^{-1}$ | 400 | NA | NA | NA |
| Krom | Mg $kg^{-1}$ | 100 | <1.500 | NA | <30 |
| Tutya | Mg $kg^{-1}$ | 500 | NA | NA | <2000 |
| Nikel | Mg $kg^{-1}$ | 40 | NA | NA | <10 |
| Arsenik | Mg $kg^{-1}$ | 9 | NA | NA | NA |
| Kadmiyum + Cıva | Mg $kg^{-1}$ | 7 | NA | NA | NA |

Yukarıda belirtildiği gibi, KTY, Avrupa standardizasyon komitesi (CEN) tarafından geliştirilen standartlara ve spesifikasyonlara göre sınıflandırılmaktadır. KTY yönetmeliklerine göre atığın yakıt derecelendirilmesinin yapılabilmesi için ekonomik (kalorifik değer, nem içeriği, biyokütle içeriği), teknik (klor içeriği, kül içeriği) ve çevresel parametrelerin (ağır metaller, PAH, PCB) incelenmesi gerekmektedir. Buna ilaveten bu anahtar parametrelerin her birinde belirlenmesi gereken başka parametreler de vardır. Ekonomik özelliklerine dayalı parametrelerle ilgili detaylı açıklamalar aşağıda verilmektedir.

### 1.4.1. Ekonomik parametreler

KTY'nin ekonomik parametreleri, yakıtın mali değerini etkileyen değişkenlerdir (enerji üretimi, atık depolamada kapı masrafları, devlet teşviği vb.). Bir atığın yakıt

olarak kullanılabilme ekonomisini etkileyen özellikler aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

#### 1.4.1.1. Biyokütle içeriği

KTY'nin biyokütle içeriği, biyo-bozunur atık fraksiyonlarından oluşup, genellikle biyojenik karbon (C-14) yüzdesi ile temsil edilmektedir. Bu parametre, iki nedenden ötürü ekonomik kapsamda çok önemlidir:

(1) Biyo-bozunur atık fraksiyonlarından üretilen elektrik ve/veya ısı, yenilenebilir enerji olarak karakterize edilmektedir. Bu enerji, devletten yenilenebilir yükümlülük sertifikaları – Renewable Obligations Certificates (ROC) ödemeleri almak için uygun olabilmektedir.

(2) Atıkların biyokütle içeriği bilindiğinden, atıkların düzenli depolamadan başka yöne çevrilmesi nedeniyle, depolama maliyetlerinden tasarruf edilmesine yardımcı olmaktadır.

#### 1.4.1.2. Kalorifik değer

Kalorifik değer, bir yakma tesisinde kentsel katı atıkların organik kısmının yanması sonucu açığa çıkan enerji içeriği olarak tanımlanır ve kentsel katı atığın enerji içeriğini ifade etmede kullanılabilan bir parametredir (Chang ve diğ, 2007). Genel olarak herhangi bir yakıtın kalorifik değeri, tamamen yakıldığında üretilen ısının veya enerjinin miktarını ifade etmektedir. Kalorifik değer, üst kalorifik değer (Gross Calorific Value, GCV) veya net kalorifik değer (Net Calorific Value, NCV) olarak ifade edilir. NCV, GCV'den, yakıttaki nem nedeniyle meydana gelen su buharındaki ısının çıkarılması elde edilen hesaplama yöntemiyle belirlenir. NCV, hesaplanabilmesi için öncelikle laboratuvarda nem içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bir yakma tesisinde ilave yakıt kullanmaksızın enerji elde etmek için kalorifik değeri 8.000-9.000 kJ/kg olmalıdır (CEN, 2010). Dolayısıyla kentsel katı atıkların yanabilirliğinin incelenmesinde en önemli parametrelerden biri olan kalorifik değer ne kadar yüksek olursa yanabilirlik de o derece artacaktır. Bunun sonucunda NCV, kalorifik değerin daha temsili bir sonucunu vermektedir. İngiltere'de bulunan Cardiff Üniversitesi'nin yaptığı bir araştırmaya göre; ATY'nin kalorifik değeri diğer kentsel atığa göre çok daha yüksektir. Örneğin Roma'da

ATY’nin enerji içeriği 4.895 kcal/kg iken Dudley yakma tesisinde bu değer 2.388 kcal/kg’dır (Soylu, 2006).

#### 1.4.1.3. Nem içeriği

Nem içeriği, KTY'de bulunan suyu tanımlanmaktadır. Nem içeriği atığın diğer fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini etkilemekte olup, bu etkinin büyüklüğü atık bileşenlerine göre değişmektedir. Nem içeriği KTY'nin kalorifik değeri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Nem içeriği azalırken, kalorifik değer artmaktadır (Khan ve diğ. 2009).

### 1.4.2. Teknik özellikler

Teknik parametreler, yakma tesislerinin performansını etkileyen karakteristik özelliklerdir. Atık tesislerindeki enerjinin performansını etkileyebileceklerinden dolayı, KTY'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri önemlidir. Atıktan üretilen enerji tesislerinde normal işletme esnasında önemli bir etkiye neden olabilecek KTY parametreleri teknik özelliklere göre gruplandırılmıştır. Bu özellikler, KTY'yi kullanmak için gerekli işletme parametrelerini etkilediklerinden dolayı önemlidir.

#### 1.4.2.1. Klor içeriği

Klor içeriği KTY’nin kullanmasındaki başlıca sorunlardan birisidir ve bu nedenle KTY'nin pazarlanabilirliğini sınırlandıran bir faktördür. Aynı zamanda klor içeriği, geri kazanılmış yakıt sınıfını belirlemek üzere kullanılan parametrelerden birisi olup, mevcut sınıflandırmalarda atık yakıt içindeki ağır metal ve klor miktarının düşürülmesin amaçlanmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak CEN TC 343 tarafından bazı standartlar oluşturulmuş ve bu standartlara göre klor oranının % 3 civarında olması gerektiği ifade edilmiştir. Yani içinde organik klor bulunduran plastikler, örneğin özellikle PVC, sınırlı bir oranda kabul edilebilmektedir (Pretz ve diğ., 2003). KTY'nin yüksek bir klor içeriği ile yakılması korozyona ve yanma odasının curuf bağlamasına neden olabilmektedir. Yakma sırasında klor varlığı hidroklorik asit (HCl) emisyonlarını artırabilir ve poliklorlu dibenzo-para-dioksin (PCDD) ile poliklorludibenzofuran (PCDF) oluşumlarına neden olabilmektedir (Velis ve diğ., 2012). Klor, oldukça yüksek elektronegatif bir halojendir ve aşağıdaki atıklarda mevcutur:

(1) Sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) tuzları içeren organik gıda atıkları

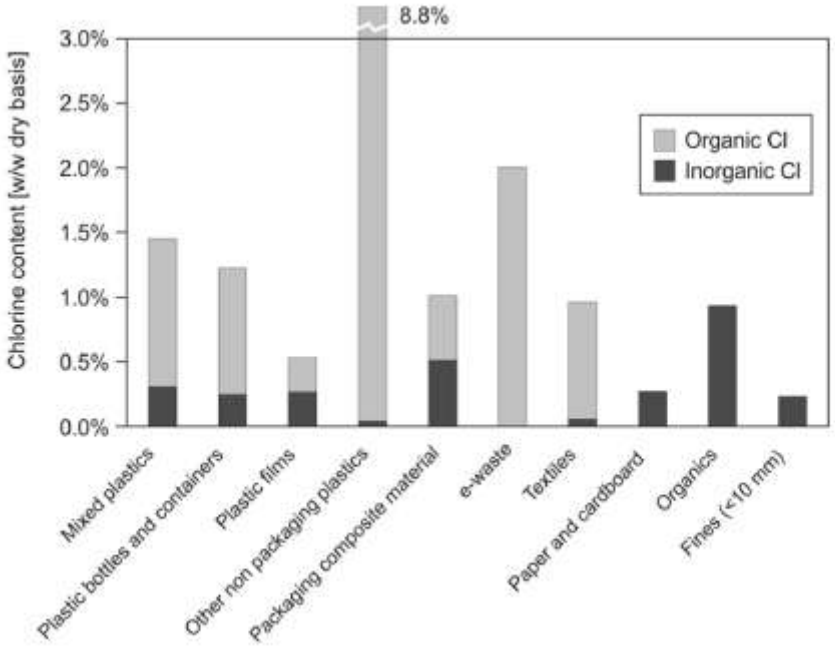
(2) Halojenli plastik torbalar

(3) Borularda ve izolasyon kablosu bulunan polivinil klorür (PVC)

(4) Beyazlanmış kağıt ve odun hamuru

(5) Endüstriyel solventler (örneğin yağ gidericiler, temizleme solüsyonu, boya tinerleri, pestisitler, reçine ve tutkallar).

Klor içeriği ve diğer ilgili yakıt parametrelerinin (kalorifik değeri; nem içeriği vb.) sınır değerleri, kullanım türüne bağlıdır. Kalorifik değer için göreceli olarak geniş bir aralık kabul edilirken (11-30MJkg$^{-1}$ (ar)), klor içeriği <1 to < % 0.5 w/w (d) ile sınırlandırılmaktadır (Thiel, 2007). Ağır metal konsantrasyonu Avrupa Birliği Atık Yakma Direktifi (2000/76/EC) tarafından emisyon limitlerine göre sınırlandırılmıştır (EU Commission, 2000). Maystre ve Viret (1995), Kost (2001) ve Marb ve diğ., (2003) yapmış oldukları çalışmalarda, kentsel katı atıklarda plastik ve ambalaj atıklarını (özellikle ambalaj dışı plastik ürünler, elektronik atıklar, ayakkabılar, kompozit atıklar, lastikler ve deriler) klorun ana kaynağı olarak tespit etmişlerdir. Bu maddelerdeki toplam klor içeriği % 2'den (w/w dry basis) daha fazladır. Kentsel katı atıklarda klor içeriğini belirleyen iki farklı çalışmanın sonuçları Şekil 1.9 verilmiştir.




Şekil 1.9. Çeşitli atık bileşenlerin klor içeriği (Rotter ve diğ., 2007; data after Schirmer ve diğ., 2005; Hoffmann ve diğ., 2007)

#### 1.4.2.2. Kül içeriği

Kül, tam yakma işleminden sonra atılan KTY'nin inorganik ve yanmaz mineral fraksiyonudur. Mineral fraksiyon, yakıtta bulunan yanıcı olmayan minerallerden oluşur ve işlem sırasında yakıta eklenebilecek kontaminanttır. Atıkların kül içeriği, enerji içeriği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Atığın içindeki kül miktarı arttığında kalorifik değer azalmaktadır. Kül içinde bulunan tipik elementler: silisyum (Si), aluminyum (Al), demir (Fe), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), sodyum (Na), potasyum (K), kükürt (S) ve fosfor (P)'dur. Her parametrenin konsantrasyonu, KTY'nin bileşimine göre değişmektedir. Kül içeriği, KTY'nin teknik özelliklerine dahil olduğundan dolayı:

(1) Yüksek kül içeriği içeren KTY'de partikül emisyonu miktarını azaltmak için etkili bir toz giderme sistemi gerekecektir.
(2) Yüksek kül içeriğe sahip KTY, daha düşük kalorifik değere sahip olacaktır.
(3) Külün elemental kompozisyonu, külün sinterlenme, yumuşatılma ve ergime sıcaklığı parametreleri ile belirlenir. Bu nedenle külün işlenmesi ile ilgili problemleri önlemek amacıyla yakma sıcaklığına karar verilirken kül içeriği önemli bir parametre olmaktadır.

#### 1.4.2.3. Yığın yoğunluğu

Yığın yoğunluğu, belirli bir hacmi işgal edebilen yakıtın kütlesi olarak tanımlanır. Bu parametre yakıtın hem ekonomik hem de teknik nedenlerden ötürü en önemli fiziksel özelliği olarak düşünülmektedir. Ayrıca yığın yoğunluğu atıkların aktarılmasını, depolanmasını ve taşınmasını etkilemektedir. Yakıtın yığın yoğunluğu, kullanılan yakıt hazırlama tekniği ile belirlenmektedir. Bu teknikler; ayrıştırma, biyolojik olarak arıtma, parçalama, öğütme, dilimleme, elekten geçirme, kurutma ve sıkıştırmadır. Düşük yığın yoğunluğu aşağıda belirtilen dezavantajlarından dolayı KTY'nin teknik özellikleri arasında gösterilen bir parametredir:

(1) Yığın yoğunluğu düşük olduğunda birim hacim başına düşen kalorifik değer daha düşük olabilmektedir.
(2) Süreci kontrol etmek zor olabilmektedir.
(3) Yakıtı depolamak için daha fazla alan gerekebilmektedir.
(4) Daha fazla yakıt gerekeceğinden dolayı nakliye masraflarını arttırabilmektedir.

(5) Düşük yığın yoğunluğu sahip atıktan türetilmiş yakıtlar bazı teknolojiler için uygun olmayacaktır.

### 1.4.3. Çevresel parametreler

KTY termal olarak arıtıldığında, bazı elementlerin varlığı zararlı emisyonlara neden olabilmektedir. Bu elementler cıva (Hg), kadmiyum (Cd) ve diğer ağır metallerdir (Mg, Na, K, S vb.). Cıva (Hg) ve kadmiyum (Cd), sağlığa orta ve uzun vadeli etkisinden dolayı, en önemli küresel çevre kirleticilerinden biri olarak kabul edilmektedirler (Rice ve diğ., 2014). Kentsel Katı Atıklardan (KKA) türetilmiş yakıtlar, seçilmiş ticari atıklardan türetilmiş KTY'ye nazaran genellikle daha düşük Net Isıl Değer'e (NCV – Net Calorific Value) sahiptir. KKA'dan türetilmiş KTY'lerin cıva (Hg) değeri daha yüksektir. Bununla beraber, Hg için elde edilen maksimum değer, ticari atıklardan türetilmiş KTY'nin Hg değerine göre kayda değer bir fazlalık göstermemektedir. KTY kullanımından kaynaklanan en önemli etkilerin başında ağır metaller gelmektedir. Bazı metallerin hemen hemen tamamı, yakma sisteminden kararlı bir şekilde tutulmuş olarak çıkmaktadır. Tl (Talyum) ve Hg (Cıva) ise tam olarak yakma tesislerinde tutulamamakta, bu sebeple özellikle bu metallerin KTY içerisinde sisteme girişinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Çevresel parametrelerin sınıflandırılması Tablo 1.4'te verilmektedir.

Tablo 1.4. Çevresel parametrelerin sınıflandırılması

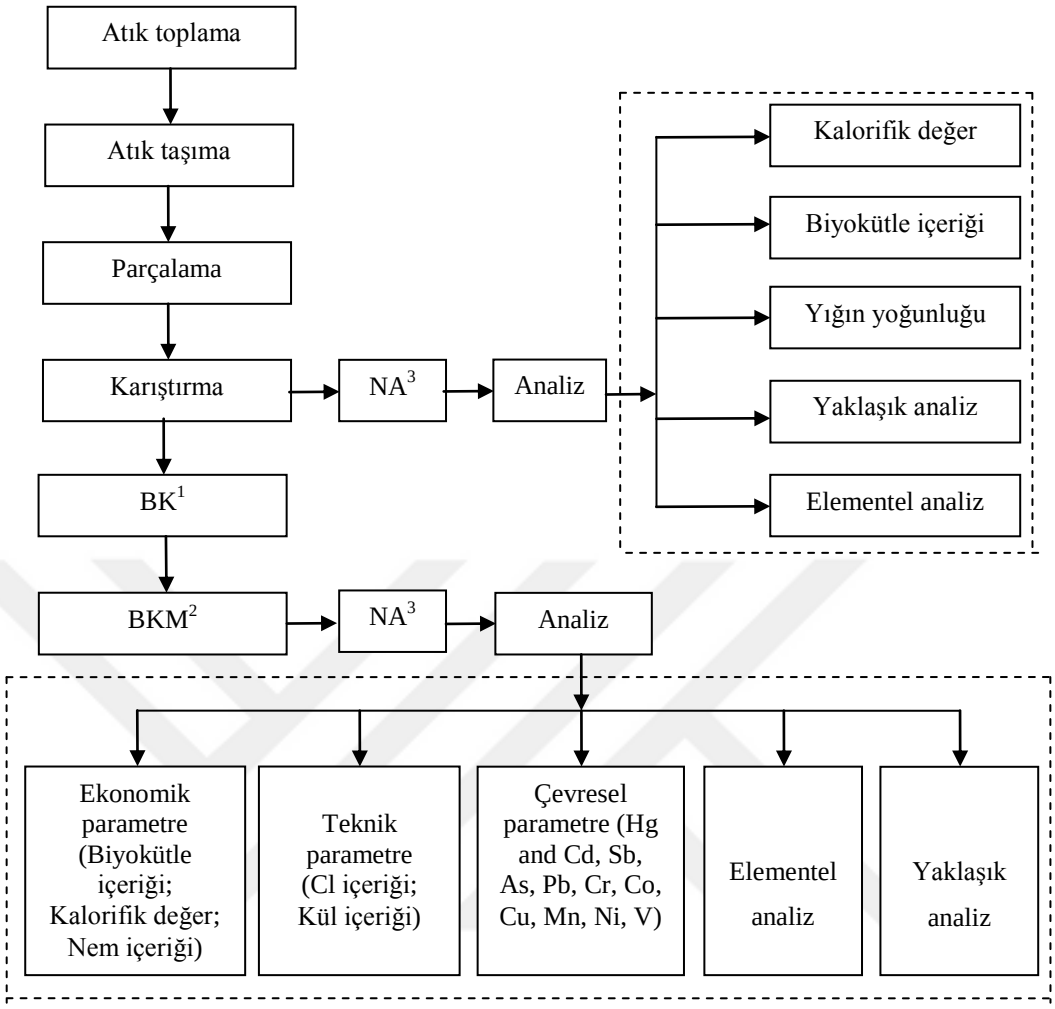
| Sınıflandırılma özelliği | Birim | Sınıf 1 | Sınıf 2 | Sınıf 3 | Sınıf 4 | Sınıf 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cıva (Hg) (ar) | mg/MJ (ortalama) | ≤0,02 | ≤0,03 | ≤0,06 | - | - |
| | mg/MJ($80^{th}$ persantil) | ≤0,04 | ≤0,06 | ≤0,12 | - | - |
| Kadmiyum (Cd) (ar) | mg/MJ (ortanca) | ≤0,1 | ≤0,3 | ≤1,0 | ≤5,0 | ≤7,5 |
| | mg/MJ ($80^{th}$ persantil) | ≤0,2 | ≤0,6 | ≤2,0 | ≤10 | ≤15 |
| Diğer ağır metaller (ar) | mg/MJ (ortanca) | ≤15 | ≤30 | ≤50 | ≤100 | ≤190 |
| | mg/MJ ($80^{th}$ persantil) | ≤30 | ≤60 | ≤100 | ≤200 | ≤380 |

# 2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel yöntem, ekipmanlar ve araştırmanın yapıldığı analitik yöntemler tanımlanmaktadır.

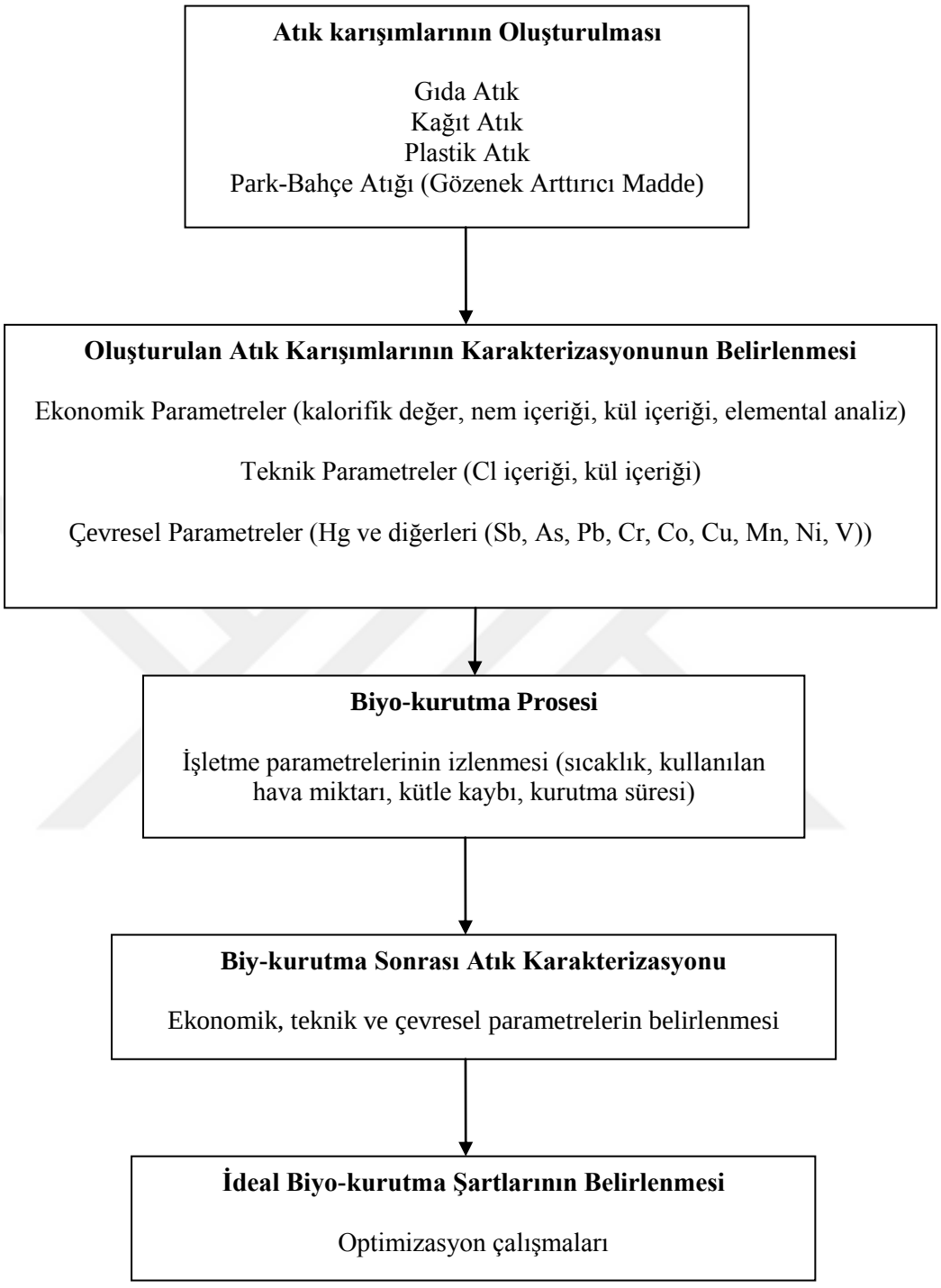
## 2.1. Numune Hazırlanması

Numunelerin minimum değişkenliği sağlaması için, numune hazırlamaya azami özen gösterilmiştir. Biyo-kurutma deneyinin her birinde gıda, plastik ve kağıt atıklar ile GA maddelerinin farklı oranlarda karışımları elde edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deneysel süreç Şekil 2.1'de ayrıntılı olarak verilirken, çalışmanın ana aşamaları Şekil 2.2'de özetlenmiştir. Bu çalışmada gıda atıkları sebep oldukları çevresel sorunlar ve yüksek tüketim oranları nedeniyle araştırma konusu olarak seçilmiştir. Gıda atığı olarak Kocaeli Üniversitesi yemekhanesinden çıkan sebze (marul) atıkları kullanılmıştır. Yemekhaneden temin edilen gıda atığı numunelerinin tazeliğini korumak için aynı gün laboratuvara transferi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada önem verilen temel konu, gıda atıklarından KTY elde etmek için biyolojik kurutulabilirliğinin araştırılması olmuştur. Gıda atıkları yüksek nem içeriğine sahip olduğundan bu atıkların biyo-kurutulması işlemi birçok sorunla karşılaşılmaktadır. Atık maddelerdeki düşük porozite ve yüksek nem; etkili havalandırma için dezavantaj neden olmaktadır. Bu dezanvatajı azaltmak için evsel katı atıkların bileşeni olarak kağıt (sorted office papers) ve plastik (low density polyethylene, LDPE) atıklar da biyo-kurutmadan önce farklı oranlarda eklenmiştir. Ayrıca yapısal destek ve atık maddeler arasında hava hareketini kolaylaştırmak için ağaç budama (park-bahçe atığı) de ilave edilmiştir. Biyo-kurutma öncesi kullanılan atıkların genel görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir. Biyo-kurutma öncesi, gıda atıkları 15 x 35 mm, kağıt atıkları 2 x 14 mm, plastik atıkları 5 x 10 mm ve GA maddeler ise 15 mm çapında boyutlara gelecek şekilde parçalanmıştır.




[1]BK : Biyo-kurutma prosesi
[2]BKM :Biyolojik olarak kurutulmuş materyal
[3]NA :Numune alma

Şekil 2.1. Çalışmanın deneysel süreci




Şekil 2.2. Çalışmanın temel aşamaları



Gıda atığı



Plastik



Gözenek arttırıcı malzeme



Kağıt

Şekil 2.3. Biyo-kurutma öncesi atıkların görünüşü

### 2.1.1. Deney düzeneği tasarımı

Biyo-kurutma işlemi Şekil 2.4'te çizi verilen 0,9 $m^3$ hacimli sızıntı sirkülasyon opsiyonuna sahip, havalandırmanın difüzörler ile sağlandığı bir reaktör ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu aerobik reaktör, özel olarak tasarlanarak imal edilmiştir. Reaktör paslanmaz çelikten yapılmış ve dört yapısal parça içermektedir:

(1) Reaktör, matris boyunca homojen bir hava tedarikini sağlamak için reaktörün alt kısmına yerleştirilmiş delikli bir difüzör ile donatılmıştır.

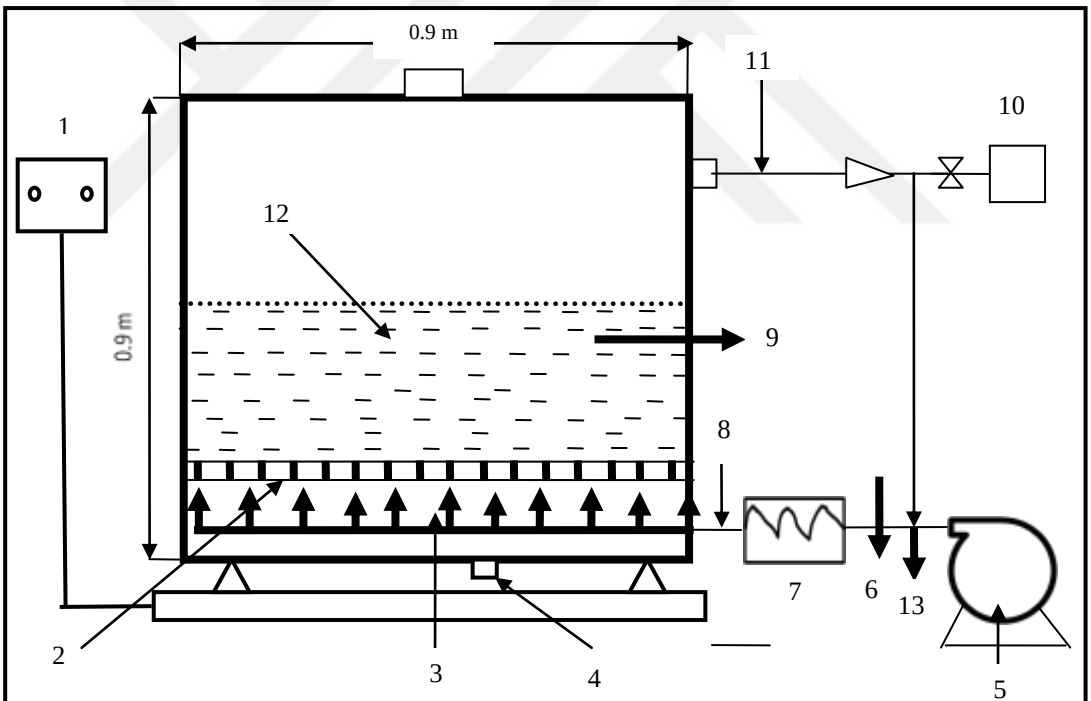
(2) Ayrıca oluşabilcek sızıntı suyunu toplamak için reaktor dibine bir toplama vanası yerleştirilmiştir.

(3) Üzerinde çapı 0,5 cm olan yaklaşık 8.000 delikli paslanmaz çelik saçtan yapılmış ve difüzerlerin yaklaşık 10 cm üzerinde yeralan atığın üzerine serildiği destek plakası bulunmaktadır.

(4) Çıkış havası için reaktörün üst tarafına bağlanan 2 cm çapında olan hava geçirmez bir boru yer almaktadır.

(5) Reaktöre girmeden önce giriş havasını dehidrate etmek (nemini almak) için silika jel içeren bir hattan geçirilmekte ve böylece giriş havasının nem tutma kapasitesi arttırılmaktadır.

Tüm denemelerde, sabit ve kesintisiz bir hava akımı (15 $m^3$/saat) kullanılmıştır. Bu akım, reaktörün altına bağlanan girdap pompası kullanılarak elde edilmiştir. Buna ilave olarak hava akış hızını ölçmek için RTSvac – A2005-1 model hava akış ölçer kullanılmıştır. Aynı şekilde proses boyunca 12 saatte bir sıcaklık ölçümleri ENDA ETC9420 model sıcaklık probu ile gerçekleştirilmiştir. Atıklar yedi gün biyolojik olarak kurutmaya tabi tutulmuştur. Nem içeriği, atık yoğunluğu, kalorifik değer ve uçucu madde içeriği gibi parametreler üzerinden biyo-kurutma performansı takip edilmiştir. Bu parametrelere ilave olarak sıcaklık, ağırlık ve hava-akış parametreleri de sürekli izlenmiştir.




1. Elektronik terazi; 2. Delikli plaka;
3. Hava difüzör; 4. Sızıntı suyu boşaltma;
5. Hava pompası; 6 Hava debimetresi;
7. Isıtıcı; 8. Giriş hava
9. Atık matris sıcaklığı; 10. Gaz ölçme;
11. Çıkış havası; 12. Atık matris;
13. Silika jel

Şekil 2.4. Biyo-kurutma reaktörü (Biyo-reaktör)

## 2.2. Proses Optimizasyonu

Her hangi bir proseste arzu edilen bir çıkış değeri elde edebilmek için proses parametrelerinin optimizasyonu, işlem değişkenlerinin sayısının artmasına bağlı olarak oldukça zor ve hantal bir uygulamadır. Bir parametrenin değiştirilmesi ve kalan parametrelerin sabit tutulması gibi konvansiyonel yaklaşım, sıklıkla pahalı ve zorlu bir görev olarak kabul edilmektedir (Rao ve diğ., 2008). Konvansiyonel yaklaşımın diğer dezavantajları: proses çıkışının çeşitli proses değişkenleri arasındaki interaktif etkilerinin incelenememesidir. Ancak Taguchi ve yanıt yüzeyi tasarım modelleri gibi istatistiksel yöntemlerin gelişmesiyle proses optimizasyonu daha kolay, ucuz ve hızlı bir seçenek olmuştur. Deneylerin tasarımı (DOE), bir değişken üzerinde hangi yanıt değişkenlerinin etkili olduğu ve bir değişkenin etkisinin diğer değişkenlerin düzeyine göre nasıl değiştiği olarak tanımlanmaktadır. Taguchi DOE, minimum deney sayısıyla optimizasyona olanak sağlayan özgün ve güçlü bir istatistik yöntemdir. Taguchi metodolojisinin en önemli avantajları; her bir değişkenin ana etkilerini inceleme yeteneğine sahip olması ve önemli etkileşimlerin bazılarını tek bir birincil deneyle modelleyebilmesidir (Ballantyne ve diğ., 2008). Buna ek olarak kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen proses değişkenleri arasındaki olası etkileşimlerin pozitif etkilerini de dikkate almaktadır. Bu özellikler, Taguchi deney tasarımını güçlü bir tasarım metodolojisi haline getirmekte ve nanoteknoloji, atıksu arıtımı gibi çeşitli bilim alanlarında optimizasyon için kullanımını yaygınlaştırmaktadır (Aslan and Ünal, 2009).

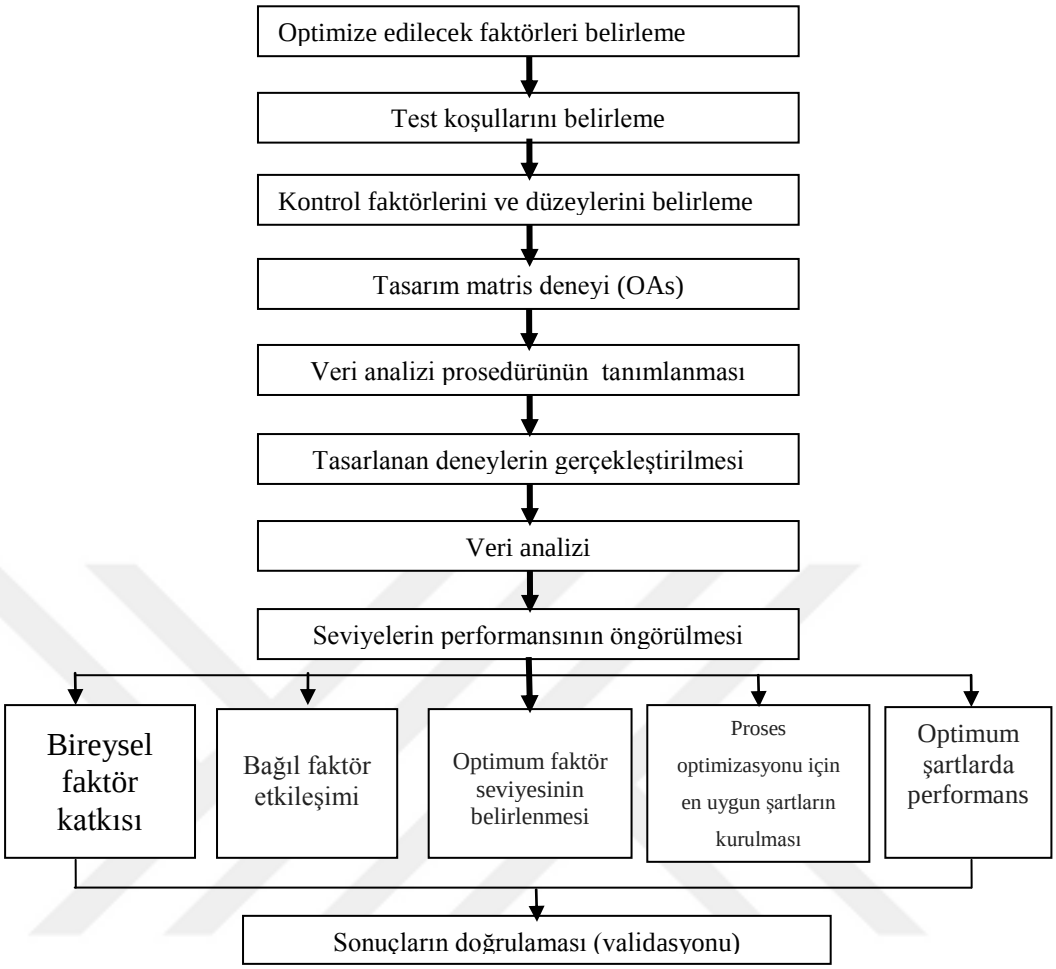
Literatürde biyo-kurutma optimizasyonu için Taguchi yöntemi bu çalışmanın yapıldığı tarihe kadar kullanılmamıştır. Bu çalışmada gıda atığının biyo-kurutma prosesinin optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı (Taguchi yöntemi) ilk kez kullanılmıştır. Aynı zamanda varyans analiz (ANOVA) istatistik yöntemleri, yanıt değişkenlerini en fazla etkileyen faktörleri belirlemek için uygulanmıştır. Reaktör çalışmaları yanında, biyo-kurutma sisteminin işleyişinin niceliksel analizi için modelleme çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, deneylerde kullanılacak biyo-kurutma sisteminin işleyişini yeterli detayda açıklayabilecek bir model oluşturulmuş ve reaktör için regresyon modelleri kurularak, reaktörün çalışmasını etkileyen faktörler incelenmiştir. Oluşturulacak olan bu model, verimli bir biyo-

kurutma için hedeflenen dengeyi (biyokütle kaybı minimize edilirken su kaybının maksimize edilmesi) sağlamada önemli bir araç olacaktır.

### 2.2.1. Taguchi yöntemi kullanılarak deney tasarımı

Daha önce vurgulandığı gibi Taguchi tekniği, proses parametrelerini optimize etmek için kullanılan basit ve oldukça iyi sonuç veren bir yöntemdir. Bu teknik, proses varyasyonlarını azaltarak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamaktadır. Taguchi deney tasarımında, prosesleri etkileyen faktörler ile bu faktörlerin değişkenlik seviyelerini organize etmek için dikey sıralar (orthogonal arrays) yöntemi kullanılmaktadır. Bu dikey sıralar, incelenecek deneysel konfigürasyonların sayısının azalmasını sağlamasına karşın, faktör tasarımında tüm olası kombinasyonlar kontrol edilmelidir. Taguchi (DOE) metodolojisinin çeşitli aşamaları Şekil 2.5'te verilmektedir.

Proses iyileştirme ve geliştirmenin en önemli adımı parametre tasarımıdır. Bu adımda üretilecek ya da geliştirilecek olan ürünün özelliklerinin en iyi seviyeye getirilebilmesi için üretimde kullanılan parametrelerin iyileştirilmesi sağlanır. Parametrelerin en iyi seviyeleri seçilir. Üretim esnasında ürünün kalitesini olumsuz etkileyecek kontrol edilemeyen faktörler belirlenerek, bunlara kontrol edilemeyen parametre adı verilir. Ardından bu parametrelerin etkileri en aza indirilmeye çalışılır (minimize edilir). Bu çalışmada her faktör için üç seviyenin belirlendiği dört kontrol edilebilir faktör bulunmaktadır. Deney tasarımı parametrelerinin değişken düzeyleri Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Bunun sonucu olarak Taguchi-$L_9$ ($3^4$) dikey sıralar (orthogonal arrays) tasarımı uygulanmıştır. Deneysel şartlar Tablo 2.2'de verilmiştir. Deney tasarımında belirlenen ve her birinde farklı oranlarda gıda, plastik, kağıt ve GA maddelerinin yer aldığı atık matrislerinde biyo-kurutma gerçekleştirilmiştir. Nem içeriği ve kalorifik değer, araştırılan yanıt değişkenleridir.




Şekil 2.5. Optimizasyon için dizayn edilen Taguchi DOE yöntemi adımlarının şematik gösterimi

Tablo 2.1. Deney tasarımında kullanılan değişkenlerin düzeyleri

| Faktör | Tanımlama | Birim | Düzey 1 | Düzey 2 | Düzey 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| FW | Gıda atığı | kg | 15 | 25 | 35 |
| Pa | Kağıt | kg | 2 | 6 | 8 |
| Pl | Plastik | kg | 3 | 8 | 10 |
| GA | Gözenek arttırıcı madde | kg | 0 | 3 | 6 |

Tablo 2.2. $L_9$ ($3^4$) orthogonal sıralı Taguchi deney tasarımı

| Deney | Parametreler ve düzeyler | | | |
|---|---|---|---|---|
| | FW | Pa | Pl | GA |
| 1 | 15(1) | 2(1) | 3(1) | 0(1) |
| 2 | 15(1) | 6(2) | 8(2) | 3(2) |
| 3 | 15(1) | 8(3) | 10(3) | 6(3) |
| 4 | 25(2) | 2(1) | 8(2) | 6(3) |
| 5 | 25(2) | 6(2) | 10(3) | 0(1) |
| 6 | 25(2) | 8(3) | 3(1) | 3(2) |
| 7 | 35(3) | 2(1) | 10(3) | 3(2) |
| 8 | 35(3) | 6(2) | 3(1) | 6(3) |
| 9 | 35(3) | 8(3) | 8(2) | 0(1) |

Proses performansının istatistiksel belirlemesi için, sinyal gürültü oranı (S/N - Signal/Noise ratio) kullanılmaktadır. 'Sinyal ve 'gürültü' terimleri sırasıyla çıkış karakteristiği için arzu edilen ve arzu edilmeyen değerleri temsil etmektedir. Proses faktörlerinin optimal seviyeleri sinyal gürültü oranı analizine bağlıdır. Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda gürültü oranı (S/N) fonksiyonu olarak da ifade edilen, 3 farklı amaca uygun fonksiyon bulunmaktadır. Buna göre, amacın "en küçük en iyi", "en büyük en iyi" ve "nominal en iyi" olmasına göre aşağıdaki denklemler (Denklem 2.1 ve 2.2) kullanılarak S/N oranları hesaplanır. Bu çalışmada, nem içeriğini en düşük düzeye indirmek için "en küçük en iyi" eşitliği, kalorifik değerinde yüksek seviyeleri çıkarılması için "en büyük en iyi" eşitlikleri uygulanmıştır.

En küçük (düşük) en iyi olduğu durum:

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i^2\right) \tag{2.1}$$

En büyük (yüksek) en iyi olduğu durum:

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Y_i^2}\right) \tag{2.2}$$

Eşitliklerde $Y_i$: performans yanıtını i. gözlem değerini, n: bir denemedeki test sayısını ifade etmektedir. Değişkenlik karakteristiği S/N oranı ile ters orantılıdır; dolayısıyla daha büyük S/N, daha iyi bir performansla uyumlu olmaktadır (Asilturk ve diğ., 2012). Bunun sonucu olarak, istatistiksel olarak çalışmak ve her faktörün etkilerini keşfetmek için varyans analizi (ANOVA) istatistiksel yaklaşımı da kullanılmaktadır. Bu çalışmada gıda (FW), kağıt (Pa), plastik (Pl) ile gözenek arttırıcı madde (GA) yanıt değerini etkileyen faktörlerdir ve hangi faktörün yanıt değerlerini önemli oranda etkilediği araştırılmaktadır.

Çalışmada istatistik olarak anlamlı proses faktörlerini değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmaktadır. Her faktörün katkısının yüzdesi ($\rho_F$) denklem 2.3'te verilmektedir.

$$\rho_F = \frac{SS_F - (DOF_F V_{Er})}{SS_T} \text{ x } 100 \quad (2.3)$$

Burada; $DOF_F$ her faktörün serbestlik derecesini ifade etmektedir. Bu, her faktörün seviyesinin sayısından bir çıkarmasıyla elde edilmektedir. Aynı zamanda toplam kareler toplamı $SS_T$, aşağıdaki denklem 2.4'te verilmektedir.

$$SS_T = \sum_{j=1}^{m} \left( \sum_{i=1}^{n} Y_i^2 \right)_j - mn\ (\bar{Y}_T)^2 \quad (2.4)$$

Burada;

$$\bar{Y} = \sum_{j=1}^{m} \left( \sum_{n=1}^{n} Y_i \right)_j \Big/ (mn) \text{ x } 4 \quad (2.5)$$

m: deney sayısı

n: aynı deney şartlarında gerçekleştirilen tekrarların sayısını ifade etmektedir. Etkin toplam kareler toplamı $SS_F$, denklem 2.6'da verilmektedir.

$$SS_F = \frac{mn}{L} \sum_{k=1}^{L} \left( \bar{Y}_k^F - \bar{Y}_T \right)^2 \quad (2.6)$$

Burada; $\bar{Y}_k^F$ k.'ıncı seviyede bilinen bir faktörün ölçüm sonuçlarının ortalama değerini ifade etmektedir. Bunlara ilaveten varyans hata $V_{Er}$, denklem 2.7'de verilmektedir.

$$V_{Er} = \frac{SS_T - \sum_{F=A}^{D} SS_F}{m(n-1)} \quad (2.7)$$

### 2.3. Çalışmada Gerçekleştirilen Analizler

Elde eden katı atıktan türetilmiş yakıtla (KTY) ilgili tüm numunelerin hazırlanması, karakterizasyonu ve biyokütle malzemelerinin hazırlanması SRF değerlendirmesi EN 15413 yönetmeliğine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler için tüm numuneler laboratuarda homojenleştirme, öğütme ve kurutma işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar analizleri için gerekli olan analitik standart metodlar

Tablo 2.3'te verilmektedir. Laboratuvar analizinde, numunelerin hazırlaması için KTY için EN 15443'te verilen laboratuvar örneğinin hazırlanma yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, biyo-kurutma proseslerinden sonra yapılan analizlerle biyolojik olarak kurutulmuş materyalin (bio-dried material) sınıflandırmasının oluşturulmasıdır. Sınıflandırmanın gerçekleştirilebilmesi için bu çalışmada yapılan analizler; (1) ekonomik, (2) teknik ve (3) çevresel analizler olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır.

Tablo 2.3. Laboratuar analizlerinde kullanılan standart yöntemler

| Parametre | Sembol | Birim | Metod |
|---|---|---|---|
| *Ekonomik parametreler* | | | |
| Biyokütle içeriği | $X_B$ | % | EN 15440 |
| Kalorifik değer | NCV | MJ/kg | EN 15400 |
| Nem içeriği | NI | % | CEN/TS 15414-2 |
| *Teknik parametreler* | | | |
| Kül içeriği | $A_s$ | % | EN 15403 |
| Klor içeriği | Cl | % | EN 15408 |
| Yığın yoğunluğu | ρ | $kg/m^3$ | CEN/TS 15401 |
| *Çevresel parametreler* | | | |
| Hg ve Cd, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V | N/a | mg/L | EN 15411 |
| *Elementel analiz* | | | |
| C, H, N içeriği | N/a | % | EN 15407 |
| S içeriği | S | % | EN 15408 |
| O içeriği | O | % | Denklem 2.8 |
| *Yaklaşık analiz* | | | |
| Uçucu katı madde | $V_s$ | % | EN 15402 |
| Sabit karbon | $C_f$ | % | Farklı olarak |

O (wt.%) = 100 - H (wt.%) - C (wt.%) - N (wt.%) - S (wt.%) - Kül (wt.%) (2.8)

Burada H, C, N ve S hidrojen, karbon, azot ve kükürt içeriğini temsil etmektedir.

Yığın yoğunluğu ($Y_Y$) analizinin yapılışında, Agnew ve diğ. (2003) tarafından önerilen yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde yığın yoğunluğu birim hacime düşen kütle olarak ifade edilmektedir. Uygun SI tanımlamalarına göre yığın yoğunluğu $kg/m^3$ cinsinden ifade edilmiş ve aşağıdaki denklem 2.9'a göre belirlenmiştir.

$$Y_Y = \frac{\text{Kütle numunesi}}{\text{Hacim}} \quad (2.9)$$

Katı atıktan türetilmiş yakıtlardaki nem içeriğinin belirlenmesi, CEN/TS 15414-2 no'lu "Katı Yakıtlar - Geri Dönüşümlü - Fırında Kurutma Yöntemiyle Rutubet Muhtevasının Tayini"nde verilen prosedürlere göre gerçekleştirilmiştir. Kül içeriğinin belirlenmesinde ise EN 15403 no'lu "Katı Yakıtlar - Geri Kazanılmış - Kül Muhevasının Tayini"nde verilen yöntem uygulanmıştır.

Atık numunelerinin su emme kapasiteleri, Adhikari ve diğ. (2008); ve Malińska ve Zabochnicka-Swiatek (2013) tarafından tanımlanan yöntemlerle belirlenmiştir. Bu yöntemlere göre, atık malzemelerin su emme kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Denklem 2.10).

$$WAC(\%) = \left(\frac{W_{SD} - W_D}{W_D}\right) * 100 \quad (2.10)$$

Burada,

WAC (%): Su Emme Kapasitesi

$W_{SD}$ : ıslantılıp süzüldükten sonra numunenin ağırlığını (g)

$W_D$ : kurutulmuş numunenin ağirlığını (g) ifade etmektedir

Biyokütle içeriğinin belirlenmesi için EN 15440 no'lu "Katı Yakıtlar - Geri Kazanılmış - Biyokütle Muhtevasının Tayini"nde verilen yöntem uygulanmıştır. Bu standarda göre üç farklı yöntem vardır: selektif çözündürme yöntemi (Selective Dissolution method, SDM), elle ayırma yöntemi (Manual Sorting Method) ve $^{14}C$ içeriği ($^{14}C$ content method) yöntemidir. Bu çalışmada selektif çözündürme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde biyojenik kökenli maddeler asit karışımlarında çözünürek daha kolay oksitlenirler. Aynı zamanda biyojenik kökenli olmayan maddeler, bozulmamış olarak kalır ve gravimetrik olarak belirlenebilir (Şekil 2.6). Bu çalışmada analiz edilecek örnekler 4 eşit parçaya bölünerek azaltılma yoluyla temsil edici olacak şekilde alınmıştır. Bu şekilde her biri 5 gr olacak şekilde iki farklı örnekleme yapılmıştır. Birinci örnek, EN 15403'e göre kül içeriği ($A_{SRF}$) belirlenmesinde kullanılmıştır. İkinci deneyde ise örnek boş bir ölçekli erlene alınmıştır. Bundan sonra % 78 (gr/gr) $H_2SO_4$'den 150 mL (% 95 gr/gr analitik

saflıktan (Fisher Scientific) hazırlanmıştır) örneğe ilave edilmiş ve 16 ± 2 saat boyunca çeker ocağa yerleştirilmiştir. Hidrojen peroksitin 30 mL'si (analitik saflıkta, Acros Organics) örneğe eklenmiş ve çeker ocakta 5 ± 1 saat boyunca kalmasına izin verilmiştir. Bunlar yapıldıktan sonra örnek, 300 mL deiyonize su ile seyreltilmiş ve Buchner hunisinde cam mikrolif üzerinde filtre edilmiştir. Kalan kalıntı 105 $^{o}$C'de kurutulmuştur. Biyokütle ve biyokütle olmayan içerik, 2.11 ve 2.12'deki denklemler yardımıyla belirlenmiştir.

$$X_B = \left[1- \left\{\frac{m_{residue} - m_{residue\text{-}ash}}{m_{SRF}} + \frac{A_{SRF}}{100}\right\}\right] \text{ x } 100 \qquad (2.11)$$

$$X_{NB}=100-X_B-A_{SRF} \qquad (2.12)$$

Burada;

$X_B$ : Biyokütle içeriği (%)

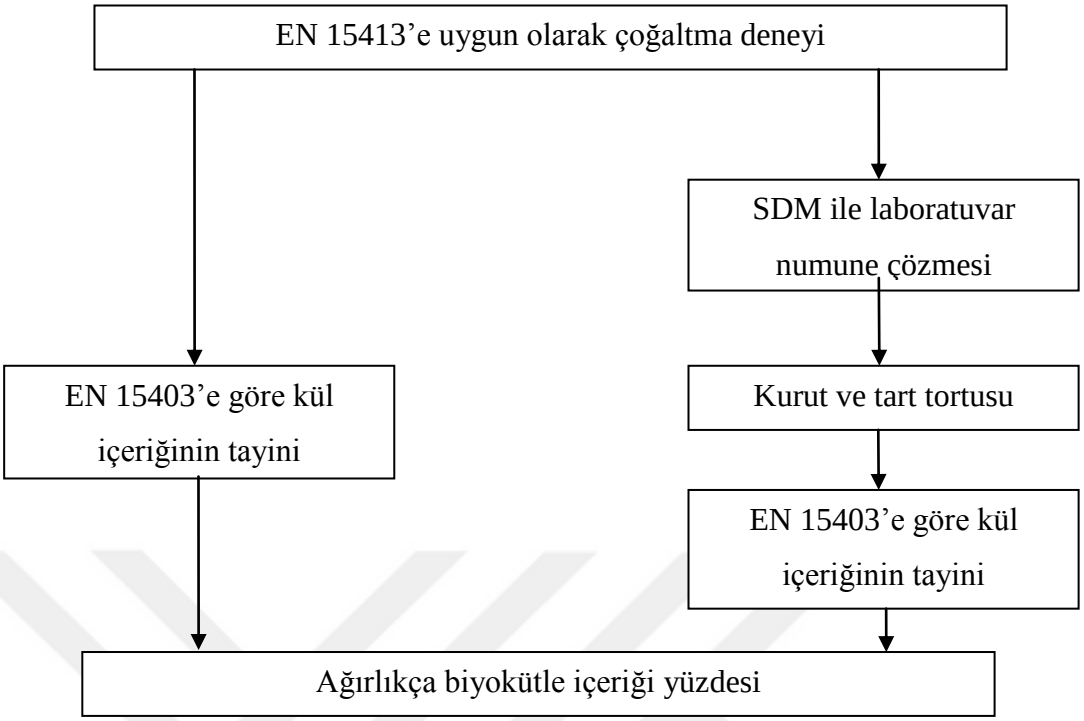
$X_{NB}$ : Biyokütle olmayan içeriği (%)

$m_{residue}$ : Kalıntı kütlesi (g)

$m_{residue\text{-}ash}$ : Kalıntı külün kütlesi (g)

$A_{SRF}$ : Örnekteki kül içeriği (%)

$m_{SRF}$ : Kuru örneğin kütlesi (g)




Şekil 2.6. Selektif çözündürme yöntemi ile biyokütle içeriğinin tayini (%, w/w)

Katı atıktan türetilmiş yakıtta klor içeriği analizinin gerçekleştirilmesi için, EN 15408'de verilen "Katı Yakıtlar - Geri Kazanılmış - Kükürt (S), Klor (Cl), Florür (F) ve Bromür (Br) Muhtevasının Tayini" yöntemi kullanılmıştır.

Katı atıktan türetilmiş yakıtın kalorifik değerinin belirlenmesinde, EN 15400'da anlatılan "Katı - Geri Kazanılmış - Isıl Değerin Tayini" standardında verilen prosedürler uygulanmıştır. Kalorimetre deneyleri, IKA C-7000 model kalorimetre (IKA Laboratory Equipment, Werke Staufen, Germany) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada kalorifik değer, üst ısıl değer (HHV) olarak ifade edilmektedir.

Elementel analiz EN 15407 ve EN 15408 tarafından yayınlanan standart metotlara göre gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem numunelerin katalitik tüpte yanması kavramına dayanmaktadır. Element yüzdeleri yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 1800 °C) yakma yoluyla tayin edilmektedir. Yöntemde organik maddeleri yanma ürünlerine çevrilmektedir. CHNS analizinde karbonun yanması sonucu oluşan $CO_2$, $H_2$, $H_2O$, $N_2$ ve $SO_2$ gazları üzerinden, numunedeki C, H, N ve S miktarları yüzde olarak cihazdan alınmaktadır. Elementel analizlerin belirlenmesinde Thermo Scientific

Flash 2000 Elemental Analyzer (Thermo Fisher Scientific Inc., Bremen, Germany) cihazı kullanılmıştır. Bununla birlikte oksijen içeriği, denklem 2.8 ile hesaplanmaktadır (Garcés ve diğ., 2016).

Yapılan çalışmada katı atıktan türetilmiş yakıtın içerisindeki ağır metallerin belirlenmesinde EN 15411'de verilen "Katı Yakıtlar - Geri Kazanılmış - Eser Elementlerin (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn) Muhtevasının Tayini İçin Yöntemler" yönetmeliği kullanılmıştır. Bu metaller: Arsenik (As), Kadmiyum (Cd), Bakır (Cu), Krom (Cr), Kurşun (Pb), Nikel (Ni), Çinko (Zn), Titanyum (Ti), Antimon (Sb), Molibden (Mo), Manganez (Mn), Kalsiyum (Ca) ve Cıva (Hg)'dir. Ağır metal deneyleri, 10 mL $HNO_3$ ile 0.25 g SRF numunesinin bir mikrodalga parçalayıcıda asitle parçalanmasından sonra, Agilent 7500c ICP-MS (Inductively Couple Plasma- Mass Spectrometer) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yaklaşık analizde genel olarak, yakıtın iki tür karbondan oluştuğu varsayılmaktadır: uçucu ve sabit karbon. İlk olarak CEN/TS 15414-2'ye göre numunelerin nem içeriği belirlenmiştir. EN 15402'ye göre uçucu katı maddeler belirlenirken, EN 15403'ye uygun olarak kül içeriği analiz edilmiştir. Sonuç olarak sabit karbon içeriği, toplam karbon miktarından uçucu karbon miktarının çıkarılması ile elde edilmiştir.

# 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve araştırmanın amaçlarına yönelik sonuçların etkileri tartışılmıştır. İlk olarak biyo-kurutma prosesinin işletme verimliliğine yönelik elde edilen veriler ve kurutma işlemi sonrası elde edilen farklı içerikli KTY'lerin karakteristik özellikleri ortaya konmuştur. Çalışmanın son kısmında ise biyolojik olarak kurutulmuş materyallerin KTY olarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir.

## 3.1. Biyo-kurutmada Kullanılan Atık Malzemelerinin Özellikleri

Çalışmada kullanılan atıkların biyo-kurutma işlemi öncesi özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Farklı nem içeriğine sahip atık matrisleri oluşturmak için gıda atıkları içerisine, evsel katı atıklardaki yüksek oranlarından ve nem içeriğini düşürmedeki faydalarından dolayı, farklı oranlarda kağıt ve plastik atıklar eklenmiştir. Kağıt ve plastik atıklarına ek olarak, atık matrisi içerisine yapısal destek sağlayacak ve hava hareketini kolaylaştıracak gözenek arttırıcı madde de katılmıştır.

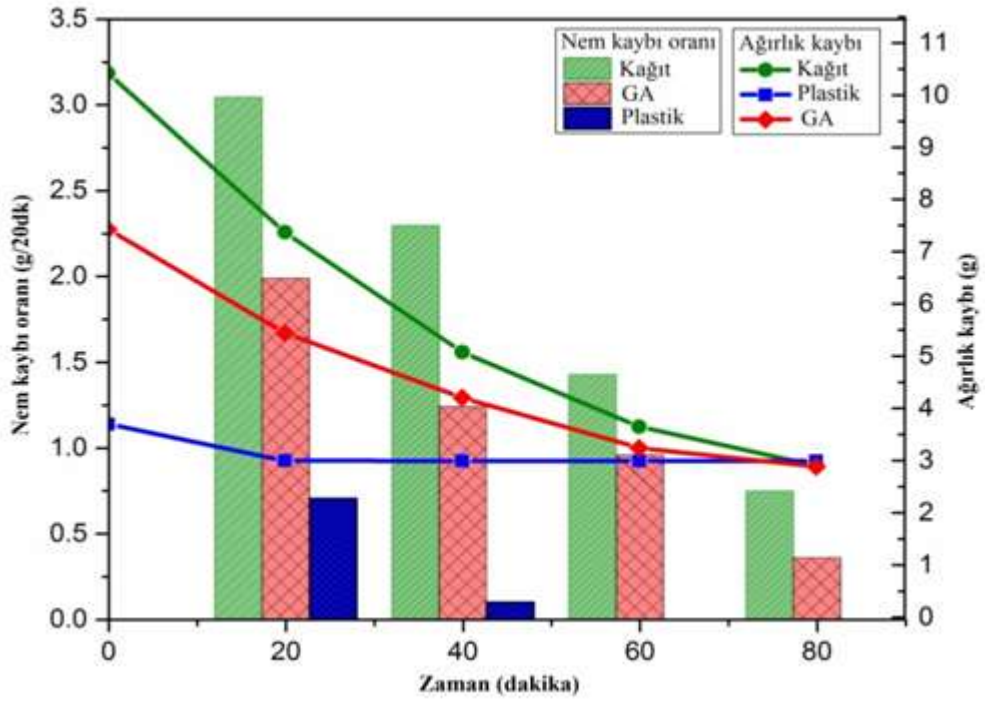
Tablo 3.1. Ham materyallerin karakterizayonu (Tekrar sayısı = 3)

| Parametre | FW | Pa | Pl | GA |
|---|---|---|---|---|
| Nem içeriği (%) | 91,48 ± 0,58 | 5,40 ± 0,16 | 0,94 ± 0,05 | 8,43 ± 0,33 |
| Uçucu katı madde (%) | 98,51 ± 0,22 | 78,94 ± 0,20 | 99,57 ± 0,25 | 90,62 ± 0,38 |
| Yoğunluk ($kg/m^3$) | 464,18 ± 5,36 | 100,46 ± 1,01 | 346,50 ± 3,77 | 204,14 ± 2,02 |
| Kül içeriği (%) | 25,33 | 18,64 | 2,05 | 6,36 |
| Biyokütle içeriği (%) | 72,73 | 72,34 | - | 92,31 |
| Kalorifik değer (MJ/kg) | 1,24 | 13,22 | 45,08 | 17,48 |
| Su emme kapasitesi (%) | - | 43,04 | 35,77 | 68,19 |

Beklendiği gibi, gıda atıkları en yüksek nem içeriğine ve en düşük kalorifik değere sahip olurken, en düşük nem içeriğine ve en yüksek kalorifik değer ve uçucu katı madde içeriklerine sahip olan atıklar ise plastik atıklardır. Bunun nedeni diğer atıklardaki yüksek nem içeriği ve plastik atıkların kendine has doğasıdır. Bu sonuçlara ilave olarak kağıt ve GA atıklarına kıyasla, gıda ve plastik atıklarının sırasıyla % 25 ve % 20 daha yüksek kül içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu

özelliklere göre atık kompozisyonundaki gıda ve plastik malzemelerin miktarı arttıkça biyo-kurutulmuş yakıtın ortalama kül içeriği de artacaktır.

Kullanılan her bir maddenin biyo-kurutma performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması için atık maddelerin su emme kapasiteleri belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, gözenek arttırıcı maddeler en yüksek su emme kapasitesine (% 68,19) sahip iken, plastik atıkların en düşük su emme kapasitesine (% 35,77) sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, su kaybı hızı açısından plastik atıklarının 40 dakikadan daha az zamanda sabit ağırlığa gelecek şekilde hızlı bir şekilde kurutulması, daha iyi bir verim sağlayacağını göstermiştir. Kağıt atıkların su kaybı hızı ise en yavaş gerçekleşmiş ve bu durum biyo-kurutma için dezavantaj oluşturmuştur.




Şekil 3.1. Kağıt, plastik ve gözenek arttırıcı maddelerinin su emme kapasitelerinin eğrisi

### 3.2. Biyo-kurutma Prosesinin Performansı

Her bir denemenin biyo-kurutma performansını nicel olarak değerlendirmek için, biyo-kurutma indeksi kullanılmıştır. Biyo-kurutma indeksi (Denklem 3.1), su gideriminin uçucu katı madde (VS) tüketimine oranı olarak tanımlanmaktadır (Zhang ve diğ., 2008).

$$BI_t = \frac{WL_t}{OL_t} \quad (3.1)$$

Burada; $BI_t$, t zamanındaki biyo-kurutma indeksi; $WL_t$, t zamanındaki su kaybı oranı (g) ve $OL_t$, t zamanındaki uçucu madde kaybıdır (g).

Bu amaçla, biyo-kurutma deneyinde ağırlıkça farklı oranlarda ham maddelerden oluşan üç farklı deney seti kurulmuştur. Deney setlerinde kompozisyonların belirlenmesinde GA maddenin etkinliğini anlamak için bir sete hiç katılmamıştır, diğer iki denemede ise % 7,5 ve % 15 oranlarında katılarak gözlem yapılmıştır. Plastik atıkları % 7,5, % 15 ve % 26 olacak şekilde arttırılırken, gıda atıkları da yaklaşık % 40 ile 75, kağıt atıkları ise % 10 ile % 21 aralığında olacak şekilde seçilmiştir. Deney setlerindeki atık kompozisyonları Tablo 3.2'de verilmiştir.

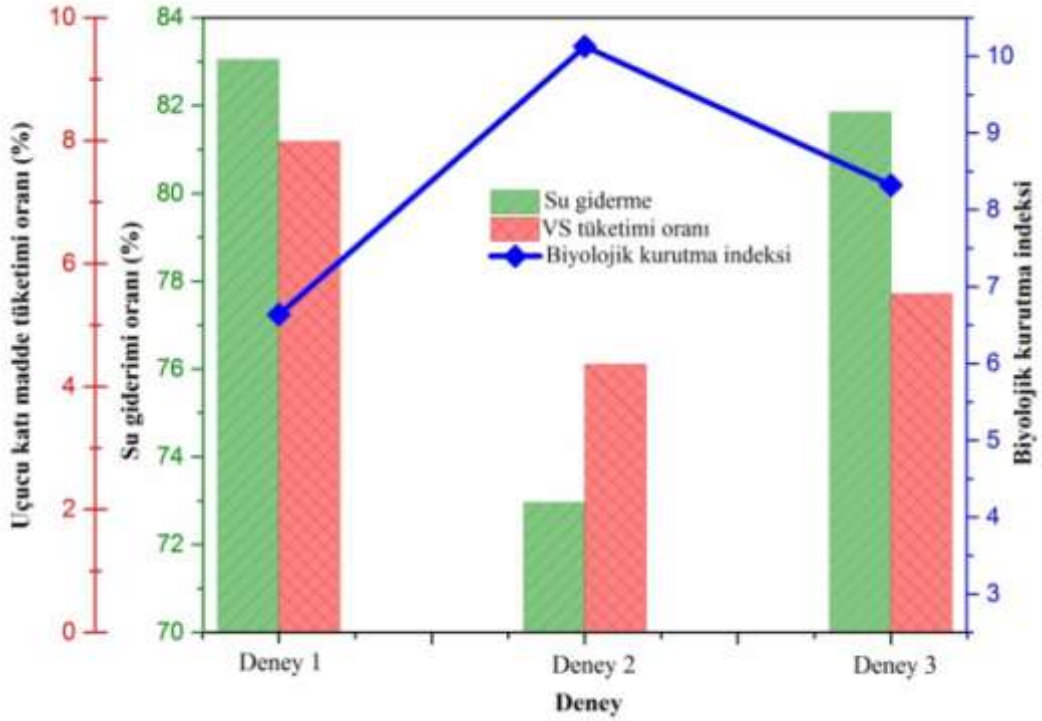
Tablo 3.2. Deney setlerindeki atık kompozisyonları

| Malzemeler | Sembol | Birim | Deneyler | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Set 1 | Set 2 | Set 3 |
| Gıda atıkları | FW | % | 75 | 64 | 38 |
| Kağıt | Pa | % | 10 | 21 | 21 |
| Plastik | Pl | % | 15 | 7.5 | 26 |
| Gözenek arttırıcı madde | GA | % | 0 | 7.5 | 15 |

Tüm deneyler için BI Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Yüksek BI değeri, daha az organik madde tüketilirken daha fazla su giderildiğini (yani, daha az uçucu katı madde tüketimi) ve nihai ürünün enerji kaynağı olarak kullanılabilmesinde önem teşkil eden fazla enerjinin malzemede tutulduğunu (kaldığını) gösterir. Uçucu katı madde tüketimleri, 1. 2. ve 3. deneyler için sırasıyla % 7,99, % 4,36 ve % 5,51 olmuştur. Elde edilen bu değerler, Yang ve diğerlerinin (2014) çalışmasında uçucu katı madde değerleri olarak belirtilmiş % 12 ve % 21'den düşük olmuştur. Atıksu arıtma çamurlarının biyolojik olarak kurutulmasıyla ilgili çalışmalar gerçekleştiren Villegas ve Huilinir (2014), uçucu katı madde tüketiminin başlangıçtaki nem içeriğine bağlı olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, mevcut çalışmada gerçekleştirilen ve başlangıç nem içeriği % 60,43 olan Deney 2'nin, başlangıç nem içeriği % 44,95 olan Deney 3'e göre daha düşük uçucu katı madde bozunma oranına sahip olmasıyla ilgili bulgularımıza aykırı olmuştur. Bunun temel nedeni Deney 3'deki GA madde yüzdesinin Deney 2'deki karışıma göre 2 kat fazla olmasıdır. Buda sistemin daha iyi havalanmasına ve daha yüksek uçucu katı madde giderimine neden olmuştur. Bu

sonuçlar uçucu katı madde gideriminde nem kadar karışımın gözenekliliğinin de önemli olduğunu göstermektedir. Deney 1'de (GA içermeyen biyo-kurutma) gerçekleştirilen su gideriminin en yüksek olduğu gerçeğine rağmen, BI değeri (6.64) en az olmuştur. Bu durum, bozunmuş organiklerin kullanım verimliliğinin düşük olduğunu göstermiştir. Deney 2 ve 3'te daha yüksek BI değerleri elde edilmiş ve bu verilerin, daha fazla su giderilirken daha az organik madde tüketilmesinin yanı sıra biyolojik olarak kurutulmuş malzemede daha fazla enerji tutulduğunu gösterdiği düşünülmektedir.

Şekil 3.2'de Deney 2 (BI = 10,13)'de biyo-bozunur organik maddelerin en etkin kullanım verimliliğiyle su gideriminin sağlandığı görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen BI değerleri, literatürde bildirilenlerle uyumludur (Shao ve diğ., 2012). Ancak, dikkat edilmesi gerekir ki, atık matrisinin türü ve bileşiminin yanı sıra biyo-kurutma sırasında kullanılan işletme parametreleri de proses verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir.




Şekil 3.2. Biyo-kurutma indeksi

### 3.3. Atıkların Fiziksel Bileşenlerinin ve Özelliklerinin Biyo-kurutma Prosesine Etkileri

Etkili biyo-kurutma prosesi için atık materyalin fiziksel yapısını ve biyolojik parçalanabilirliğini göz önünde bulundurma oldukça önemlidir. Bu amaçla, biyo-kurutma işlemlerinin dört farklı seti gerçekleştirilmiş ve gözenek arttırıcı maddelerin etkisi değerlendirilmiştir. Birinci ve ikinci deneylerde, parçalanmış (15 - 20 mm) ve parçalanmamış (80 - 90 mm) gıda atıkları arasındaki nem içeriği ve ağırlık azalması tespit edilmiştir. Tüm denemelerde, reaktör 50 kg parçalanmış ve parçalanmamış gıda atıkları ile doldurulmuştur. Üçüncü ve dördüncü denemelerde, reaktörde aynı miktarda gıda atıklarına (parçalanmış ve parçalanmamış gıda atıklar) % 10 gözenek arttırıcı maddeler eklenmiştir. Atık maddelerin özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Gıda atıkların biyo-kurutmasında GA maddelerin etkisi, ağırlık kaybı ve nem içeriği azaltımı üzerinden değerlendirilmiştir. Aynı şekilde proses boyunca sıcaklık ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3. Atık maddelerin özellikleri

| Parametre | FW[a] | GA[b] |
|---|---|---|
| Nem içeriği (%) | 92,00 | 10,20 |
| Yığın yoğunluğu (kg/m$^3$) | 464,18 | 204,14 |
| Kalorifik değeri (MJ/kg) | 1,18 | 14,44 |

[a] Gıda atık
[b] Gözenek arttırıcı madde

Atık matrisinin nem içeriği biyo-kurutma sürecinde kritik bir faktördür. Mikrobiyal aktivitenin, organik maddenin biyolojik parçalanmasının ve proses sırasında oksijen taşınması için uygun alanın sağlanabilmesi için başlangıç nem içeriğinin uygun olması gerekmektedir. Biyo-kurutma işlemlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.4'te verimektedir.

Tablo 3.4. Biyo-kurutma prosesinden elde edilen sonuçların özeti

| Deney | Nem içeriği (%) | | Ağırlık (kg) | | KD[e] (MJ/kg) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Başlangıç | Çıkış | Başlangıç | Çıkış | Başlangıç | Çıkış |
| D1[a] | 92,0 | 82,5 | 50 | 21,6 | 1,50 | 2,29 |
| D2[b] | 83,0 | 71,5 | 50 | 23,4 | 1,30 | 3,65 |
| D3[c] | 88,0 | 45,0 | 50 | 26,5 | 3,77 | 6,86 |
| D4[d] | 81,0 | 57,0 | 50 | 28,0 | 4,36 | 5,67 |

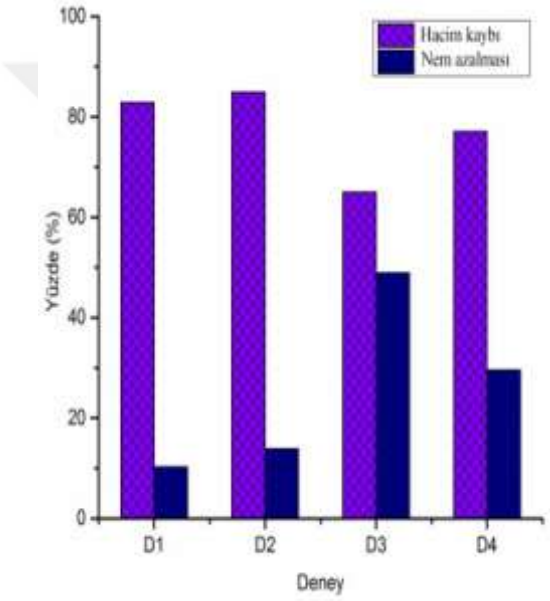
[a] parçalanmış atık; [b] parçalanmamış atık; [c] parçalanmış atık + GA; [d] parçalanmamış atık + GA; [e] kalorifik değeri

Sonuçlara göre, D4 daha düşük başlangıç nem içeriğine sahip olmasına rağmen, D3'deki kurutma çalışmasına göre daha az nem azalması elde edilmiştir. Bu sonuç, biyo-kurutma üzerinde GA'nın pozitif bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Atık matrisi içinde GA maddelerin bulunması, havanın homojen olarak dağılımını iyileştirmektedir. Dolayısıyla GA içermeyen D1 ve D2 denemelerinde, zayıf boşluk yapısı nedeniyle daha düşük nem içeriği azaltımı gözlenmiştir. Benzer sonuçlar Song ve diğ., (2017)'e ait çalışmada da elde edilmiştir. Buna ilaveten, Yang ve diğ., (2014), gözenek arttırıcı maddelerin atıksu arıtma çamurunun biyo-kurutmasına etkisini de göstermiş ve biyo-kurutmadan sonra başlangıç suyunun % 55,1'lik bir kısmını uzaklaştırıldığını bildirmiştir.

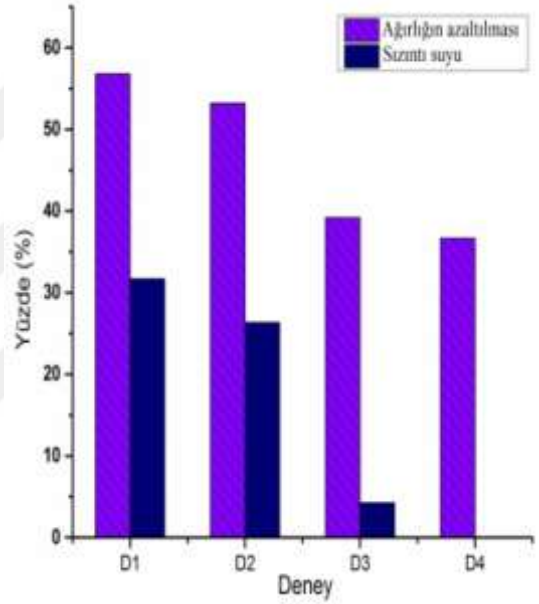
Başlangıç NI ve GA maddelerin öneminin dışında, biyo-kurutma süreci sırasında atık matrisinin fiziksel bileşimi de önemli bir rol oynamaktadır. D3 ve D4'ün heterojen olması, yüksek geçirgenliği ve atık matrisi içerindeki havanın homojen dağılımını sağlamıştır. Yine de, biyo-kurutma aerobik bir proses olduğundan dolayı, GA içermeyen gıda atığı matrisinin hücre yapısının parçalanması sonucu D1 ve D2'deki su tutma kapasitesi azalmış ve bir miktar sızıntı suyu oluşmuştur. Bununla beraber, GA içeren atık matrisi içersinde de (D3) az miktarda sızıntı suyu oluşumu gözlemlenmiştir. D1 ve D2'ye kıyasla, D3'teki suyun büyük kısmı konvektif buharlaştırma ile uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.4). Shuqing ve diğ. (2014)'nın GA olarak saman kullandıkları çalışmada, kentsel katı atıkların biyo-kurutma işleminde sızıntı suyu oluşumu gözlemlenmemiştir. Ayrıca Tom ve diğ., (2016), sentetik KKA'nin biyo-kurutma süreci sırasında sızıntı suyu üretiminin sıfır olduğunu gözlemlemiştir. Kentsel atıklarda sızıntı oluşmamasının da temel nedeni kendi doğasında zaten gözenek arttırıcı atıkların bulunmasıdır. Yapılan çalışmalar yüksek nem içeriğine sahip gıda atıkların biyo-kurutmasına ilişkin herhangi bir çalışmaya

rastlanmamasının yanı sıra çoğunlukla sentetik malzemeler (genellikle 12-35 günden daha uzun süre) kullanıldığı görülmektedir ve bu durum prosesin amacından uzaklaşmasına neden olmaktadır (Colomer-Mendoza ve diğ., 2013; Huiliñir ve Villegas, 2014; Shuqing ve diğ., 2014).

Etkin hacim azaltma eğilimine sahip olan biyo-kurutma, kısa süreli depolama, taşıma ve taşıma sırasında koku emisyonunun azaltılması gibi avantajlara da sahiptir. biyo-kurutmadan yedi gün sonra yapılan deneylerdeki hacim ve ağırlık kayıpları Şekil 3.3 ve 3.4'te gösterilmiştir.



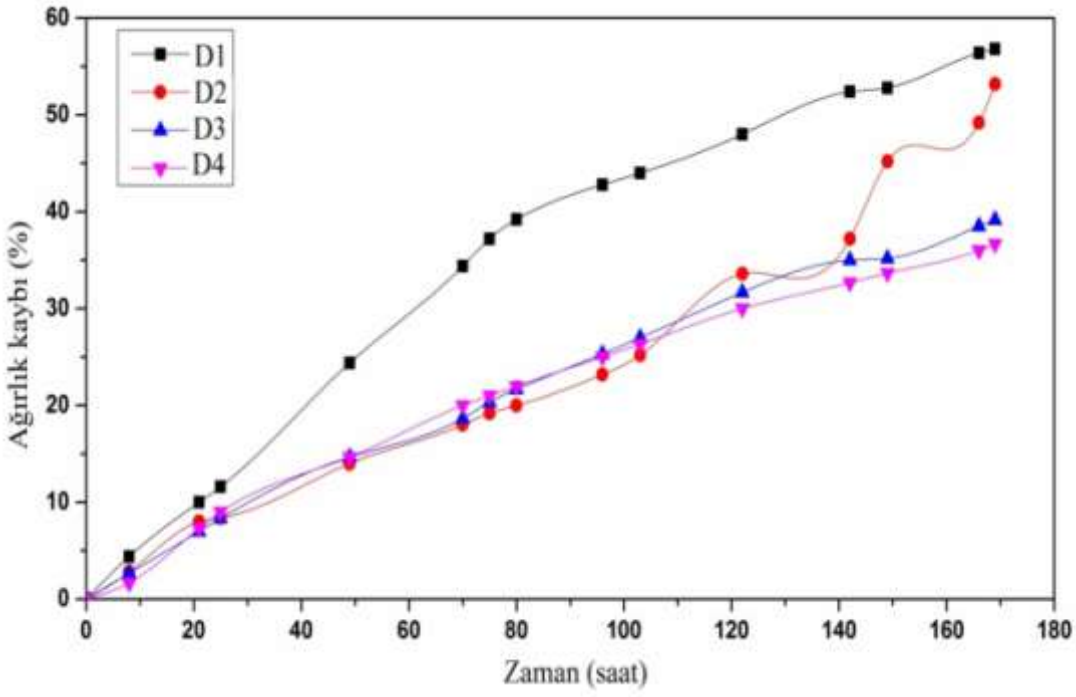

Şekil 3.3. Hacim ve nem kaybı yüzdesi




Şekil 3.4. Ağırlığın azaltılması ve sızıntı suyu üretimi

Biyo-kurutma prosesinde ağırlık kaybı, sızıntı suyu çıkışıyla ve nemin buharlaştırılması yoluyla gerçekleştirilmektedir (Negoi ve diğ., 2009; Rada ve diğ., 2007; Robles-Martinez ve diğ., 2012). Yedi günlük biyo-kurutmadan sonra ağırlık kaybı oranları şunlardır: D1, D2, D3 ve D4 deneyleri için sırasıyla % 56,8, % 53,2, % 39,2 ve % 36,7 olarak belirlenmiştir (Tablo 3.4 ve Şekil 3.4). Ortalama olarak, D1'de en yüksek ağırlık kaybı 4,06 kg/gün olarak meydana gelirken, D4'de (3.14 kg/gün) en düşük olmuştur. Hacim azaltımı açısından ise sırasıyla D1, D2, D3 ve D4 için % 82,9, % 84,9, % 65,0 ve % 77,1 verim elde edilmiştir. GA içeren atık matrisindeki biyo-kurutma sonunda düşük hacim ve ağırlık azalması muhtemelen GA'nın biyolojik parçalanabilirliğinin çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan gözlemlerde GA'nın biyo-kurutma prosesinden sonra aynı yapı özelliğini

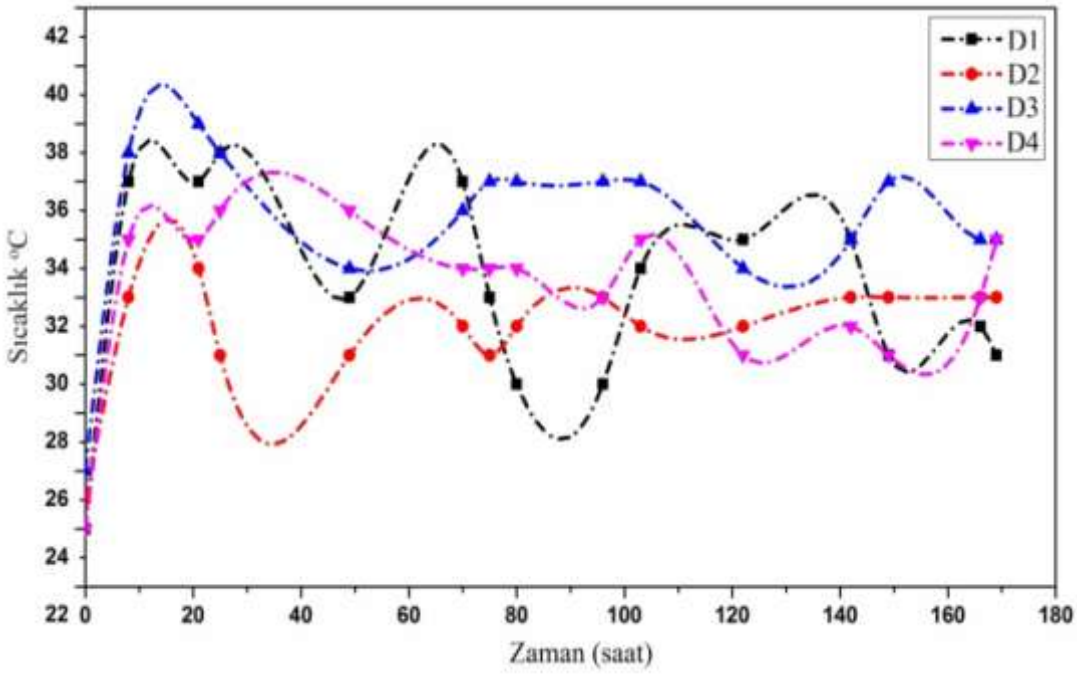
koruduğu görülmüştür. Bu durumdan bağımsız olarak, D4 haricindeki tüm denemelerde sızıntı suyunun üretimi de ağırlık kaybının dinamikleri üzerinde önemli etkiye sahip olmuştur. Sonuç olarak, atık matrisindeki GA varlığı sızıntı suyu üretimi ve ağırlık kaybı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Robles-Martinez ve diğ. (2012)'na göre, biyo-kurutma işleminin ilk iki gününde sızıntı suyu yoluyla hammaddenin % 15 - 20 oranında su içeriği kaybedilmiştir. Bizim yaptığımız çalışmada ise GA madde içermeyen atık matrislerine % 25 - 30 aralığında ağırlık kaybı sızıntı suyu yoluyla gerçekleşmiştir (Şekil 3.5). Bu çalışmada, nem ve ağırlık azalması arasında pozitif bir korelasyon kurulmuştur. Atığın biyo-kurutma prosesi yoluyla ağırlığının azaltılması faydalıdır, çünkü taşıma yükünün azaltılması aynı zamanda nakliye masraflarını da azaltacaktır.




Şekil 3.5. Zamana karşı ağırlık kaybı yüzdesi profili

Sıcaklık, biyo-kurutma prosesi için önemli bir faktör olup, su uzaklaştırma oranını, biyolojik etkinliği ve enerji verimliliğini önemli oranda etkilemektedir. Başlangıçta denemelerin tamamında ortalama olarak aynı sıcaklıklar kaydedilmiştir. İlk 24 saat boyunca, matris içerisindeki sıcaklık profili benzer bir şekilde artan eğilim göstermiştir (Şekil 3.6). D2 biyo-kurutma prosesi sırasında en yüksek sıcaklığı (38 $^{o}$C) kaydederken, D1 ve D4 en düşük başlangıç sıcaklıklarına sahip olmuştur. Huiliñir ve Villegas (2014); ve Song ve diğ., (2017) tarafından sırasıyla kağıt ve

kağıt hamuru ikincil çamurları ile mutfak atıkları üzerinde gerçekleştirdikleri biyo-kurutma işlemlerinde benzer sıcaklık eğilimleri gözlemlenmişlerdir. Ayrıca, D1, D2 ve D4 için sıcaklık değişim karakteri tüm biyo-kurutma prosesi süresinde sıcaklık artış ve düşüşlerinin 3 farklı döngü yaptığı benzer bir seyir izlemiştir. Deneme işlemlerinin sonunda D1 ve D2'de sıcaklık açısından düşüş eğilimi devam ederken, D3'de ise sıcaklık değişimi sonlanmış ve sabit bir şekilde devam etmiştir. D4'de ise sıcaklık artışı hala sürerken, D1 ve D3'e göre sırasıyla 4 $^{o}$C ve 2 $^{o}$C daha yüksek sıcaklıklar izlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen düşük sıcaklık ve hala devam eden sıcaklık artış eğilimlerinin, matrislerin farklı yapısal kompozisyonu, proses işleminde karıştırma ekipmanının bulunmaması ve yetersiz hava-akımı ile ilişkilendirmek mümkündür (Zawadzka ve diğ., 2010). Zhao ve diğ. (2011) gerçekleştirdikleri çalışmada, biyo-kurutma sırasında sık karıştırmanın sıcaklık artışı üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklık profiline göre, matrisin kendiliğinden maksimum ısınmasının (yani, en yüksek sıcaklıklara ulaşmasının), yoğun mikrobiyal aktivite gösterilen ilk 24 saat içinde meydana geldiği görülmüştür. Bu, biyo-kurutma prosesinin başlangıç aşamasının çok önemli olduğunun bir göstergesidir (Ragazzi ve Rada, 2012; Sadaka ve diğ., 2011).




Şekil 3.6. Biyo-kurutma prosesi sırasında sıcaklık dinamiği

### 3.4. Gözenek Arttırıcı Maddelerin Biyo-kurutmaya Etkisi

Budama atığının GA olarak kullanılması, atık matrisinin başlangıçtaki nem içeriğini ayarlamasının yanı sıra biyo-kurutma sırasında atık içerisindeki hava akışını kolaylaştırmaktadır. Nem içeriği ne kadar düşük olursa, atıkların kalorifik değeri veya enerji içeriği de o kadar yüksek olmaktadır (Yang ve diğ., 2014). Çalışmada gerçekleştirilen tüm deneme sonuçlarına göre, GA'nın nem azaltımını büyük ölçüde arttırdığı ve böylece kalorifik değerin yükselmesine katkı sağladığı belirlenmiştir. Aynı zamanda, GA maddeler, hem parçalanmış hem de parçalanmamış atık matrisinin biyo-kurutma performansını geliştirmektedir. GA varlığı, havanın atık matrisi içerisinden geçmesine olanak veren hacimsel bir etkiye neden olmuş ve konveksiyon yoluyla yığının kurutulmasına katkı sağlamıştır. GA maddeler, organik madde degradasyonunu arttırmak için gözenekli ve homojen bir ortam da oluşturmaktadır. Bununla birlikte, D3 ve D4'teki nem içeriğindeki azalma GA'nın fiziksel yapısı ve kimyasal bileşimi nedeniyle, GA içermeyen matrise göre % 27 daha yüksek olmuştur. Biyo-bozunur atık matrisi öğütüldüğünde, GA madde eklenmesine karşın düşük miktarda sızıntı suyu üretildiği belirlenmiştir. Buna karşın, öğütme işlemi yapılmadan GA eklenerek gerçekleştirilen biyo-kurutma işleminde (D4) sızıntı suyu oluşmamıştır. Bunlara ek olarak, GA içeren biyolojik olarak kurutulmuş yakıtlarda daha yüksek kalorifik değerler kaydedilmiştir. Biyolojik olarak kurutulmuş materyalin kalorifik değerindeki artış, D1 için % 181 (2,29 MJ/kg)'e ulaşırken, kalorifik değer artışı daha düşük (% 82) olmasına karşın en yüksek kalorifik değer 6.86 MJ/kg ile D3'de gerçekleşmiştir (Tablo 3.4).

### 3.5. Optimum Koşulların Analizi

#### 3.5.1. Optimum koşullar

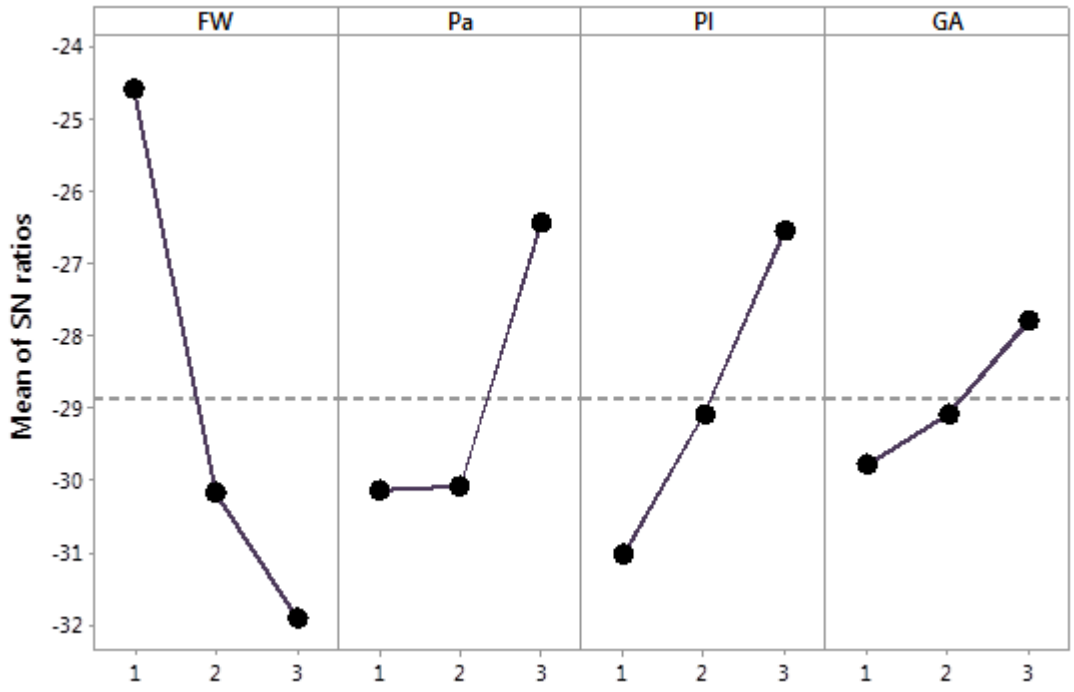
Optimum koşulların belirlenmesinde ve nem içeriği ile kalorifik değer parametrelerini etkileyen faktörlerin seçilmesinde Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, öncelikle optimize edilecek faktörler ve bunların seviyeleri tanımlanmıştır. Dikey sıralar yöntemine göre Taguchi deney tasarımı Tablo 2.2'de gösterilmiştir. Tasarımla belirlenen dokuz denemenin hepsi, atık türlerinin nem içeriği ve kalorifik değer parametresi üzerindeki etkilerinin belirlemesi amacıyla

gerçekleştirilmiştir. Nem içeriği ve kalorifik değerin ortalama deney sonuçları ve S/N oranları Tablo 3.5'te sunulmuştur.

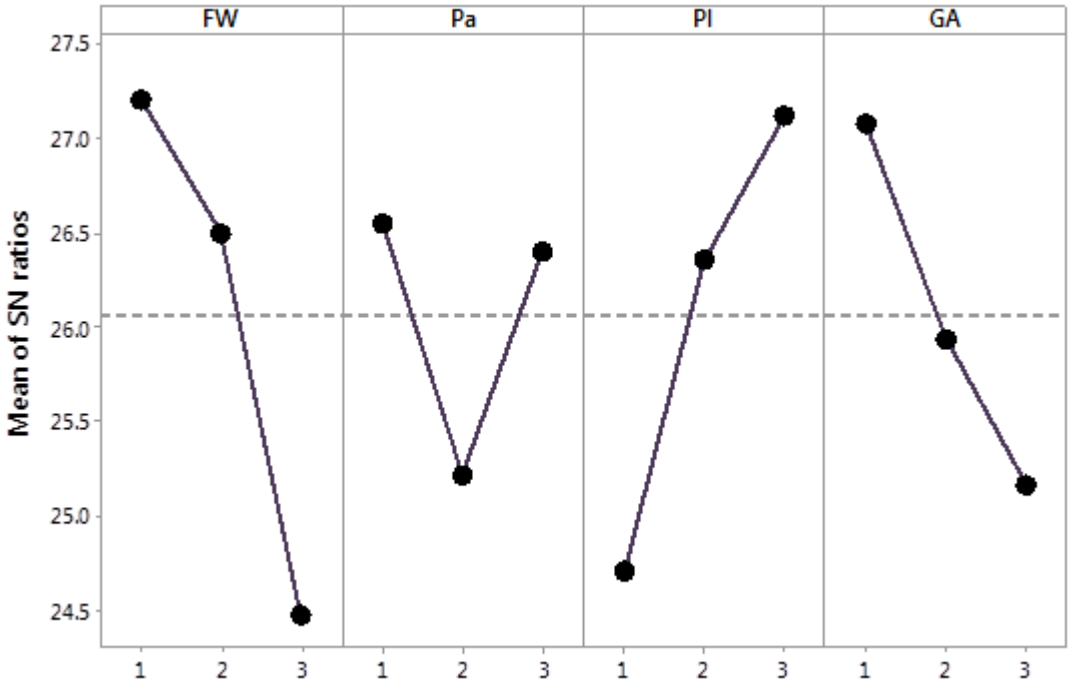
Tablo 3.5. $L_9$ ($3^4$) dikey sıralı ve NI ile KD ortalama deney sonuçları

| Deney | FW | Pa | Pl | GA | NI (%) | S/N | KD (MJ/kg) | S/N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 2 | 3 | 0 | 27.77 | -28.87 | 23.34 | 27.32 |
| 2 | 15 | 6 | 8 | 3 | 20.31 | -26.15 | 21.24 | 26.58 |
| 3 | 15 | 8 | 10 | 6 | 8.59 | -18.68 | 24.32 | 27.74 |
| 4 | 25 | 2 | 8 | 6 | 33.57 | -30.52 | 20.88 | 26.42 |
| 5 | 25 | 6 | 10 | 0 | 31.26 | -29.90 | 24.35 | 27.70 |
| 6 | 25 | 8 | 3 | 3 | 31.81 | -30.05 | 18.56 | 25.32 |
| 7 | 35 | 2 | 10 | 3 | 35.53 | -31.01 | 19.73 | 25.94 |
| 8 | 35 | 6 | 3 | 6 | 50.93 | -34.14 | 11.74 | 21.32 |
| 9 | 35 | 8 | 8 | 0 | 33.62 | -30.53 | 20.26 | 26.12 |

Yanıt değişkenlerinin optimizasyonu, her parametre seviyesindeki S/N oranları kullanılarak belirlenmiştir. Yanıt değişkenleri için her bir faktörün S/N oranı, Şekil 3.7 ve 4.8'de verilmiştir. Beklendiği üzere, eklenen FW miktarının artışına paralel olarak NI değerinin de arttığı gözlenmiştir. Bu sorun, FW'nin yüksek nem içeriği ve düşük gözenekliliğinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla biyo-kurutma sürecinde FW içeriği yüksek atık matrisleri içerisinde oksijenin kolay taşınması engellenmektedir. Sonuç itibarıyla atık matrisindeki hava boşlukları su ile dolmuş; biyo-kurutma prosesinde etkili havalandırma ve biyolojik enerji üretimi sekteye uğramıştır (Yang ve diğ., 2014; Navaee-Ardeh ve diğ., 2011; Komilis ve diğ., 2012). Bu sonuç, atık matrisinde FW'nin artmasının tüm atık matrisinin NI'sini arttırma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Yani, diğer atık maddelerle kıyaslandığında FW miktarı ne kadar yüksek olursa, atık matrisin NI değeri o kadar yüksek olmaktadır. S/N oranlarına göre, minimum NI değeri faktör Pa için 3. seviyede (8 kg) 'de elde edilmekte ve bu sırada S/N oranı -26,39'dan -30,14'e düşmektedir (Tablo 3.6). Bunun nedeni, kağıt atıkların daha düşük su emme kapasitesine sahip olmasıdır. Dolayısıyla biyo-kurutma esnasında atık matrisi içerisindeki Pa, karışımın sızıntı suyunu emme yeteneğini sınırlandırır. Ayrıca dikkat edilmelidir ki, kağıdın su emme kapasitesinin belirlenmesi sırasında kağıdın emdiği suyun boşaltılması da daha uzun sürmekte ve bu biyo-kurutma prosesi için bu durum dezavantaj oluşturmaktadır (Mohammed ve diğ., 2017b; Song ve diğ., 2017).




Şekil 3.7. Nem içeriği için ana etkiler




Şekil 3.8. Kalorifik değer için ana etkiler

Plastik (Pl) atıklar zor parçalanabilir olduklarından, biyo-kurutma proseslerinde önemli bir etkisi olmamasına karşın, atık matrisi içerisindeki plastik atık miktarının artmasıyla nem içeriği azalma eğilimi göstermektedir. Benzer şekilde GA madde içeriğindeki artış, matrise yapısal destek ve yüksek gözeneklilik kazandırdığından

atık matrisi içerisinde uygun havalandırmayı sağlayarak NI'yi düşürme eğiliminde olmaktadır. Bu bulguların İqbal ve diğ., (2010) tarafından geçekleştirilen çalışma verileri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Her bir faktörün maksimum ve minumum değerleri arasındaki fark, ilgili faktörün yanıt (NI ve KD) üzerindeki nispi etkisini göstermektedir. Fark ne kadar büyük olursa, etki o kadar güçlü olmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre FW (7,34) atıklar yanıt değişkeni üzerinde en güçlü etkiyi göstermiştir (Tablo 3.6).

Tablo 3.6. NI için S/N oranları ve yanıt ortalaması - "daha düşük daha iyi" (SB)

| Seviyeler | FW | Pa | Pl | GA |
|---|---|---|---|---|
| S/N oranları | | | | |
| 1 | **-24,55** | -30,14 | -30,99 | -29,74 |
| 2 | -30,14 | -30,06 | -29,09 | -29,09 |
| 3 | -31,90 | **-26,39** | **-26,51** | **-27,76** |
| Max-Min | *7,34* | *3,75* | *4,47* | *1,98* |
| Ortalamalar | | | | |
| 1 | 18,87 | 32,34 | 36,70 | 30,80 |
| 2 | 32,15 | 34,11 | 29,23 | 29,25 |
| 3 | 40,02 | 24,60 | 25,12 | 31,00 |

Koyu renkle gösterilenler optimum değerleri gösterir

Bağımsız değişkenlerin S/N oranlarına göre en iyi NI'ye sahip atık matrisi elde etmek için ilgili faktörlerin seviyeleri ve S/N oranları sırasıyla, FW (Seviye 1, S/N = -24,55), Pa (Seviye 3, S/N = -26,39), Pl (Seviye 3, S/N = -26,51) ve GA (Seviye 3, S/N = -27,76) olarak belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, "daha düşük daha iyi" modeline göre NI için optimum seviyeler $FW_1$ (15 kg), $Pa_3$ (8 kg), $Pl_3$ (10 kg) ve $GA_3$ (6 kg) olarak elde edilmiştir. Düşük NI seviyeleri elde etmek için GA, plastik ve kağıt atıklarının en yüksek seviyeleri, FW atıklarının ise en düşük seviyesinin seçilmesi optimal seçenek olarak görülmektedir.

Bağımsız değişkenlerin S/N oranlarına göre en yüksek KD'ye sahip faktörlerin seviyeleri Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Literatüre göre nem içeriği, yanma prosesi sırasında maddenin kalorifik değeri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Colomer-Mendoza ve diğ., 2013; Mohammed ve diğ., 2017a; Komilis ve diğ., 2012). Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, yüksek KD üretiminin bağımsız değişken seviyelerine bağlı olarak önemli oranda değişim göstermektedir. FW, GA ve Pa'nın 1. seviyesinde sırasıyla 27,21, 27,05 ve 26,56 olarak belirlenen S/N oranları ile yüksek KD değerleri elde edilmektedir. Buna karşın 1. seviyenin üzerindeki değerlerde KD

değeri azalmaktadır. FW miktarının 15 kg'dan 35 kg'a artması, FW'nin yüksek nem içeriğinden dolayı atık matrisinin KD'sinin azalmasına neden olmuştur. FW miktarı, biyo-kurutma prosesinin yanı sıra biyolojik olarak kurutulmuş materyalin enerji içeriği üzerinde de doğrudan bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla biyo-kurutmada optimum NI değeri, mikro organizmaların nem gereksinimlerini sağlayacak ve matris içerisinde yeterli oksijen taşınmasına olanak verecek şekilde eşzamanlı ihtiyaçlar arasındaki dengeyi temsil etmektedir (Iqbal ve diğ., 2010). Kağıt atık içeriğinin artmasının, atık matrisin KD'sinin azalmasına neden olduğu da açıktır (Şekil 3.8). Bu, kağıt atığının düşük termal özelliklerine atfedilebilmektedir (Tablo 2.1). S/N oranları açısından, atık matrisinde GA'nın artan miktarı ile S/N oranı azalmaktadır. GA'nın sistemdeki ana fonksiyonu biyo-kurutmaya yapısal destek sağlamaktır. Bu sayede sağlanacak uygun havalandırma ile NI'deki azalma yüksek KD'ye neden olacaktır. Biyo-kurutma prosesinde GA'nın önemi son zamanlarda bir dizi çalışmalar tarafından vurgulanmıştır (Hansjoerg ve diğ., 2004; Zhao ve diğ., 2011; Zhao ve diğ., 2012). Genel olarak, maddenin kalorifik değerindeki artış esas olarak NI'ye ve termal özelliklerine bağlıdır. Pl miktarı 3 kg'dan 10 kg'a çıktığında KD'deki artış, atık matrsinin termal özelliklerinin geliştrilmesinde plastik atıkların önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.7. KD için S/N oranları ve yanıt ortalaması - "daha yüksek daha iyi" (LB)

| Seviyeler | FW | Pa | Pl | GA |
|---|---|---|---|---|
| S/N oranları | | | | |
| 1 | **27,21** | **26,56** | 24,65 | **27,05** |
| 2 | 26,48 | 25,20 | 26,37 | 25,95 |
| 3 | 24,86 | 26,39 | **27,13** | 25,16 |
| Max-Min | *2,75* | *1,36* | *2,47* | *1,89* |
| Ortalamalar | | | | |
| 1 | 22,98 | 21,33 | 17,78 | 22,58 |
| 2 | 21,21 | 19,08 | 20,83 | 19,87 |
| 3 | 17,23 | 21,02 | 22,82 | 18,98 |

Koyu renkle gösterilenler optimum değerleri gösterir

Benzer şekilde, en yüksek KD durumu için optimum kontrol faktörleri seviyeleri: FW (Seviye 1, S/N = 27,21), Pa (Seviye 1, S/N = 26,56), Pl (Seviye 3, S/N = 27,13) ve GA (Seviye 1, S/N = 27,05) olarak belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, "daha büyük daha iyi" modeline göre KD için optimum seviyeler $FW_1$ (15 kg), $Pa_1$ (2 kg) ve $Pl_3$ (10 kg) olarak elde edilmiştir. Pa, KD'nin iyileştirilmesine en az katkıda bulunan

faktör olarak görülmektedir. Bunun sebebi kağıt atıklarının su tutma kapasitesi yüksek olduğundan gıda atıklarının sahip olduğu nem kağıt atıklar tarafından tutulmakta ve hava ile sistemden uzaklaştırılmasının daha uzun sürmesine neden olmaktadır. Beklendiği gibi, diğer faktörler arasında en yüksek plastik atık içeriği değerinin, en yüksek KD değerini elde etmek için en iyi seçim olduğu ortaya çıkarken, GA, FW ve kâğıda ait en düşük değerler optimal seçenekleri göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek KD üretimi için bağımsız faktörlerin her birinin optimizasyonunun önşart olduğunu ortaya koymaktadır.

### 3.5.2. ANOVA sonuçlar

Her bir faktörün önemini daha sistematik olarak değerlendirmek için, varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. ANOVA'nın temel amacı: sonuçlardan gözlemlenen toplam varyasyona göre her bir faktörün ne kadar değişim gösterdiğini ve bu faktörlerden hangisinin sistemin performansını önemli ölçüde etkilediğini belirlemektir. Bu çalışmada, % 95 (0,95) güven seviyesinde ve % 5 (0,05) anlamlılık düzeyinde ANOVA analizi yapılmıştır. ANOVA analizine göre, deneysel tasarımda dikkate alınan tüm faktörler ve etkileşimler istatistiksel olarak % 95 güven seviyesinde anlamlı çıkması, deneysel verilerin hemen hemen tamamının değişkenliğinin önemli etkilerle açıklanabileceğini göstermektedir. İstatistiksel olarak, NI analizlerinde, % 65,21 etki ile en fazla FW atıkları % 0,52 etki ile de en az GA maddeler katkıda bulunmuştur. Bunun anlamı şudur ki, FW, NI üzerinde en etkili faktördür. Sonuç olarak, NI'nin azaltılması için Pl, Pa ve GA sırasıyla ikinci, üçüncü ve dördüncü etkin faktörlerdir (Tablo 3.8).

Tablo 3.8. Varyans analizi sonuçları – NI

| Varyans kaynak | Kareler toplamı (SS) | Ortalama kare (MS) | F – değeri | P – değeri | Katkı (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| FW | 1371,47 | 685,73 | 26374,33 | 0,00 | 65,21 |
| Pa | 306,54 | 153,27 | 5895,02 | 0,00 | 14,58 |
| Pl | 413,92 | 206,96 | 7959,91 | 0,00 | 19,68 |
| GA | 10,99 | 5,497 | 211,41 | 0,01 | 0,52 |
| Hata | 0,23 | 0,026 | | | 0,01 |
| Toplam | 2103,15 | | | | |

S – 0,16; R-sq – 99,98%; R-sq (adj) – 99,96%

FW, % 43,09 katkı ile KD üzerinde en etkili faktördür. Daha yüksek KD üretimi üzerine Pl ve GA, sırasıyla % 32,01 ve % 17,42 oranında benzer eğilimde bir etki göstermiştir (Tablo 3.9). Seçilen faktör koşullarında, Pa, yüksek KD'nin genel üretimi üzerinde bireysel düzeyde en az etkiyi göstermiştir. Bu farklılıklar faktörlerin giriş seviyelerinin geniş varyasyonu, kullanılan faktörlerin termal özellikleri ve nem tutma kapasitelerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. NI ve KD için optimum kontrol faktörü seviyeleri sırasıyla $FW_1^a$, $Pa_3^c$, $Pl_3^b$, $GA_3^d$ ve $FW_1^a, Pa_1^d, Pl_3^b, GA_1^c$ olarak belirlenmiştir (Tablo 3.10). NI ve KD için sırasıyla verilen % 0,01 ve % 0,07 hata yüzdeleri oldukça düşüktür. Bu çalışmada, gıda atığındaki küçük bir değişimin nem içeriğinde dramatik bir değişime neden olabileceği ve daha sonra enerji değerini etkileyebileceği görülmektedir.

Tablo 3.9. Varyans analizi sonuçları – KD

| Varyans kaynak | Kareler toplamı (SS) | Ortalama kare (MS) | F – değeri | P – değeri | Katkı (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| FW | 104,09 | 52,05 | 2726,45 | 0,00 | 43,09 |
| Pa | 17,91 | 8,95 | 469,11 | 0,00 | 7,41 |
| Pl | 77,32 | 38,66 | 2025,22 | 0,00 | 32,01 |
| GA | 42,09 | 21,05 | 1102,53 | 0,00 | 17,42 |
| Hata | 0,17 | 0,019 | | | 0,07 |
| Toplam | 241,58 | | | | |

S – 0,14; R-sq – 99,93%; R-sq (adj) – 99,72%

Tablo 3.10. NI ve KD'nin optimum seviye ve performans değerleri

| | Faktörler | | | |
|---|---|---|---|---|
| | FW | Pa | Pl | GA |
| Nem içeriği | | | | |
| Optimum seviye | $1^a$ | $3^c$ | $3^b$ | $3^d$ |
| Performans değeri | 15 | 8 | 10 | 6 |
| | | | | |
| Kalorifik değer | | | | |
| Optimum seviye | $1^a$ | $1^d$ | $3^b$ | $1^c$ |
| Performans değeri | 15 | 2 | 10 | 0 |

a, b, c ve d üst simgesi, etkili faktörlerin sırasıdır

### 3.5.3. Performans karakteristiklerinin tahmini

Taguchi yöntemindeki optimal kontrol parametreleri kullanılarak, kalite özelliklerinin tahmini ve geliştirilmesi için bir doğrulama testi gerekmektedir. Kontrol faktörlerinin optimum seviyelerinde (SB) ($FW_1Pa_3Pl_3GA_3$) tahmin edilen

NI'nin ($NI_{opt}$) ortalaması, denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır (Taguchi ve diğ., 2005).

$$NI_{opt} = T_{orta} + (FW_1 - T_{orta}) + (Pa_3 - T_{orta}) + (Pl_3 - T_{orta}) + (BA_3 - T_{orta}) \quad (3.2)$$

Burada; $NI_{opt}$ NI'nin ortalama tahmin değeri; $T_{orta}$ NI'nin deneysel sonuçlarının ortalaması ve $FW_1Pa_3Pl_3$ ve $GA_3$; bu atık türlerinin optimum seviyelerine göre belirlenen ortalama NI değerleridir. Kontrol faktörlerinin kombinasyonu kullanılarak tahmin denklemine göre, NI'nin değeri 8,46 bulunurken, laboratuvarda gerçekleştirilen gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre ise 8,59 belirlenmiştir (Tablo 3.11). Ayrıca, optimal koşullardan elde edilen oranının 3. denemeye yakın olduğu gözlenmiştir. Dokuz deneme arasından, Deneme 3 en yüksek S/N oranına sahip olandır. Benzer bir şekilde, optimum koşullardan elde edilen NI değeri (8,46) ve 3. deneme (8,59) anlamlı ölçüde birbirlerine yakın çıkmıştır. 3. denemenin kontrol faktörleri ve NI'nin optimum koşullarının aynı olması oldukça dikkate değerdir. Optimize edilmiş koşullarda elde edilen NI değeri ve S/N oranı, $L_9$ dikey sıralardan elde edilen maksimum NI ve S/N oranına göre daha yüksek olmuştur (Tablo 3.5 – 3. deneme). Bunun sonucu olarak, ortaya çıkan model kabul edilebilir bir doğrulukla NI'yi öngörebilme yeteneğine sahip olduğu görünmektedir. NI'nin için % 1,54'lik hata yüzdesi hesaplanmıştır.

Tablo 3.11. NI ve KD için tahmin ile doğrulama testlerinin sonuçlarının karşılaştırılması

| Seviye | Deneysel | Tahmin edilmiş | Hata (%) |
|---|---|---|---|
| NI (%) | | | |
| $FW_1Pa_1Pl_1GA_1$[a] | 27,77 | 27,58 | 0,69 |
| $FW_1Pa_3Pl_3GA_3$[b] | 8,59 | 8,46 | 1,54 |
| $FW_1Pa_3Pl_3GA_3$[c] | 8,59 | 8,46 | 1,54 |
| KD (MJ/kg) | | | |
| $FW_1Pa_1Pl_1GA_1$[a] | 23,34 | 23,56 | 0,94 |
| $FW_1Pa_1Pl_3GA_1$[b] | 25,50 | 24,90 | 2,41 |
| $FW_1Pa_3Pl_3GA_3$[c#] | 24,32 | 23,97 | 1,46 |

[a] Başlangıç koşulları için kontrol faktörleri
[b] Optimum koşullar için kontrol faktörleri
[c] D3 için kontrol faktörleri (NI için en yüksek S/N değeri)
[c#] D3 için kontrol faktörleri (KD için en yüksek S/N değeri)

Aynı şekilde, kontrol faktörlerinin optimum düzeylerinde (LB) KD'nin ortalama tahmin değerleri ($FW_1Pa_1Pl_3GA_1$) denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır (Taguchi ve diğ., 2005).

$$KD_{opt} = T_{orta} + (FW_1 - T_{orta}) + (Pa_1 - T_{orta}) + (Pl_3 - T_{orta}) + (BA_1 - T_{orta}) \quad (3.3)$$

Burada; $KD_{opt}$ ortalama tahmin değeri; $T_{orta}$ KD'nin deneysel sonuçlarının ortalaması ve $FW_1Pa_1Pl_3$ ve $GA_1$; bu atık türlerinin optimum seviyelerine göre belirlenen ortalama KD değerleridir (Tablo 3.9). Kontrol faktörlerinin kombinasyonu kullanılarak tahmin denklemine göre, KD'nin değeri 24.90 bulunurken, laboratuvarda gerçekleştirilen gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre ise 25,50 belirlenmiştir. KD'nin için % 2,41'lik hata yüzdesi hesaplanmıştır. Tahmin ile deney sonuçları arasındaki fark ihmal edilebilir düzeyde olup, KD'nin güven aralığı içinde tahmin edilmesi sağlanmıştır. KD analizlerine göre optimal koşullardan elde edilen S/N oranının, gerçekleştirilen 9 deneme arasında en yüksek S/N oranına sahip (S/N = 27,74) 5. denemeden elde edilenkinden biraz daha yüksek olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu sonuçlar, Taguchi yönteminin, yüksek KD üretimini optimize etmek için etkili bir şekilde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

### 3.6. KTY'nin Nitel Sınıflandırması

Katı atıktan türetilmiş yakıtlar, EN 15359'a göre belirli kalite standartlarına sahip olmalıdırlar. Bu standart, çevresel korunma ve yakma ekipmanlarının yanı sıra nihai ürünün kalitesi için de standart sağlamaktadır. Bu standardın çıkartılmasındaki temel amaç, yakıt pazarında KTY'nin yakıt olarak kabulünün ve ticari bir ürün olarak kullanımının teşvik edilmesidir.

Yapılan çalışmada elde edilen KTY, üç önemli yakıt özelliğinin limit değerlerine göre sınıflandırılmıştır (Tablo 1.1): Ekonomik gösterge olarak net kalorifik değer (NCV), işletme göstergesi olarak klor (Cl) içeriği ve çevresel gösterge olarak cıva (Hg) içeriği parametreleri yakıt sınıflandırmasında kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen KTY sınıflandırması Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Elde edilen KTY'nin sınıflandırılması

| Deneme | NCV MJ/kg, w/w | | Klor (Cl) wt. %, d (w/d) | | Cıva (Hg) mg/MJ, w/w | | Sınıf kodu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ortalama | Sınıf | Ortalama | Sınıf | $80^{th}$ yüzdelik | Sınıf | NCV: Cl: Hg |
| 1 | 23,34 | 2 | 0,014 | 1 | 0,07 | 3 | 2:1:3 |
| 2 | 21,24 | 2 | 0,005 | 1 | 0,03 | 1 | 2:1:1 |
| 3 | 24,32 | 2 | 0,007 | 1 | 0,04 | 1 | 2:1:1 |
| 4 | 20,88 | 2 | 0,010 | 1 | 0,02 | 1 | 2:1:1 |
| 5 | 24,35 | 2 | 0,012 | 1 | 0,04 | 2 | 2:1:1 |
| 6 | 18,56 | 3 | 0,007 | 1 | 0,04 | 1 | 3:1:1 |
| 7 | 19,73 | 3 | 0,000 | 1 | 0,03 | 1 | 3:1:1 |
| 8 | 11,74 | 4 | 0,009 | 1 | 0,04 | 1 | 4:1:1 |
| 9 | 20,26 | 2 | 0,011 | 1 | 0,02 | 1 | 2:1:1 |

NCV açısından Deneme 5'te, sınıf 2 koduyla en yüksek kalitede KTY üretilirken, Deneme 8'de 4. sınıf kalitede KTY üretilmiştir. Dolayısıyla Deneme 8'de elde edilen KTY, enerji açısından en düşük kaliteye sahip olmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, 5. denemede elde edilen KTY'nin yüksek net kalorifik değeri (FW 25; Pa 6 ve Pl 10), plastik atık katkı miktarına bağlı olurken, 8. denemenin en düşük net kalorifik değeri yüksek gıda ve kağıt içeriğinden kaynaklanmıştır.

Atık bileşenleri kendi arasında incelendiğinde, en düşük klor (Cl) içeriğine sahip olan GA olmuştur. Bunun sonucu olarak da atık matrisindeki GA varlığı, klor (Cl) içeriğini etkin bir şekilde azaltmıştır. Tüm çalışmalarda elde edilen KTY'lerin Cl sınıflandırma kodu 1 olmuştur. Bu, herhangi bir teknik sorun olmaksızın yakma işlemi için iyi kabul edilmektedir.

Cıva (Hg) içeriği ile ilgili olarak, çalışmaların çoğu sınıf 2 olarak adlandırılabilir. Bununla birlikte, yalnızca Deneme 1'den üretilen KTY, alt bir sınıf olan 3 olmuştur. Düşük klor içeriği, muhtemelen atık kompozisyonda ambalaj ve polivinil klorür (PVC) yokluğundan kaynaklanmıştır.

Son olarak, tüm paramtreler gözönüne alındığında % 25 gıda, % 6 kağıt ve % 10 plastik içeriğine sahip atık matrisinin kurutulması ile 2. sınıf kalitede 24.350 kJ/kg'ın üzerinde net kalorifik değere sahip yakıt elde edilmektedir. Rotter ve diğ. (2004) ve Velis ve diğ. (2010) tarafından ifade edildiği gibi, atıkların kökeni ve bileşimine bağlı olarak farklı kalitelerde KTY'lerin elde edilebileceği gözlenebilmektedir. Bunun sonucu olarak, atıklar için doğru kombinasyon uygulandığında KTY'nin

kalitesi iyileştirilebilmektedir. Örneğin, atık karışımı içindeki plastik miktarının azaltılması, elde edilen KTY'deki Cl içeriğini azaltabilmektedir. Aynı zamanda tehlikeli atıkların doğru bir şekilde ayrılması, Hg gibi ağır metal içeriğini azaltabilmektedir.

# 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 4.1. Sonuçlar

Bu araştırma, biyo-kurutma prosesi ile farklı atık bileşimine sahip atık malzemelerden elde edilen biyo-kurutulmuş maddelerin (katı atıktan türetilmiş yakıt) değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Dört temel aşamada gerçekleştirilen çalışmada, ilk önce kullanılan her atık maddenin biyo-kurutma performansı üzerindeki etkileri su emme kapasiteleri açısından incelenmiş, daha sonra ise gözenek arttırıcı maddelerin biyo-kurutma prosesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmanın 3. aşamasında biyo-kurutma prosesi yoluyla atık bileşiminin, nem içeriği ve kalorifik değerinin optimizasyonu üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Son aşamada ise biyo-kurutulmuş malzemeler, KTY'ler için verilen CEN standart yöntemlerine göre analiz edilerek sınıflandırması yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler şeklinde özetlenmiştir.

- Gözenek arttırıcı maddeler en yüksek su emme kapasitesine (% 68,19) sahipken, plastik atıklarının en düşük su emme kapasitesine (% 35,77) sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, diğer atık malzemelerle karşılaştırıldığında plastik atıklarının daha iyi bir kurutma verimi sağlayacağı gözlenmiştir. Kağıt atıkların su kayıp hızı en yavaş gerçekleşmiş olandır ve bu durum biyo-kurutma için dezavantaj oluşturmuştur.

- Yedi günlük biyo-kurutma prosesinin sonunda, gözenek arttırıcı madde içeren biyo-kurutulmuş matriste, gözenek arttırıcı madde içermeyen matrise göre % 27 daha fazla nem azalması kaydedilmiştir. Gözenek arttırıcı madde kullanılmasının hem nem içeriğinin azalması hem de kalorifik değerin artışı açısından yeşil atıkların biyo-kurutulması üzerinde olumlu bir etkisi olmuştur.

- Sadece yeşil atık içeren atık matrislerinde gözenek arttırıcı madde ilavesi ağırlık ve hacim azaltımı açısından benzer etkiler gösterse de, enerji üretiminde kullanılacak SRF özelliklerini karşılayamamaktadır. Dolayısıyla bu işlem, sadece

- yeşil atık içeren metrislerde taşıma maliyetlerini azaltmak amacıyla ön işlem olarak uygulanabilir ve daha sonra diğer atık matrisleriyle belli oranlarda karıştırılmak suretiyle enerji kazanımında kullanılabilecek SRF haline getirilebilir.

- Yeşil atıklara biyo-kurutma esnasında gözenek arttırıcı madde eklenmesi sızıntı suyu oluşumu olmadan nem azaltılmasına da katkı sağlamıştır. Bu durumda ayrıca sızıntı suyu sorununa çözüm sağlanmış olacaktır.

- Biyo-kurutma indeksi açısından gerçekleştirilen çalışmalarda, gözenek arttırıcı madde ve diğer atıkların atık matrisindeki oranının nem, uçucu madde, ağırlık ve hacim azaltma açısından etkileri arasında büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. Gözenek arttırıcı madde içeren atık matrisinde daha yüksek biyo-kurutma indeksi (% 64 gıda atığı, % 21 kağıt, % 8 plastik ve % 8 gözenek arttırıcı madde ile % 60,43 başlangıç nem içeriği), daha düşük matris sıcaklığı ve uçucu madde tüketimi gözlenmiştir.

- Nem içeriği ve kalorifik değeri için optimum koşullar sırasıyla $FW_1Pa_3Pl_3BA_3$ ve $FW_1Pa_1Pl_3BA_1$ olarak elde edilmiştir.

- Optimum koşullar, yanıt değişkenlerinin performansında açık bir gösterge sağlayarak, nem içeriğinin % 80 azaldığını ve kalorifik değerin % 74 arttığını gösterilmiştir.

- Gıda atığı miktarı, nem içeriğinin azaltılmasında önemli bir rol oynarken, plastik atık içeriği ise yüksek kalorifik değer üretimi ile pozitif ilişkili bulunmuştur. Dolayısıyla, gıda atığındaki küçük bir değişimin nem içeriğinde dramatik bir değişime neden olabileceği ve daha sonra enerji değerini etkileyebileceği görülmektedir.

- Biyo-kurutma işlemi sırasında tüm atık karışımındaki atık maddelerin miktarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Gıda atıklarının biyo-kurutma prosesi ile diğer atık maddelerle birlikte kullanılması, alternatif atık yönetimi yaklaşımı sunulmasına ve biyo-bozunabilir atıkların bertaraf edilmesinden kaynaklanan çevre kirliliğini azaltmaya yardımcı olacaktır.

- CEN tarafından verilen SRF sınıflamasına göre yapılan çalışmada üretilen biyo-kurutulmuş maddelerin kalitesi, sınıf 2 - 4 aralığında bulunmuştur. Diğer malzemelere kıyasla plastiğin yüksek klor içeriği nedeniyle, yanma sırasında teknik zorlukların önlenmesi için atık karışımındaki miktarının azaltılması tavsiye edilmektedir. Aynı şekilde iyi bir KTY elde etmek için civa (Hg) gibi ağır metal içeriğinin azaltılması için biyo-kurutma öncesi tehlikeli atıkların ayrılması gerekmektedir.

- Bu sonuçlara göre, biyo-kurutma hem yakma işleminde biyo-ürünün enerji kaynağı olarak kullanılabilir hale getirilmesinde ön arıtma işlemi olarak hem de koku salınımı olmadan kısmi olarak stabilize ürünün depolanması için kullanılabilir bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir.

### 4.2. Öneriler

Konu ile ilgili gelecekte yapılması gerekli çalışmalarla ilgili önerilerimiz aşağıda verilmiştir.

- Biyo-kurutulmuş maddenin enerji değerini korumak veya arttırmak için gözenek arttırıcı maddenin kullanımının maksimuma çıkarılması hususunda daha fazla araştırma veya inovasyon gerekmektedir. Bu, gözenek arttırıcı madde miktarı ve çıkış ürünü değiştirilerek sağlanabilir ve böyle bir durumda biyo-kurutulmuş yakıt (KTY/SRF) çimento endüstrisinde ilave yakıt olarak kullanılabilir.

- Gelecekte daha yüksek kalorifik değere sahip SRF üretiminde gıda atıklarının kullanımını arttırmak için farklı fizikokimyasal özelliklere sahip gıda atıklarına yönelik biyo-kurutma çalışmaları gerçekleştirilerek, etki eden faktörlerin optimum koşullarının belirlenmesine yönelik daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

- Bu tür çalışmaların endüstriyel bazda uygulanabilirliğini arttırmak için maliyet analizleri yapılarak, prosesi ekonomik hale getirecek inovasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

- Bu çalışmada sadece alttan havalandırmalı dikdörtgen reaktörde kurutma süreçleri araştırılmıştır. Silindirik veya farklı şekillerde havalandırmalı reaktörler ile daha kısa sürede biyo-kurutma sağlayacak reaktör şartları da araştırılmalıdır.

- Türkiye'deki farklı bölgelerin atık kompozisyonundaki bileşen yüzdelerine göre yakıt nitelikli ürün elde etmek için ön işlem olarak biyo-kurutma prosesinin uygulunğu incelenmelidir.

## KAYNAKLAR


[1] Abeliotis K., Kalogeropoulos A., Lasaridi K., Life cycle assessment of the MBT plant in Ano Liossia, Athens, Greece, *Waste Management,* 2012, **32,** 213-219.

[2] Adani F., Baido D., Calaterra E., Genevini P., The influence of biomass temperature on biostabilization – biodrying of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, 2002, **3,** 173-179.

[3] Adhikari B.K., Barrington S., Martinez J., King S., Characterization of food waste and bulking agents for composting, *Waste Management,* 2008**, 28,** 795-804.

[4] Agnew J.M., Leonard J.J., Feddes J., Feng Y., A modified air pycnometer for compost air volume and density determination, *Canadian Biosystems Engineering*, 2003, **45,** 6.27-6.35.

[5] Alter H., The recycling of densified refuse-derived fuel, *Waste Management and Research*, 1996, **14,** 311-317.

[6] Angelidaki I., Batstone D.J., *Solid waste technology and management: Anaerobic digestion: Process (Edited by Thomas H. Christensen),* Blackwell Publishing Ltd**,** 2011.

[7] Arena U., Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review, *Waste Management,* 2012, **32,** 625-639.

[8] Asilturk I., Neseli S., Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method based response surface analysis, *Measurement,* 2012, **45,** 785-794.

[9] Aslan N., Ünal İ., Optimization of some parameters on agglomeration performance of Zonguldak bituminous coal by oil agglomeration, *Fuel*, 2009, **88**(3)**,** 490-496.

[10] Ballantyne K.N., van Oorschot R.A., Mitchell R.J., Reduce optimisation time and effort: Taguchi experimental design methods, *Forensic Science International: Genetic*, 2008, **Suppl. Series 1**, 7-8.

[11] Basu P., *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction (Second Edition), Practical Design and Theory*, Academic Press, Inc., New York, 2013.

[12] Bezama A., Aguayo P., Konrad O., Navia R., Lorber K.E., Investigations on mechanical biological treatment of waste in South America: Towards more

sustainable MSW management strategies, *Waste Management,* 2007, **27**(2)**,** 228-237.

[13] Bogner J., Pipatti R., Hashimoto S., Diaz C., Mareckova K., Diaz L., Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) fourth assessment report, *Waste Management and Research,* 2008, **26,** 11-32.

[14] Cai L., Chen T.B., Gao D., Zheng G.D., Liu H.T., Pan T.H., Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying, *Water Research,* 2013, **47**(13)**,** 4767-4773.

[15] CEN (European Committee for Standardization), Solid Recovered Fuels – Specifications and Classes, DD CEN/TC 343/WG2 N111, 2007.

[16] CEN (European Committee for Standardization), "Draft Business Plan of CEN/TC 343 Solid Recovered Fuels", (2003).

[17] CEN, BS EN 14918:2009, Solid biofuels, Determination of calorific value, The Committee for European Standardization**,** 2010.

[18] Chang J.I., Chen Y.J., Effects of bulking agents on food waste composting, *Bioresource Technology,* 2010, **101**(15)**,** 5917-5924.

[19] Chang Y.F., Lin C.J., Chyan J.M., Chen I.M., Chang J.E., Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan, *Journal of Environment Management,* 2007, **85,** 891-899.

[20] Cheng H.F., Zhang Y.G., Meng A.H., Li Q.H., Municipal solid waste fueled power generation in china: a case study of waste-to-energy in Changchun city, *Environmental Science and Technology*, 2007, **41,** 7509-7515.

[21] Choi H.L., Richard T.L., Ahn H.K., Composting high moisture materials: Biodrying poultry manure in a sequentially fed reactor, *Compost Science and Utilization,* 2001, **9**(4), 303-311.

[22] Colomer-Mendoza F.J., Herrera-Prats L., Robles-Martinez F., Gallardo-Izquierdo A., Pina-Guzman A.B., Effect of airflow on biodrying of gardening wastes in reactors, *Journal of Environmental Sciences,* 2013, **25**(5), 865-872.

[23] Döing M., *Waste management: The market for mechanical biological waste treatment plants in Europe*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016.

[24] EC (European Commission), Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land, *Final Report, Part I,* 2008 <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_i_report.pdf>, (Ziyaret tarihi: 30 Haziran 2017).

[25] Elango D., Pulikesi M., Baskaralingam P., Ramamurthi V., Sivanesan S., Production of biogas from Municipal solid waste with domestic sewage, *Journal of Hazardous Materials,* 2007, **141,** 301-304.

[26] EN 15359 Solid recovered fuels, Specifications and classes, <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[27] EN 15400 Solid recovered fuels, Determination of calorific value, <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[28] EN 15407 Solid recovered fuels, Methods for the determination of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) content, <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[29] EN 15408 Solid recovered fuels, Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content, <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[30] EN 15411 Solid recovered fuels, Methods for the determination of the content of trace elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V and Zn), <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[31] EN 15413 Solid recovered fuels, Methods for the preparation of the test sample from the laboratory sample, <http://www.aenor.es> (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2017).

[32] ERFO – European Recovered fuels organization: SRF achieving environmental and energy-related goals markets, 2006.

[33] ERFO - European Recovered Fuel Organization, Facts and figures about SRF, <http://erfo.info/Facts-andfigures> (Ziyaret tarihi: 15 Kasım 2017).

[34] European Commission, Council Directive, 1999/317 EC of 26 April 1999 on the landfill of waste", *Official Journal of the European Communities***,** L 182 16/07/1999, 1999.

[35] European Commission, 2003, Refuse Derived Fuel, Current practice and perspectives, European Commission, 2005, Eurostat; <http://ec.europa.eu/ environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf> (Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2017).

[36] European Union Commission, Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, 2000.

[37] Frei K.M., Cameron D., Jasmin S., Stuart P.R., Novel sludge drying process for cost effective on-site sludge management, *Pulp Pap. Canada*, 2006, **107,** 47-53.

[38] Frei K.M., Cameron D., Stuart P.R., Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix, *Drying Technology*, 2004, **22**(5), 1191-1215.

[39] Garcés D., Díaz E., Sastre H., Ordóñez S., González-LaFuente J.M., Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels, *Waste Management*, 2015, **47,** 164-173.

[40] Garg A., Smith R., Hill D., Longhurst P.J., Pollard S.J.T., Simms J., An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste, *Waste Management,* 2009, **29,** 2289-2297.

[41] Gea T., Barrena R., Artola A., Sánchez A., Optimal bulking agent particle size and usage for heat retention and disinfection in domestic wastewater sludge composting, *Waste Management*, 2007, **27**(9), 1108-1116.

[42] Glorious T., *Production and use of solid recovered fuels – developments and prospects,* REMONDIS GmbH, Cologne/Germany, 2014.

[43] Hansjoerg H., Boeddeker H.J., Gurudas S., Schaefer K., Roth B., Roth J., *Process and apparatus for biological drying of residual waste, sewage sludge and/or biomass*, European Patent EP1408021, 14-04-2004, European Patent Office, 2004, p. 5.

[44] Harborth P., Fuß R., Münnich K., Flessa H., Fricke K., Spatial variability of nitrous oxide and methane emissions from an MBT landfill in operation: Strong $N_2O$ hotspots at the working face, *Waste Management,* 2013, **33,** 2099-107.

[45] He P.J., Shao L.M., Qu X., Li G.J., Lee D.J., Effects of feed solutions on refuse hydrolysis and landfill leachate characteristics, *Chemosphere,* 2005, **59**(6), 837-844.

[46] Hoffmann G., Schirmer M., Bilitewski B., *Chlorstudie, Wirtschaftsf orderungszentrum Ruhr fur Entsorgungs and Verwertungstechnik e.V.,* Ruhr, Germany, 2007.

[47] Huilinir C., Villegas M., Biodrying of pulp and paper secondary sludge: kinetics of volatile solids biodegradation, *Bioresource Technology,* 2014, **157,** 206-213.

[48] IEA (International Energy Agency), *Energy technology perspectives 2006 – scenarios and strategies to 2050,* OECD/IEA, Paris, 2006.

[49] Ionescu G., Radam E.C., Ragazzi M., Marculescu C., Badrea A., Apostol T., Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes, *Energy Conversion and Management,* 2013, **76,** 1083-1092.

[50] Iqbal M.K., Shafiq T., Ahmed K., Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost, *Bioresource Technology*, 2010, **101,** 1913-1919.

[51] İzzet Ö., *Katı atık yönetimi ve AB uyumlu uygulamları,* İSTAÇ A.Ş., Teknik kitaplar Serisi 2, 2011.

[52] Khan A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., Biomass combustion in fluidised bed boilers: potential problems and remedies, *Fuel Processing Technology,* 2009, **90,** 21-50.

[53] Komilis D., Evangelou A., Giannakis G., Lymperis C., Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes, *Waste Management,* 2012, **32,** 372-381.

[54] Kost T., *Brennstofftechnische Chakterisierung von Haushaltabfällen,* Dr.-Ing. Dissertation, Universität Dresden, Germany [in German], 2001.

[55] Laner D., Crest M., Scharff H., Morris J.W.F., Barlaz M.A., A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills, *Waste Management,* 2012, **32,** 498-512.

[56] Liang C., Das K.C., McClendon R.W., The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend, *Bioresource Technology,* 2003, **86,** 131-137.

[57] Luo W., Chen T.B., Zheng G.D., Gao D., Zhang Y.A., Gao W., Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage, *Resource Conversation and Recycling,* 2008, **52**(4), 635-642.

[58] Malińska K., Zabochnicka-Świątek M., Selection of bulking agents for composting of sewage sludge, *Environment Protection,* 2013, **39,** 91-102.

[59] Marb C., Przybilla I., Neumeyer F., Janet F., *Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Germany, 2003.

[60] Margesin R., Cimadom J., Schinner F., Biological activity during composting of sewage sludge at low temperatures, *International Biodeterioration and Biodegradation,* 2006, **57,** 88-92.

[61] Marshall R., Farahbakhsh K., Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries, *Waste Management,* 2013, **33**(4), 988-1003.

[62] Maystre L.Y., Viret F., A goal-oriented characterization of urban waste, *Waste Management and Research,* 1995, **13**(3), 207-218.

[63] Menikpura S.N.M., Gheewala S.H., Bonnet S., Chiemchaisri C., Evaluation of the effect of recycling on sustainability of municipal solid waste management in Thailand, *Waste and Biomass Valorization,* 2013, **4,** 237-257.

[64] Mohammed M., Ozbay I., Durmusoglu E., Bio-drying of green waste with high moisture content, *Process Safety and Environmental Protection,* 2017a, **111,** 420-427.

[65] Mohammed M., Ozbay I., Karademir A., Isleyen M., Pre-treatment and utilization of food waste as energy source by bio-drying process, *Energy Procedia*, 2017b, **128,** 100-107.

[66] Nasrullah M., Vainikka P., Hannula J., Hurme M., Quality of SRF produced from commercial and industrial waste and construction and demolition waste based on the mass, energy and elemental balance, *In: 14th International Waste Management and Landfill Symposium,* 30 September – 4 October 2013, Santa Margherita di Pula, Cagliari, Italy Proceedings. CISA Publisher.

[67] Navaee-Ardeh S., Bertrand F., Stuart P.R., Development and experimental evaluation of a 1D distributed model of transport phenomena in a continuous biodrying process for pulp and paper mixed sludge, *Drying Technology*, 2011, **29,** 135-152.

[68] Navaee-Ardeh S., Bertrand F., Stuart P.R., Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges, *Drying Technology*, 2006, **24,** 863-878.

[69] Negoi R.M., Ragazzi M., Apostol T., Rada E.C., Marculescu C., Biodrying of Romanian municipal solid waste: an analysis of its viability, *University Politehnica Bucharest - UPB - Scientific Bulletin Series C,* 2009, **71**(4).

[70] Pantini S., Verginelli I., Lombardi F., A new screening model for leachate production assessment at landfill sites, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, **11**(6), 1503-16.

[71] Petric I., Šestan A., Šestan I., Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure, *Process Safety and Environmental Protection*, 2009, **87**(3), 206-212.

[72] Pires A., Martinho M.G., Silveira A., Could MBT plants be the solution to fulfill landfill directive targets in Portugal? In: Kuehle-Weidemeir, M. (Ed.), *International Symposium MBT, 2007***,** Hanover, Germany, 22–24 May 2007, 63-72.

[73] Pretz T., Khoury A., Uepping R., Glorius T., Tubergen J. van., *BREF Waste treatment - Solid recovered fuels*, RWTH-Aachen I.A.R., European Recovered Fuel Organisation (Erfo), 2003.

[74] Rada E.C., Andreottola G., RDF/SRF: Which perspectives for its future in the EU, *Waste Management*, 2012, **32,** 1059-1060.

[75] Rada E.C., Franzinelli A., Taiss M., Ragazzi M., Panaitescu T., Apostol T., Lower heating value dynamics during municipal solid waste bio-drying, *Environmental Technology*, 2007, **4**(28), 463-470.

[76] Ragazzi M., Rada E.C., RDF/SRF evolution and MSW bio-drying, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2012, **163,** 199-208.

[77] Rao R.S., Kumar C.G., Prakasham R.S., Hobbs P.J., The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: A critical appraisal, *Biotechnology Journal*, 2008, **3,** 510-523.

[78] Robles-Martinez F., Silva-Rodriguez E.M., Espinosa-Solares T., Pina-Guzaan B., Calixto-Mosquoeda C., Colomer-Mendoza F.J., Duran-Paramo E., Biodrying under green house conditions as pretreatment for horticultural waste, *Journal of Environmental Protection*, 2012, **3,** 298-303.

[79] Rotter S., Ma W., Hoffmann G., Schirmer M., Origin and fate of chlorine in RDF production processes. In: CISA (ed.), *Proceedings of the Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium,* CISA – Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, 2007.

[80] Rotter V.S., Kost T., Winkler J., Bilitewski B., Material flow analysis of RDF production processes, *Waste Management*, 2004, **24**(10), 1005-1021.

[81] Ryckeboer J., Mergaert K., Vaes S., Klammer D., De Clercq J., Coosemans H., Insam J., A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes, *Annals of Microbiology*, 2003, **53,** 349-410.

[82] Sadaka S., VanDevender K., Costello T., Sharara M., *Partial composting for biodrying organic materials,* Agricultural and Natural Resources, University of Arkansas, FSA1055, 2011.

[83] Scaglia B., Confalonieri R., D'Imporzano G., Adani F., Estimating biogas production of biologically treated municipal solid waste, *Bioresource Technology*, 2010, **101,** 945-952.

[84] Schirmer M., Janz A., Bilitewski B., Rotter S., Sources of chlorine in MSW and RDF – Species, analytical methods and requirements on improved separation methods. In: CISA (ed.), *Proceedings of the Tenth International Waste Management and Landfill Symposium,* CISA – Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, 2005.

[85] Séverin M., Costas A.V., Longhurst P.J., Pollard S.J.T., The biogenic content of process streams from mechanical biological treatment plants producing solid recovered fuel. Do the manual sorting and selective dissolution determination method correlate?, *Waste Management*, 2010, **30,** 1171-1182.

[86] Shao L.M., He X., Yang N., Fang J.J., Luü F., He P.J., Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: drying efficiency and aqueous pollution, *Waste Management and Research*, 2012, **30**(12), 1272-1280.

[87] Shao L.M., Ma Z.H., Zhang H., Zhang D.Q., He P.H., Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery, *Waste Management*, 2010, **30**(7), 1165-1170.

[88] Shuqing Z., Wenxiong H., Ran Y., Song Y., The effect of bio-drying on heating values of municipal solid waste, *Advance Materials Research,* 2014, **1010-1012,** 537-546.

[89] Skourides I., *A semi-industrial investigation of the factors controlling the bioconversion of biodegradable waste to a consistent solid recovered fuel (SRF) for utilization by the cement industry*, PhD Thesis, Imperial College, London, 2009.

[90] Skourides I., Theophilou C., Loizides M., Hood P., Smith S.R., Optimisation of advanced technology for production of consistent auxiliary fuels from biodegradable municipal waste for industrial purposes, *Waste 2006 - Sustainable waste and resource management,* Stratford-upon-Avon, UK 19-21 September 2006, Paper 2B-14.40.

[91] Song X., Ma J., Gao J., Liu Y., Hao Y., Li W., Hu R., Li A., Zhang L., Optimization of bio-drying of kitchen waste: inoculation, initial moisture content and bulking agents, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2017, **19**(1), 496-504.

[92] Soylu M., *Çimento üretiminde istatistikler, Enerji tüketimi, Sürdürülebilirlik*, Hacettepe, Ankara, 2006.

[93] Sugni M., Calcaterra E., Adani F., Biostabilization - biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow, *Bioresource Technology,* 2005, **96,** 1331-1337.

[94] Szabová E., Juriš P., Papajová I., Sanitation composting process in different seasons. Ascaris suum as model, *Waste Management*, 2010, **30,** 426-432.

[95] Tacoli C., *Urbanization, gender and urban poverty: Paid work and unpaid carework in the city,* International Institute for Environment and Development: United Nations Population Fund, London, UK, 2012.

[96] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y., *Taguchi's quality engineering handbook*, ASI Consulting Group, LLC, Livonia, Michigan, 2005.

[97] Tambone F., Scaglia B., Scotti S., Adani F., Effects of biodrying process on municipal solid waste properties, *Bioresource Technology,* 2011, **102**(16), 7443-7450.

[98] Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*, McGraw-Hill, New York, USA, 1993.

[99] Thiel S., *Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanischbiologischen Abfallbehandlung in Kohlekraftwerken [Co-combustion of refuse derived fuels from mechanical- biological waste treatment in coal power plants]*, Dissertation, TK Verlag, 2007.

[100] Thomsen N.I., Milosevic N., Bjerg P.L. Application of a contaminant mass balance method at an old landfill to assess the impact on water resources, *Waste Management,* 2012, **32**(12), 2406-2417.

[101] Tom A.P., Pawels R., Haridas A., Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content, *Waste Management,* 2016, **49,** 64-72.

[102] Tremier A., Teglia C., Barrington S., Effect of initial physical characteristics on sludge compost performance, *Bioresource Technology,* 2009, **100,** 3751-3758.

[103] Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T., Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(12), 979-1105.

[104] Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.T.J., Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering, *Bioresource Technology*, 2009, **100**(11), 2747-2761.

[105] Velis C.A., Wagland S., Longhurst P., Robson B., Sinfield K., Wise S., Pollard S., Solid recovered fuel: materials flow analysis and fuel property development during the mechanical processing of biodried waste, *Environmental Science and Technology*, 2013, **47**(6), 2957-2965.

[106] Velis C.A., Wilson D.C., Rocca O., Smith S.R., Mavropoulos A., Cheeseman C.R., An analytical framework and tool ('InteRa') for integrating the informal recycling sector in waste and resource management systems in developing countries, *Waste Management and Research,* 2012, **30**(9 Suppl), 43-66.

[107] Villegas M., Huilinir C., Biodrying of sewage sludge: Kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates, *Bioresource Technology*, 2014, **174,** 33-41.

[108] White J.K., Beaven R.P., Developments to a landfill processes model following its application to two landfill modeling challenges, *Waste Management,* 2013, **33**(10), 1969-1981.

[109] World Bank, "What a waste: a global review of solid waste management, http://go.worldbank.org/BCQEP0TMO0 (Ziyaret tarihi: 10 Ocak 2016).

[110] Yang B., Hao Z., Jahng D., Advances in biodrying technologies for converting organic wastes into solid fuel, *Drying Technology,* 2017, **35,** 16.

[111] Yang B., Zhang L., Jahng D., Importance of initial moisture content and bulking agent for biodrying sewage sludge, *Drying Technology,* 2014, **32,** 135-144.

[112] Zawadzka A., Krzystek L., Stolarek P., Ledakowicz S., Biodrying of organic fraction of municipal solid wastes, *Drying Technology,* 2010, **28,** 1220-1226.

[113] Zhang D.Q., He P.J., Jin T.F., Shao L.M., Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation, *Bioresource Technology*, 2008, **99,** 8796-8802.

[114] Zhang D.Q., He P.J., Shao L.M., Jin T.F., Han J.Y., Biodrying of municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology, *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(12), 1534-1540.

[115] Zhang D.Q., He P.J., Yu L.Z., Shao L.M., Effect of inoculation time on the bio-drying performance of combined hydrolytic-aerobic process, *Bioresource Technology*, 2009, **100,** 1087-1093.

[116] Zhang L., Sun X.Y., Tian Y., Gong X.Q., Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste, *Bioresource Technology*, 2013, **131,** 68-75.

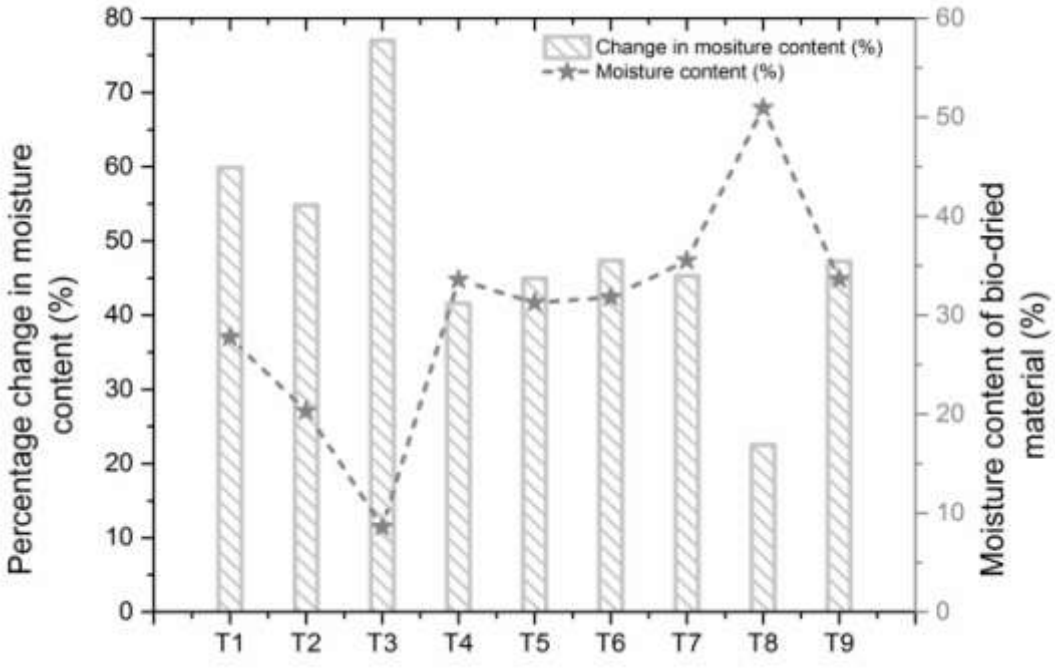
[117] Zhao L., Gu W., Shao L., He P., Sludge bio-drying process at low ambient temperature: effect of bulking agent particle size and controlled temperature, *Drying Technology*, 2012, **30,** 1037-1044.

[118] Zhao L., Gu W.M., He P.J., Shao L.M., Biodegradation potential of bulking agents used in sludge biodrying and their contribution to bio-generated heat, *Water Research*, 2011, **45**(6), 2322-2330.

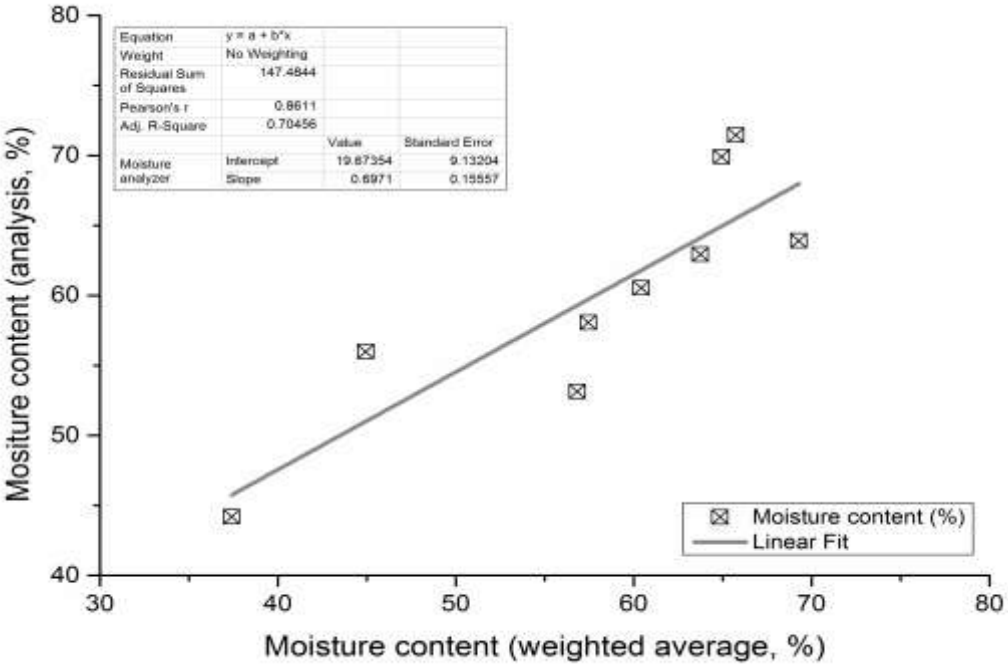
[119] Zhou H.B., Ma C., Gao D., Chen T.B., Zheng G.D., Chen J., Pan T.H., Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting, *Bioresource Technology*, 2014, **152,** 329-336.

# EKLER

**Ek A.** Nem içeriği analizi




Şekil 1. Nem içeriği ve nem içeriğinde yüzde artış




Şekil 2. Nem içeriği tayini (cihaz analizi ve ağırlıklı ortalama, %)

**Ek B.** Optimazasyon sonuçlar

Tablo 1. Nem içeriği sonuçlar

| Deney | $Nİ_b$ | $Nİ_ç$ | Sıcaklık ($^oC$)* | İşlenme süresi (saat) | Nİ'sindaki azalma (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| D1 | 69,29 | 27,77 | 37 | 168 | 59,93 |
| D2 | 44,95 | 20,31 | 39 | 168 | 54,82 |
| D3 | 37,41 | 8,59 | 40 | 168 | 77,04 |
| D4 | 57,46 | 33,57 | 43 | 168 | 41,58 |
| D5 | 56,84 | 31,26 | 41 | 168 | 45,00 |
| D6 | 60,43 | 31,81 | 38 | 168 | 47,36 |
| D7 | 64,95 | 35,53 | 40 | 168 | 45,30 |
| D8 | 65,75 | 50,93 | 43 | 168 | 22,54 |
| D9 | 63,75 | 33,62 | 40 | 168 | 47,26 |

$Nİ_b$ = Başlangıç nem içeriği
$MC_f$ = Çıkış nem içeriği
*Biyo-kurutma prosesi sırasında elde edilen yüksek sıcaklık

Tablo 2. Ağır metaller

| Örnek | Birim | Cr | Ni | Cu | As | Cd | Sb | Hg | Pb | Mn | Co |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D1 | mg/kg | 43,05 | 19,49 | 10,45 | 4,39 | 0,18 | 1,21 | 0,07 | 3,52 | 78,97 | 1,75 |
| D2 | mg/kg | 22,46 | 9,87 | 19,61 | 1,48 | 0,05 | 0,37 | 0,03 | 46,44 | 34,28 | 1,15 |
| D3 | mg/kg | 9,63 | 13,41 | 9,14 | 2,13 | 0,03 | 0,22 | 0,04 | 10,62 | 10,97 | 0,01 |
| D4 | mg/kg | 49,24 | 15,79 | 7,34 | 1,42 | 0,07 | 0,56 | 0,02 | 69,70 | 24,4 | 0,88 |
| D5 | mg/kg | 19,89 | 6,06 | 7,83 | 1,75 | 0,04 | 0,68 | 0,05 | 41,15 | 34,04 | 1,17 |
| D6 | mg/kg | 14,76 | 9,13 | 5,97 | 3,33 | 0,06 | 0,20 | 0,04 | 1,36 | 21,84 | 0,53 |
| D7 | mg/kg | 32,51 | 15,43 | 7,29 | 0,98 | 0,07 | 0,76 | 0,03 | 51,69 | 31,37 | 0,49 |
| D8 | mg/kg | 55,28 | 29,20 | 9,23 | 2,75 | 0,11 | 0,20 | 0,04 | 13,34 | 23,04 | 0,98 |
| D9 | mg/kg | 34,29 | 4,53 | 4,32 | 1,73 | 0,09 | 1,34 | 0,02 | 90,96 | 26,52 | 0,75 |

Tablo 3. Ağırlık kaybı

| Deney | Ağırlık (kg) | | |
|---|---|---|---|
| | Giriş | Çıkış | % değişim |
| D1 | 45,2 | 33,4 | 26,11 |
| D2 | 53,6 | 43,0 | 19,78 |
| D3 | 62,6 | 50,8 | 18,85 |
| D4 | 64,6 | 53,2 | 17,65 |
| D5 | 64,6 | 54,0 | 16,41 |
| D6 | 62,6 | 46,0 | 26,52 |
| D7 | 73,6 | 47,0 | 36,14 |
| D8 | 73,6 | 53,0 | 27,99 |
| D9 | 74,6 | 63,2 | 15,28 |

Tablo 4. Yığın yoğunluğu

| Deney | FW katkısı (%) | Nİ'sindaki azalma (%) | Yığın yoğunluğu ($kg/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Başlangıç | Çıkış | % değişim |
| D1 | 75,00 | 59,93 | 293,21 | 115,46 | 60,62 |
| D2 | 46,88 | 54,82 | 258,49 | 272,91 | -5,58 |
| D3 | 38,46 | 77,04 | 313,88 | 196,32 | 37,45 |
| D4 | 60,98 | 41,58 | 455,54 | 512,12 | -12,42 |
| D5 | 60,98 | 45,00 | 434,47 | 554,51 | -27,63 |
| D6 | 64,10 | 47,36 | 454,86 | 332,02 | 27,01 |
| D7 | 70,00 | 45,30 | 462,38 | 622,46 | -34,62 |
| D8 | 70,00 | 22,54 | 733,87 | 591,81 | 19,36 |
| D9 | 68,63 | 47,26 | 463,04 | 581,41 | -25,56 |

Tablo 5. Elementel analizi

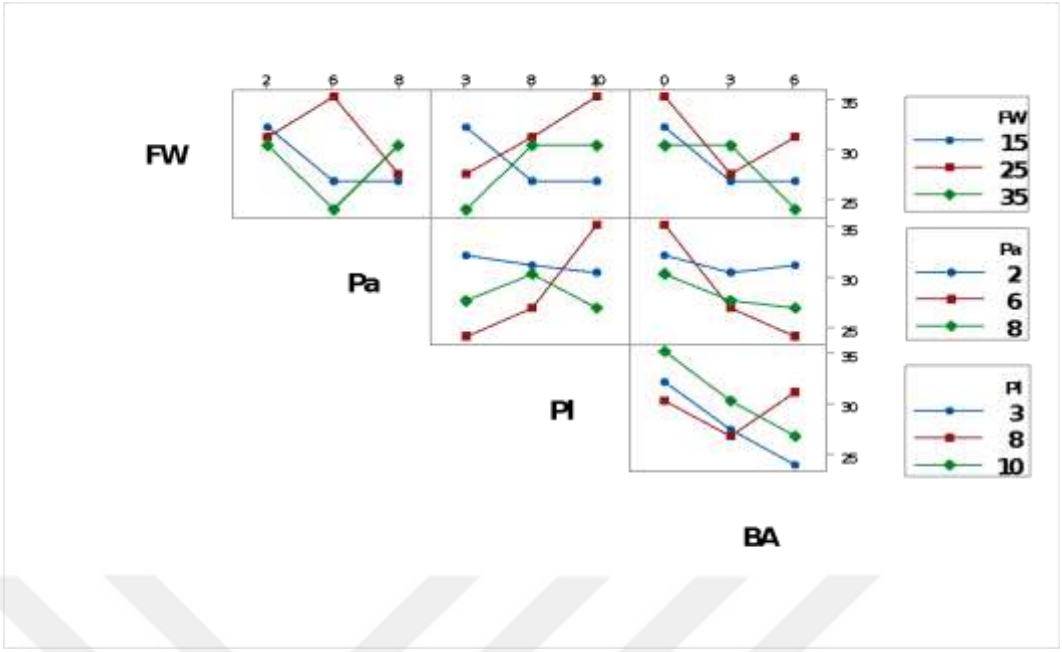
| Örnek | Giriş | | | | | | Çıkış | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N% | C% | H% | S% | Kül% | O% | N% | C% | H% | S% | Kül% | O% |
| D1 | 1,85 | 53,56 | 10,18 | 0,02 | 21,21 | 13,18 | 1,85 | 39,38 | 6,42 | 0,06 | 16,58 | 35,71 |
| D2 | 1,25 | 47,04 | 6,16 | 0,05 | 16,51 | 33,99 | 1,01 | 42,62 | 5,98 | 0,07 | 9,44 | 35,88 |
| D3 | 1,19 | 62,82 | 6,89 | 0,02 | 15,09 | 13,99 | 0,96 | 50,09 | 7,87 | 0,06 | 9,04 | 31,98 |
| D4 | 1,76 | 68,22 | 10,2 | 0,03 | 17,72 | 2,07 | 1,11 | 42,14 | 7,41 | 0,04 | 7,27 | 42,03 |
| D5 | 2,13 | 57,86 | 10,53 | 0,04 | 18,71 | 12,73 | 0,93 | 55,62 | 10,81 | 0,02 | 9,49 | 21,13 |
| D6 | 1,22 | 43,26 | 7,54 | 0,04 | 20,75 | 27,19 | 0,94 | 41,39 | 7,45 | 0,03 | 16,39 | 33,80 |
| D7 | 1,57 | 62,34 | 8,85 | 0,04 | 19,31 | 13,89 | 1,56 | 56,12 | 7,32 | 0,03 | 6,85 | 22,12 |
| D8 | 1,21 | 47,15 | 7,03 | 0,02 | 20,90 | 23,69 | 0,98 | 44,01 | 8,27 | 0,03 | 13,16 | 33,55 |
| D9 | 1,37 | 56,98 | 8,31 | 0,09 | 20,67 | 12,58 | 0,78 | 32,62 | 7,44 | 0,05 | 12,49 | 46,62 |

Tablo 6. Biyokütle içeriği

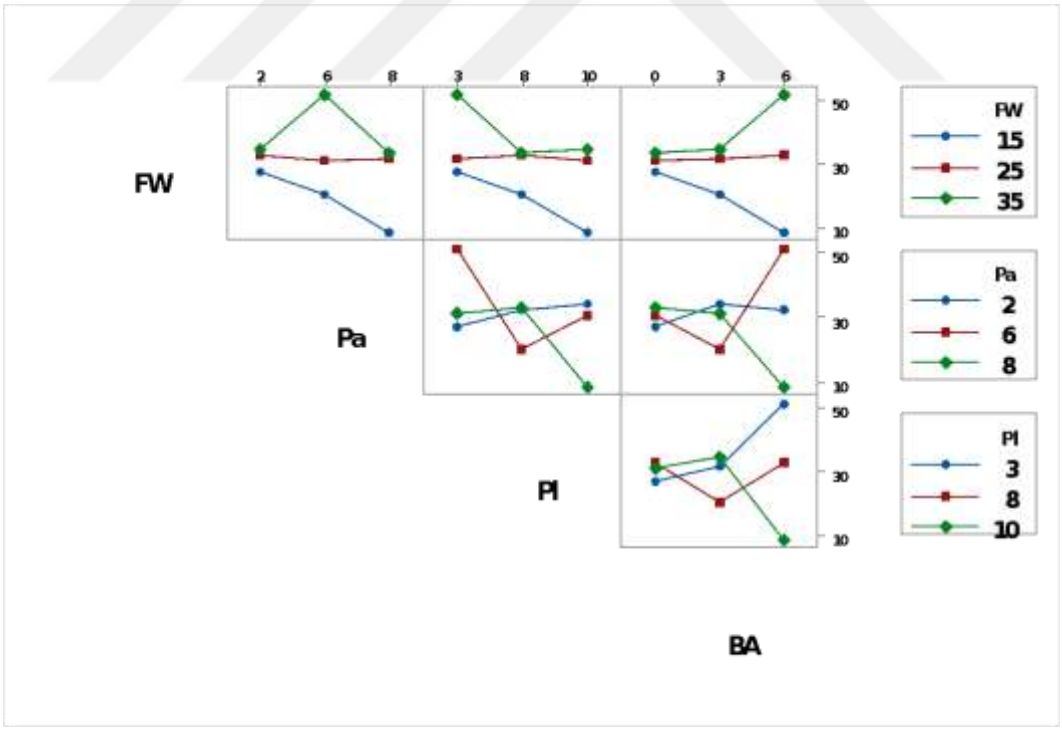
| Sample | $m_{SRF}$ | $m_{filter}$ | $m_{residue}$ | $m_{ash}$ | $m_{residue-ash}$ | AB | AC | AD | AE | AF | AG | AH | AI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ws | Wf | Wr | Wa | Wra | M | $AB/m_{SRF}$ | $A_{SRF}$ | (AD/100) | (AC + AE) | (1-AF) | BC | NBC |
| D1 | 5,00 | 0,13 | 2,57 | 0,25 | 2,32 | 0,25 | 0.05 | 16,58 | 0,17 | 0,22 | 0,78 | 78,45 | 4,96 |
| D2 | 5,00 | 0,13 | 2,06 | 0,35 | 1,71 | 0.35 | 0,07 | 9,44 | 0,09 | 0,16 | 0,84 | 83,56 | 7,00 |
| D3 | 5,00 | 0,13 | 1,45 | 0,07 | 1,38 | 0.07 | 0,01 | 9,04 | 0,09 | 0,10 | 0,90 | 89,58 | 1,38 |
| D4 | 5,00 | 0,13 | 4,49 | 0,06 | 4,44 | 0.06 | 0,01 | 7,27 | 0,07 | 0,08 | 0,92 | 91,60 | 1,13 |
| D5 | 5,00 | 0,13 | 3,13 | 0,05 | 3,08 | 0.05 | 0,01 | 9,49 | 0,09 | 0,10 | 0,90 | 89,50 | 1,01 |
| D6 | 5,00 | 0,13 | 2,08 | 0,20 | 1,88 | 0.20 | 0,04 | 16,39 | 0,16 | 0,20 | 0,80 | 79,53 | 4,08 |
| D7 | 5,00 | 0,13 | 2,27 | 0,07 | 2,20 | 0.07 | 0,01 | 6,85 | 0,07 | 0,08 | 0,92 | 91,84 | 1,32 |
| D8 | 5,00 | 0,13 | 3,63 | 0,30 | 3,34 | 0.30 | 0,06 | 13,16 | 0,13 | 0,19 | 0,81 | 80,91 | 5,94 |
| D9 | 5,00 | 0,13 | 3,34 | 0,06 | 3,28 | 0.06 | 0,01 | 12,49 | 0,12 | 0,14 | 0,86 | 86,29 | 1,22 |

Ws – Örnek ağırlığı (g)
Wf – Boş filtre ağırlığı (g)
Wr – Kalıntı ağırlığı (105 $^{o}$C)
Wa – Kül ağırlığı (550 $^{o}$C)
Wra – (Wr –Wa)

M – $m_{kalıntı} - m_{kalıntı\text{-}kül}$ ($m_{residue} - m_{residue-ash}$)
BC – Biyokütle içeriği (AG*100)
NBC – Biyokütle dışı içeriği (100-AH-AD)




Şekil 3. Kontrol faktörleri arasındaki etkileşim çizişi – KD




Şekil 4. Kontrol faktörleri arasındaki etkileşim çizişi – Nİ

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Mohammed M.**, Ozbay I., Karademir A., Isleyen M., Pre-treatment and utilization of food waste as energy source by bio-drying process, *Energy Procedia*, 2017, **128,** 100-107.

**Mohammed M.,** Ozbay I., Durmusoglu E., Bio-drying of green waste with high moisture content, *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, **111,** 420-427.

**Mohammed M.,** Ozbay I., Karademir A., Donkor A., Effect of waste matrix for the optimization of moisture content and calorific value of bio-dried material using Taguchi DOE, *Drying Technology*, 2018, LDRT-2018-0131.R1 *(Under review)*.

**Mohammed M.,** Donkor A., Ozbay I., Bio-drying of biodegradable waste for use as solid fuel: A sustainable approach for green waste management. *IntechOpen Science*, 2018, ISBN 978-953-51-6730-3, Book Chapter.

**Mohammed M.,** Boateng K.K., Evaluation of pesticide residues in tomato (*Lycopersicum esculentum*) and the potential health risk to consumers in urban areas in Ghana, *Pollution*, 2017, **3**(1), 69-80, Winter 2017.

**Mohammed M.,** Egyir I.S., Donkor A.K., Amoah P., Nyarko S., Boateng K.K., Ziwu C., Feasibility study for biogas integration into waste treatment plants in Ghana, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2017, **26,** 695-703.

Donkor A., Fordjour L.A, Tawiah R., Asomaning W., Dubey B., Osei-Fosu P., Ziwu C., **Mohammed M.,** Evaluation of trace metals in vegetables sampled from farm and market sites of Accra Metropolis, Ghana, *International Journal of Environmental Studies*, 2017, **74** (2), 315-324.

## ÖZGEÇMİŞ

Mutala MOHAMMED 1982 yılında Sekondi-Takoradi, Gana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sekondi-Takoradi ise tamamladı. Gana'daki University of Ghana, Tarım Okulundan 2007 yılında mezun oldu. 2010-2012 yıllar arasında, University of Ghana, Çevre ve Sanitasyon Çalışmaları Enstitüsü'nde yüksek lısans eğitimini tamamladı. 2007-2008 yılları arasında Gana'daki Forestry Commission, Accra'da bir yıl ulusal hizmet programını tamamlandı. 2012-2013 yılları arasında Gana'daki Netherlands Development Organizatıon (SNV) Accra'de Ulusal Yardımcı Danışman olarak çalıştı. 2013 yılında Türkiye Hükümeti Bursu kazandı ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Sn. Prof. Dr. Aykan Karademir danışmanlığında doktora programına başladı.