

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ TAVUK GÜBRESİNİN YANMA
KALİTESİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit PEHLİVAN

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ TAVUK GÜBRESİNİN YANMA
KALİTESİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit PEHLİVAN

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

HAZİRAN 2024

Ümit Pehlivan tarafından hazırlanan “Biyokütle Kaynaklarının Tavuk Gübresinin Yanma Kalitesine Etkisi” adlı tez çalışması 26.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç Dr. Aliye Suna ERSES YAY**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Hülya DEMİREL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ TAVUK GÜBRESİNİN YANMA KALİTESİNE ETKİSİ ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’ de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Ümit PEHLİVAN

SEVGİLİ Kızım Ada Lila PEHLİVAN'a

TEŐEKKÖR

Yüksek Lisans eğitimin ve yüksek lisans tezinin hazırlanması boyunca kıymetli yardım, zamanı, engin bilgileri ve katkıları ile beni yönlendiren, destek olan çok değerli saygıdeğer hocam Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR'e, enerji sektörüne giriş yapmama vesile olan, engin tecrübeleriyle ufkumu açan, değerli büyüğüm sayın Deniz KARATAŐ'a , desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her koşulda daima yanımda olan çekirdek ailemin kurucusu eşim Gizem PEHLİVAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ümit PEHLİVAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Biyokütle ve Biyokütle Enerjisi	14
2.2. Biyokütle Enerji Dönüştürme Süreci	16
2.3. Biyokütle Yanma Teknolojileri	16
2.3.1. Izgara teknolojisi	17
2.3.2. Dolaşımli akışkan yatak	18
2.3.3. Kabarcıklı akışkan yatak	19
3. MATERYOL VE METHOD	25
3.1. Deneysel Materyaller	25
3.2. Kuru madde ve nem muhtevası tayini	27
3.3. Uçucu Madde Tayini	29
3.4. Kül miktarı tayini	30
3.5. Sabit karbon tayini	30
3.6. Kalorifik değer tayini	31
3.7. Elementel analiz tayini	33
3.8. Alevlenebilirlik indeksi	33
3.9. Alev imaj analizi	34
3.10. Kül bileşimi ve yanma indisleri	34
3.11. İstatiksel analiz	36
3.12. Akış diyagramı	36
4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	37
4.1. Malzeme Özellikleri	37
4.2. Elementel Birleşimler	39
4.3. Kalorifik Değer	40
4.4. Flame Görüntü Analizi	42
4.5. Kül Bileşimi ve İndeksleri	45
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

BFB:	Kabarcıklı Akışkan Yatak
CFB:	Dolaşımli Akışkan Yatak
CO2:	Karbondioksit
GHG:	Sera Gazı
HHV :	Yüksek Isıl Değer
K :	Potasyum
LHV :	Düşük Isıl Değer
Li :	Tutuşabilirlik İndeksi
Mtoe:	Milyon Ton Enerji Eşdeğeri
N:	Azot
Na:	Sodyum
O2:	Oksijen
P:	Fosfor
PL:	Kümes Hayvanı Altlığı
PO:	Piroliz Yağı
S:	Kükürt
SS :	Tatlı Sorgum Bagası
Tj:	Terajoule

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kümes hayvanı altlığı, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağı �rneklelerinin �zellikleri.....	27
Tablo 4.1. Piroliz yağı (Faktör A) ve tatlı sorgum bagasıyla (Faktör B) harmanlanmış kümes hayvanı altlığının, yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine yönelik varyans analizi (ortalama)	38
Tablo 4.3. Kümes hayvanı altlığının (PL) curuflaşma ve k�l birikme indeksi ve bunların tatlı sorgumu bagası (SS) ve piroliz yağıyla (PO) kombinasyonları	47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Biyokütle yakma tesisi kül ile ilgili problemler ve görüldüğü bölgeler. ...	14
Şekil 2.2. Biyokütle Yakma Tesisi Şematiği.	17
Şekil 2.3. Izgaralı Kazan şematiği (Albrecht ve ark. 2008).....	18
Şekil 2.4. Dolaşımli akışkan yatak şematiği (Vasan ve ark. 2015).....	19
Şekil 2.5. Kabarcıklı akışkan yatak içindeki nozulların görüntüsü	20
Şekil 2.6. Sakarya’da bulunan, kabarcıklı akışkan yatak teknolojisine sahip elektrik santrali	21
Şekil 2.7. Sakarya’da bulunan kabarcıklı akışkan yatak teknolojisine sahip kümes hayvanı altlığı yakılan enerji santrali prosesi.....	22
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan biyokütle malzemeleri ve hazırlanan biyoyakıtlar..	26
Şekil 3.2. Memmert Un 55 etüv cihazında örneklerin kurutulması.....	28
Şekil 3.3. Weightlab marka hassas tartı cihazı ile ağırlıkların belirlenmesi	28
Şekil 3.4. Carbolite marka kül fırını ve kül fırınının içi	29
Şekil 3.5. Desikatör (nem alıcı)	30
Şekil 3.6. IKA C 200 kalorimetre cihazı.....	31
Şekil 3.7. Kalorimetre bombası içindeki numunelerin, IKA C200 kalorimetre cihazında kalorifik değer tayini yapılması	32
Şekil 3.8. Kalorimetre bombası ve bomba içerisine oksijen gazı doldurma ünitesi ..	32
Şekil 3.9. Tavuk altlığının yanma özelliklerini ve kül depozit problemlerini iyileştirmek için birlikte yakma uygulamasının ve gerçekleştirilen analizlerin şematik gösterimi	36
Şekil 4.1. Kümes hayvanı altlığına; piroliz yağı ve tatlı sorgum ilavesinin, nem, sabit karbon, kül ve uçucu madde içeriğine etkileri. Farklı harfler, Duncan’ın yeni çoklu aralık testine göre %5 düzeyinde önemli bir farklılığı belirtir.	39
Şekil 4.2. Kümes hayvanı altlığının tutuşabilirlik indeksi, tatlı sorgum bagası (mavi çizgi) ve %10 piroliz yağı (kırmızı çizgi) ile iyileştirilmesi	39
Şekil 4.3. Kümes hayvanı altlığının, tatlı sorgum bagası (mavi çizgi) ve %10 ‘luk piroliz yağı ile LHV (Düşük ısı) ve HHV (Yüksek ısı) değerlerinin artması	41
Şekil 4.4. Pelet için görüntü analizi ve kırmızı renk yoğunluğu (a) PL (T0), b) SS (T4), c) PL:SS (T2), d) (T0+PO), e) T4+PO and, f) T2+PO.....	44
Şekil 4.5. Proksimet kompozisyon parametreleri ile alevin kırmızı renk yoğunluğu arasındaki Pearson korelasyonu (**p <0.01, *p <0.05).....	45
Şekil 4.6. Biyokütle enerji santrallerinde kütle ilgili sorunlar	48

BİYOKÜTLE KAYNAKLARININ TAVUK GÜBRESİNİN YANMA KALİTESİNE ETKİSİ

ÖZET

Ticari tavuk eti yetiştiriciliği sektörü, kırsal alanlarda çok fazla miktarda kümes hayvanı altlığı (PL) atığı üretimine neden olmaktadır. Kanatlı eti ve yumurtaya olan talep arttıkça PL üretimi de artmaktadır. Geleneksel olarak PL, küçük ve orta ölçekli çiftliklerde tarım arazilerine uygulanır. Ancak kümes hayvanı üretimi yoğunlaştıkça ve çiftlik büyüklükleri genişledikçe atıklar suyun, toprağın ve havanın kirlenmesine ve çevresel endişelere neden olmaktadır. Atıkların araziye uygulanmadığı zaman aralıklarında atık birimi ve PL atık yönetiminin yetersiz olması, özellikle işletmede yetiştirilen sürülerde sağlık sorunlarına, sinek üremesine, hava kirliliğine, kötü kokulara, toprak ve su kirliliğine neden olabilmektedir. Halen genel uygulama olarak PL, arazinin boş olduğu durumda doğrudan arazi uygulamasıyla ve yılın geri kalanında enerji uygulamaları yoluyla bertaraf edilmektedir. PL'ye uygulanan çeşitli enerji geri kazanım teknikleri arasında, farklı yenilenebilir veya yenilenemeyen yakıtlarla beraber yakılmasının hem teknik açıdan hem de çevresel etki boyutları açısından en etkili yöntem olarak kabul edildiği bilinmektedir. Atıkların büyük miktarda birikmesi nedeniyle yakma, PL'nin bertaraf edilmesi için en hızlı seçenek olarak kabul edilmektedir.

Kümes hayvanı atıklarının yakılması, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi olan "uygun fiyatlı ve temiz enerjiye ulaşım" doğrultusunda atık hacmini etkili bir şekilde azaltır. Ancak mono-yakma, değişen nem, yapısal ve kimyasal bileşim ile düşük enerji verimi nedeniyle önemli zorluklara neden olmaktadır. PL'nin lignoselülozik yataklık altlık içermesi ve enerji açısından zengin bir atık olmasına rağmen, doğrudan tek başına yakma deneyleri iyi sonuçlar vermemektedir. Bunun nedeni, yakıt kalitesini bozan ve yanma performansını azaltan yüksek nem, kül ve külün kimyasal bileşiminin yanı sıra kül içindeki alkali minerallerin neden olduğu kül birikintileridir. Bu nedenle yanma problemlerini azaltan ve düzgün yanma sağlamak için PL'nin yardımcı yakıtlarla karıştırılması gerekmektedir. Alternatif bir yenilenebilir kaynak olarak biyokütle, yüksek bir organik bileşik içeriğinden dolayı yüksek bir kalorifik değere sahiptir ve bu da kümes altlığının yakılmasına yardımcı olabilir. PL'nin lignoselülozik biyokütle ile karıştırılması, karışımların kalorifik değerini artırabilir. Ayrıca biyokütle, kümes hayvanı altlığından daha fazla uçucu madde miktarına ve daha düşük miktarda kül içeriğine sahip olduğu için PL'den farklı yanma özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, PL'nin biyokütle ile harmanlanması genel yanma sürecinde değişikliklere yol açabilir ve yanma verimliliğini iyileştirebilir.

Kümes hayvanı üretiminin artması, bu kümes altlıklarının çevreye vereceği zararları azaltarak, güvenli ve yararlı bir şekilde bertaraf edilmesini zorunlu hale getirmiştir. Hayvansal kökenli atıkların yüksek ısı değeri (HHV) 19,0 MJ kg⁻¹e ulaşmaktadır ve bu nedenden dolayı onu kullanılabilir yenilenebilir enerji kaynağı haline getirmektedir. Fosil yakıt fiyatlarının yüksek olması nedeniyle kümeslerde ortam ısıtması için geliştirilen özel fırınlarda PL'nin yakılmasına büyük ilgi duyulmaktadır.

Bunun nedeni, döngüsel ekonomi yaklaşımının ve çiftlik hayvanlarının ürettiği atıkların yakma teknolojisine sahip işletmelerde kaynak olarak kullanılmasına ilişkin AB düzenlemesinin, PL'nin sahadaki kümes hayvanlarının ısıtılmasında doğrudan yanma için yakıt olarak kullanılmasını teşvik etmesidir. Ancak PL, hızlı bir şekilde ayrıştığı ve yüksek nem içeriği nedeniyle HHV'nin birkaç gün içinde 19,0 - 9,0 - 13,5 MJ kg⁻¹'e düşmesi nedeniyle zorlayıcı yakıt olarak kabul görürler. Bu durum yanmayı engeller ve mono yanma uygulandığında kütle ilgili sorunlara neden olur. Bu amaçla, bir enerji santralinde yanma veya bir çiftlikte alan ısıtma amacıyla doğrudan yanma özelliklerini iyileştirmek için ön karıştırma veya ön iyileştirme gerekli olmaktadır. Bazı biyoyakıt hammaddeleri, yüksek HHV, düşük kül içeriği, düşük tutuşma noktası, optimum kirlenme, cürüflaşma ve yüksek kül erime sıcaklıkları ile tanımlanabilir ve bu tanımlamada biyokütle yakıtları iyi yakıt olarak tanımlarlar. Genel olarak yanma sorunlarını optimize etmek, gaz emisyonlarını ve külden dolayı oluşan sorunları asgari düzeye indirmek için yanma özelliklerini analiz ettikten sonra ikiden fazla ham maddenin harmanlanması tavsiye edilir. Önceki araştırmalar, alev özellikleri ve kül elementi indeksi gibi yanma parametreleriyle ilişkili olarak ilave biyokütle yakıtlarının PL üzerindeki sinerjistik etkisini göstermektedir.

Bu çalışmada, enerji mahsulü tatlı sorgum bagas atığı ve PL pirolizinden elde edilen yeni bir yan ürün piroliz yağını birleştirerek PL'nin yanma özelliklerini, olası yanmayla ilgili zorlukları ve kütle ilgili sorunları iyileştirmek için basit, pratik yöntem test edilmiştir. Bu araştırma, standart psiko-kimyasal yakıt analizi ile PL, tatlı sorgum bagası, bunların karışımı ve piroliz yağı ilavesinin yanma davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, harmanlanmış PL karışımlarının yakma özellikleri yeni bir yaklaşım olan görüntü analizi ile değerlendirildi. Ayrıca, harmanlanmış yakıtın kazan sisteminde kirlenme ve cürüflanma eğilimi açısından karşılaştırılması amacıyla küle bağlı indeks değerlerinin belirlenmesi amacıyla kül bileşimi analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı tatlı sorgum bagasının (SS) ve piroliz yağının (PO) PL'nin yakıt özelliklerini iyileştirme ve yakma sırasında kütle ilgili yükleri hafifletme üzerindeki etkisini araştırmaktır. Farklı biyokütle yakıt karışımları, PL'nin SS ile %0,0 (T₀), %25 (T₁), %50 (T₂), %75 (T₃) oranında birleştirilmesiyle üretildi ve %100 SS (T₄) uygulaması ile karşılaştırılmıştır. Yüksek enerji potansiyeli ve düşük kül birikimi elde etmek amacıyla paralel numuneler ayrıca enerji değerini iyileştirmek amacıyla %10 PO ile karıştırılmıştır.

DeneySEL sonuçlar, karışımlara SS oranının artırılması ve PO eklenmesinin uçucu maddeyi artırdığını, nem ve kül içeriğini azalttığını göstermektedir. Küllerin elementer içeriği, uçucu madde oranları ve sabit karbon miktarları için kuru bazda yaklaşık analizden elde edilen sonuçlar hem PO 'ya hem de SS oranlarının azaltılmış kül içeriği ve artan uçucu madde nedeniyle hipotezimizi doğrulamaktadır. Dolayısıyla yüksek uçucu madde, düşük kül nedeniyle yanmaya uygunluk iyileştirilmiştir. Deneylerde kullanılan PL %64 oranında uçucu madde içermekte ve makul bir yanıcılık özelliği göstermektedir. PL'ye SS ilavesi, uçucu madde artışlarına 25 (T₁), %50 (T₂) ve %75 (T₃) SS ilavesi ile sırasıyla %67, %68 ve %71 oranında önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Piroliz yağı (PO) ilavesi uçucu maddeyi sırasıyla %68, %70 ve %73'e yükseltmiştir. Benzer şekilde, SS ve piroliz yağı, kül içeriğini kuru madde bazında %12,85'ten %7,10'a önemli ölçüde azaltmış; yanma sonucu ortaya çıkan malzemenin çoğunun, yanma sırasında kül depozitleri, cüruf oluşumu ve topaklaşmaya tepki vermeyen ürünler olduğunu göstermiştir.

Tutuşabilirlik indeksi, kazan koşullarında biyokütlenin olası performansının bir göstergesi olarak kullanılır. PO ilavesi aynı zamanda karbon ve hidrojen içeriğini de arttırmıştır. PL'ye SS ilavesi, %25'lik bir karışımdaki peletin tutuşabilirlik endekslerini yükseltmiş ve karışımdaki SS'nin daha da artmasıyla neredeyse sabit (41.94 - 42.02) kalmıştır. PL:SS karışımlarına PO ilavesi tutuşabilirlik indeksini 41,75'ten 43,74'e önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ancak tahmin edilen tutuşabilirlik indeksi değerlerinin tümü 35'in üzerinde olup bu değer kazanlarda verimli bir şekilde kullanılabilir aralıktadır. Bu bağlamda, SS'nin yüksek uçucu içeriği, yüksek sıcaklıklarda kütle ilgili yaygın sorunların önlenmesi amacıyla düşük sıcaklıklarda hızlı tutuşma açısından faydalıdır.

Kümes hayvanı altlığı karışımındaki SS oranındaki artışın bir fonksiyonu olarak kalorifik içerik artmıştır. SS oranının %25'ten %100'e çıkarılmasıyla HHV değerleri 4295 ± 12 Kcal kg^{-1} 'den 4404 ± 9 Kcal kg^{-1} 'e yükselmiştir. Ayrıca yakıt karışımlarında karışımlar %10 PO ile karıştırıldığında PL: SS karışımlarının HHV değerleri %0,5-2,6 aralığında daha da yükselmiştir. LHV (düşük ısı değer) ve HHV değerlerindeki artış eğilimi hem SS hem de PO malzemelerinin kimyasal yapısına bağlanabilir çünkü PL, LHV'yi azaltan nispeten yüksek nem ve kül mineralleri içermektedir.

Ayrıca SS+PO, görüntü analiz yöntemine dayalı olarak PL karışımlarının alev hacmini ve kırmızı renk yoğunluğunu iyileştirmiştir. Saf PL ile karşılaştırıldığında, karışımdaki SS yüzdesinin artmasıyla birlikte alev alanının boyutu ve parlaklığı ile görüntülerin kırmızı renk yoğunluğu da artmıştır. Biyokütle peletlerine PO ilavesiyle alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu daha da artmıştır. Bu sonuçlar, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağının, kümes hayvanı altlığı yanması ile daha etkin sonuçların ortaya çıktığı hipotezimizi doğrulamaktadır. SS ve PO için alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu, saf PL'den daha büyük ve daha yoğun olmuştur. Buna göre SS'nin tek başına ve PO ile kombinasyon halinde PL'ye kıyasla daha kısa bir tutuşma süresi sergilediğini belirtmek gerekir. Bu nedenle hazırlanan peletlerin tutuşma gecikme süreleri saf PL, SS ve bunların %50+%50'lik beraber karışımlarının süreleri sırası ile 75, 29 ve 38 saniyedir. Peletlere %10 piroliz yağı eklendiğinde tutuşma gecikme süreleri sırasıyla 49, 28 ve 33 saniyeye kısalmıştır. Bu sonuçlar, SS ve PO tarafından sağlanan daha fazla uçucu maddenin dehidrasyon, volatilizasyon ve yanmaya olumlu katkıyı etkilediği olgusu ile tutarlıdır. Alev kırmızı renk yoğunluğu üzerinde değişen biyokütle yakıt parametrelerini daha iyi anlamak için, hazırlanan biyoyakıt peletlerinden elde edilen yaklaşık bileşim parametreleri ve tutuşma indeksi değerleri kullanılarak Pearson korelasyonları yapılmıştır. Sonuçlar, uçucu madde ve organik madde içeriğinin alev kırmızısı renk yoğunluğuna anlamlı pozitif katkısını göstermiştir. HHV ve tutuşabilirlik indeksi (Ii) de kırmızı renk yoğunluğunu olumlu yönde etkilemektedir. Öte yandan PL'nin katkıda bulunduğu kül içeriği ve sabit karbonun kırmızı renk yoğunluğu üzerinde önemli olumsuz etkileri olmuştur.

Saf PL en yüksek kül problemi indeksi değerine sahiptir ($FI < 40$) ve küledeki potasyum, sodyum ve fosforun varlığından dolayı aşırı yüksek olarak sınıflandırılmıştır. SS indeks değeri ise orta aralıkta ($FI 0,6-40$) tespit edilmiştir. PL:SS %50+50 karışımının FI sonuçları dolayısıyla indeks değerini düşürmüştür. Ancak karışımdaki ne SS ne de PO varlığı kütle ilgili indeks değerlerini yeterince iyileştirmemiştir ve bu durum daha fazla araştırma gerektirmektedir

FUEL PROPERTIES AND INCINERATION BEHAVIOR OF POULTRY LITTER BLENDED WITH SWEET SORGHUM BAGASSE AND PYROLYSIS OIL

SUMMARY

Poultry litter (PL) waste is produced from large-scale commercial broiler chicken rearing in rural areas. With the increasing demand for poultry meat and eggs, the volume of PL generated has also risen. Traditionally, PL has been used as fertilizer on small and mid-size farms. However, as poultry production has become more centralized and farm sizes have grown, there are significant concerns about water, land, and air pollution. The large-scale accumulation of waste outside of the cropping season and inadequate PL waste management can lead to health and welfare issues in flocks, increased fly breeding, air pollution, unpleasant odors, and land and water contamination. Currently, PL is disposed of through direct land application during the cropping season and through energy applications for the rest of the year. Various energy recovery methods and techniques have been employed for PL; among them, co-combustion with various renewable or nonrenewable fuels has been identified as the most effective from both technical and environmental standpoints. Incineration is considered the quickest option for disposing of PL due to the substantial waste accumulation.

The incineration of poultry litter is an effective method for reducing waste volume, aligning with the United Nations Sustainable Development Goal of "affordable and clean energy." However, mono-incineration presents significant challenges due to the varying moisture, structural and chemical composition, and low energy yield of the litter. While poultry litter contains lignocellulosic bedding and energy-rich manure-like components, direct incineration experiments have not been successful due to the presence of moisture, ash, and the chemical composition of ash, which degrade fuel quality and combustion performance. Additionally, ash deposits caused by alkaline minerals in the ash further complicate the incineration process. Therefore, blending poultry litter with auxiliary fuels is necessary to achieve uniform combustion. Biomass, as a renewable resource, contains high levels of organic compounds, resulting in a high calorific value that can aid in fueling poultry litter. Mixing poultry litter with lignocellulosic biomass can enhance the heating value of the blends. Furthermore, biomass exhibits different combustion characteristics compared to poultry litter, with higher volatility and lower ash content. This blending process can influence the overall combustion process, leading to improved combustion efficiency, reduced carbon monoxide emissions, and lower unburned carbon content in ash.

The increase in poultry production leads to a significant amount of poultry litter (PL), mainly consisting of manure and litter materials. Disposing of this waste safely and efficiently is a challenging task. The higher heating value (HHV) of this animal origin waste is 19.0 MJ kg⁻¹, making it a promising renewable energy source. Due to the high prices of fossil fuels, there is growing interest in using PL for combustion in specialized furnaces designed for heating poultry houses. The circular economy

approach and regulations promoting the use of farmed animal manure as a fuel in combustion plants further encourage the use of PL as a fuel for direct combustion to heat poultry houses on site. However, PL is considered a challenging fuel because it decomposes quickly, causing the HHV to drop from 19.0 to 9.0-13.5 MJ kg⁻¹ within a few days due to higher moisture content. This hinders combustion and leads to ash-related problems when mono combustion is applied. Therefore, pre-mixing or pretreatment is necessary to improve the properties for combustion in a power plant or direct combustion on a farm for space heating. Some biofuel feedstocks have high HHV, low ash content, low ignition point, and optimal fouling, slagging, and high ash melting temperatures, making them suitable for combustion. It's generally recommended to blend more than two feedstocks after analyzing combustion characteristics to optimize combustion problems and minimize gas emissions and ash-related issues. Previous research indicates the synergistic effect of additional biomass fuels on PL in relation to combustion parameters such as flame characteristics and ash element index.

The study examines a practical method to enhance the combustion characteristics of PL by using a blend of sweet sorghum bagasse (SS) and pyrolysis oil (PO). The research analyzes the combustion behaviors of PL, SS, their mixture, and the addition of PO using standard fuel analysis and image analysis. Additionally, the study investigates the ash composition to compare the blended fuel's propensity for fouling and slagging in the boiler system.

The aim of the study is to investigate how SS and PO can improve the fuel properties of PL and reduce ash-related issues during combustion. Different biomass combinations were created by blending PL with sweet sorghum bagasse at various percentages (0.0%, 25%, 50%, 75%) and compared with 100% sweet sorghum bagasse. To maximize energy potential and minimize ash deposition, some samples were also mixed with 10% pyrolysis oil.

The experimental results indicate that increasing the proportion of SS and adding pyrolysis oil (PO) to the mixtures raises the volatile matter and lowers the moisture and ash content. The results from the proximate analysis on a dry basis for ash content, volatile matter, and fixed carbon confirm our hypothesis that both pyrolysis oil and SS proportions reduce ash content and increase volatile matter, making the mixtures more suitable for combustion due to their high volatile matter, low ash content, and low fixed carbon. According to the data, the pyrolysis oil used in the experiments contains 64% volatile material, showing reasonable combustibility. The addition of SS to PL significantly increased volatile matter by 67%, 68%, and 71.50% with 25% (T₁), 50% (T₂), and 75% (T₃) SS addition, respectively. Furthermore, pyrolysis oil addition further increased the volatile matter to 68%, 70%, and 73%, respectively. Similarly, SS and PO significantly reduced ash content from 12.85% to 7.10% on a dry matter basis, suggesting that most of the material resulting from burning are products that do not contribute to fouling, slagging, and agglomeration during combustion.

The ignitability index is a useful indicator of how well biomass will perform in boiler conditions. When SS is added to PL, the ignitability index of the pellet shifts in a 25% mixture and remains almost constant (41.94 - 42.02) with further increases of SS in the mixture. The addition of PO to PL:SS blends significantly improves the ignitability index from 41.75 to 43.74. All the estimated ignitability index values were above 35, indicating efficient use in a boiler. The high volatile content of SS is beneficial for

rapid ignition at low temperatures, avoiding prevalent problems with ash at higher temperatures.

The calorific content increases as the proportion of SS in the poultry litter mixture increases. By increasing the proportion of SS from 25% to 100%, the higher heating values (HHV) increase from $4295 \pm 12 \text{ Kcal kg}^{-1}$ to $4404 \pm 9 \text{ Kcal kg}^{-1}$. Additionally, the HHV values of PL:SS blends further increased in the 0.5-2.6% range when the blends were mixed with 10% PO in fuel blends. The increasing trend in lower heating value (LHV) and HHV values can be attributed to the chemical structure of both SS and PO materials, as poultry litter contains relatively high moisture and ash minerals, which reduce the LHV.

The addition of SS and PO improved the flame volume and red color intensity of the PL blends based on image analysis. When compared to pure PL, the size and brightness of the flame area and red color intensity of images increased with a higher percentage of SS in the mixture. The flame area and red color intensity were further increased by the addition of PO to the biomass pellets. These results support our hypothesis that sweet sorghum bagasse and pyrolysis oil have a more potent effect on PL combustion. The volatile flame's area and red color intensity for SS and PO were larger and more robust than for pure PL. It is worth noting that SS alone and in combination with PO exhibited a shorter time to ignition compared to PL. Therefore, the ignition delay times of the prepared pellets were 75, 29, and 38 seconds for pure PL, SS, and their 50-50% mixture, respectively. When 10% pyrolysis oil was added to the pellets, the ignition delay times were shortened to 49, 28, and 33 seconds, respectively. These results are consistent with the phenomenon that more volatiles provided by SS and PO affect dehydration, devolatilization, and positively contribute to burning. To better understand the impact of changing biomass fuel parameters on flame red color intensity, Pearson correlations were performed using proximate composition parameters and ignition index values obtained from prepared biofuel pellets. The results showed the significant positive contribution of volatile matter and organic matter content on flame red color intensity. Higher Heating Value (HHV) and ignitability index (Ii) also positively affect red color intensity. On the other hand, the ash content and fixed carbon contributed by PL had significant adverse effects on the red color intensity.

PL had the highest fouling index value ($FI < 40$) and was classified as extremely high due to the presence of potassium, sodium, and phosphorus in ash. On the other hand, the index value of SS was in the medium range ($FI 0.6-40$). The fouling index results of the 50% PL and 50% SS mixture reduced the overall index value. However, neither SS nor PO in the mixture showed a low tendency to ash fouling. The presence of SS and PO did not sufficiently improve the ash-related index values, which necessitates further investigation.

1. GİRİŞ

Biyokütle, insanlar tarafından kullanılan en eski karbonlu yakıt ve sürdürülebilir olarak değerlendirilen tek katı yakıttır. Biyokütle, karbondioksit (CO₂) emisyonlarını önemli ölçüde azaltması ve enerji üretimi potansiyeliyle yeniden dikkat çeken kaynak olmuştur. Piroлиз ve gazlaştırma gibi termokimyasal işlemler, enerji verimliliğini artırarak, daha yüksek değerli ürünler (biyo yağlar, karbon nanotüpler) sağlama ve CO₂ emisyonlarını daha fazla azaltma sağlarken, daha olgun teknoloji olan biyokütlenin direkt yakılması, mikro ölçekten büyük ölçekli güç santrallerine kadar geniş bir yelpazede kullanım avantajı sunmaktadır. Yakma aynı zamanda kümes hayvanı altlığı gibi sorunlu biyokütleden yararlanmanın en kolay ve sosyal açıdan en kabul edilebilir yöntemi olarak değerlendirilir. Mevcut teknolojiler arasında, akışkan yataklarda yakma, özellikle yüksek nem içeriğine sahip, bileşimi homojen olmayan biyo-yakıtlarda daha uygun işletme koşulları sağladığı için tercih görmektedir.

Tarımsal üretim sektörünün karlılık, gelir ve istihdam oluşturma bakımından en önemlilerinden birisi tavukçuluk endüstrisidir. Dünya nüfusunun artmasına bağlı olarak, hayvansal protein kaynaklarından olan tavukçuluk sektörünün durmadan büyüyüp, gelişim göstereceği net olarak görülmektedir. Sektörün gelişmesine ve büyümesine paralel olarak üretim sonucunda istenmeyen ürün olarak adlandırılan yan ürünler olarak meydana gelen atık miktarlarının da bir hayli arttığı gözlemlenmiştir. Üretim sonucunda ortaya çıkan bu yan ürünler hem problem olarak hem de yakıt kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir. Belirli bir periyotta düzenli olarak oluşan kümes atıkları, tarımsal üretim için gübreleme zamanlarında hiçbir işlemlemeden, direk olarak araziye verilebilirken, gübre ihtiyacının olmadığı zamanlarda, uygun olmayan alanlara fazla miktarda ve kontrol edilmeden, yönetmeliklere uyulmadan, düzensiz bir şekilde boşaltılmaktadır. Kontrol edilmeden dökülen atıklar hem bırakıldığı araziye kullanılamaz hale getirebilmekte, hem de CH₄, NH₃, H₂S gibi uçucu organik olan asitler oluşturması nedeniyle, kötü kokular yaydığı, sinek, böcek gibi hayvanlara yaşam kaynağı oluşturduğundan dolayı bu bölgelerde yaşayan insanların şikâyetlerine ve rahatsız olmalarına sebep olmaktadır. Bu durum bölgede

yaşayan insanların sağlığı açısından da büyük risk oluşturmaktadır (Choudhury ve ark.,2020).

Tavuk dışkısı, yüksek miktarda azot (N), fosfor (P) ve potasyum (K) gibi besin maddelerini bünyesinde bulundurmasından dolayı genellikle biyo gübre veya toprak düzenleyici olarak kullanılır (Ozdemir ve Yetilmezsoy, 2020). Ancak, tavuk dışkısının toprağa fazla miktarda verilmesi, aşırı azotun birikmesine, nitratlar ve amonyak bileşikler oluşturup oksitlenmesine neden olarak sorunlara yol açabilir. Yüksek konsantrasyondaki nitratlar, içme suyu kaynağı olan hem yeraltı suyunu hem de yüzey suyunu kirletebilir (Kumaş ve Akyüz, 2020). Amonyak buharlaşması ayrıca çevrede koku sorunlarına neden olur. Hızla artan tavuk üretimi ve yerel çiftliklerde tavuk dışkısının gübre olarak kullanımına yönelik sınırlamalarla birlikte, alternatif kullanım olarak tavuk dışkısının enerji üretimi için kullanılması yöntemidir. Tavuk dışkısının enerjiye dönüştürülmesi için olası teknolojiler arasında yanma, anaerobik sindirim, gazlaştırma ve piroliz bulunmaktadır (Dede ve ark., 2018). Bu yöntemlerin literatür incelemesi, enerji dönüşüm verimliliği, ekonomik ve çevresel faktörler göz önüne alındığında, yakma sisteminin Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde uygulanması için uygun bir yöntem olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, bu tez çalışması kümes hayvanı altlığının yakma potansiyeline odaklanmaktadır.

Tavuk altlığı (PL) atığı, kırsal alanlardaki büyük tavuk çiftliklerinde ticari etlik tavuk yetiştiriminin son ürünüdür. Artan nüfus, tavuk eti ve yumurta talebinin artmasıyla birlikte, PL'nin üretimi sürekli olarak artmaktadır (Lynch ve ark, 2013). Tavuk gübresi geleneksel olarak küçük ve orta ölçekli çiftliklerde tarıma uygulanmaktadır (Chastain ark., 2012). Ancak, tavuk üretimi daha yoğun hale geldikçe ve çiftlik boyutları genişledikçe, suyu, toprağı ve havayı kirletme konusunda ciddi çevresel endişeler ortaya çıkmıştır (Prabakaran ve Valavan, 2021). Hasat dönemi dışında atıkların büyük ölçekli birikimi ve kötü PL atık yönetimi, sürü sağlığı ve refahı sorunları, sinek üreme, hava kirliliği, kötü kokulara sebep olması, karalarda ve sularda kirlilik oluşturması gibi sorunlara sebep olabilir (Rahman ark., 2022). Halen, PL'nin bertarafı, hasat döneminde doğrudan arazi uygulamasını ve geri kalan zamanlarda piroliz yöntemi, gazlaştırma yöntemi ve yanma yöntemi gibi enerji uygulamalarını içerir. Ancak, atıkların geniş birikimi nedeniyle, yakma işlemi PL'nin bertarafı için en hızlı seçenek olarak kabul edilmektedir.

Literatürde çeşitli enerji geri kazanım yöntemleri ve teknikleri araştırılmıştır; bunlar arasında çeşitli yenilenebilir veya yenilenemeyen yakıtlarla birlikte yanma yöntemi teknik uygunluk açısından ve çevresel kapsamı açısından en etkili yöntemlerden birisi olarak işaret edilmiştir (Kumar ark., 2022). Diğer bertaraf yöntemleri ile karşılaştırıldığında, PL yanmanın çeşitli avantajları vardır, bunlar arasında atık hacminde dikkate değer bir azalma, çeşitli uygulamalar için enerji geri kazanımı ve toksik organik bileşenlerin ve zoonotik patojenlerin yok edilmesi bulunmaktadır (Gržinić ve ark., 2023). Ayrıca, PL yakma artığı, kimyasal gübreyi kısmen yerine koymak için bitki besini olarak kullanılabilen biyokütle külü oluşturur (Fahimi ve ark., 2022). Bu bağlamda, gübre yerine biyokütle yakma külünün kullanılması, karbon emisyonlarını azaltma, besin döngüsünü kapatma ve PL'nin zararsız bertarafı için önemli bir çevresel anlam taşır (Turp ve ark., 2021). Tavuk gübresinin yakılmasının önemli çevresel faydalarına rağmen, hala biyokütle yakma sürecinin birçok çözülmemiş problemin araştırılması gerekmektedir.

Tavuk endüstrisinin enerji ihtiyaçlarını devam ettirmek için tavuk atıkları uygun enerji kaynaklarıdır. Son yıllarda, tavuk gübresinden enerji geri kazanımı, maliyet, etkinlik, çevre dostu ve kolay yöntemlerle sağlandığından büyük ilgi çekmektedir. Termal yöntemler arasında, doğrudan yakma, yüksek reaktivitesi nedeniyle en verimli ve sürdürülebilirlik açısından uygun bir teknoloji olarak kabul edilir. Ayrıca, termal işleme yöntemleri içinde olgun teknoloji olarak kabul edilir (Yurdakul ve ark., 2021). Çeşitli ölçeklerde doğrudan yakma yöntemleri, tavuk atıklarının bertarafı için bir çözüm sağlayacak ve maliyetli yakıt seçeneklerini değiştirecektir. Ancak, PL'nin yüksek kül içeriği nedeniyle, önceki doğrudan yakma deneyleri iyi sonuçlar vermemiştir (Toptas ve ark., 2015; Onenc ve ark., 2018). Bu, yakma kalitesini düşüren nem, kül ve küldeki kimyasal bileşim, yanma performansını azaltır, ayrıca küldeki alkali mineraller tarafından oluşan sorunlar kül birikimlerinden kaynaklanır. Bu nedenle, PL'nin homojen yanmasını sağlamak için yardımcı yakıtlarla karıştırılması gerekmektedir (Atımtay ve Yurdakul, 2020). Alternatif bir yenilenebilir kaynak olarak, biyokütle yüksek organik bileşik içeriğine sahiptir, bu da yüksek ısıl değere sahip olabilir ve tavuk gübresinin yanmasına yardımcı olabilir (Chastain ve ark., 2012). PL'nin lignoselülozik biyokütle ile karıştırılması, karışımların ısıtma değerini artırabilir. Ayrıca, biyokütle, PL'den daha yüksek uçucu madde miktarı bulundurması ve daha düşük kül değerlerine sahiptir. Bundan dolayı, PL'nin biyokütle ile

kariştirilmesi, genel yanma sürecinde değişikliklere ve yanma verimliliğinin iyileştirilmesine sebep olabilirler, bunun nedeni de daha düşük miktarda karbon monoksit emisyonu ve külde daha düşük yanmamış karbon içeriği ile ilişkilidir (Toptas ve ark., 2015).

PL'nin mono yanmasıyla ilgili diğer bir sorun da kazanda cüruf oluşturması ve tutunması gibi külle ilgili problemlerdir (Onenc ve ark., 2018), bu da yakma santrallerinin yanma performansını sınırlar, bakım sıklığını ve bakım maliyetlerini artırır. PL'nin biyokütle yakıt değeri, aynı zamanda kl mineral bileşimi ile birlikte listelenir. PL'nin biyokütle ile birlikte yanması, sorunlu minerallerin içerik ve bileşimini değiştirerek külle ilgili problemleri ozebilir. Bu, PL'nin biyokütle ile kariştirilmesinin yanma sonrası kl kalıntısının elementel bileşimini değiştirebileceği için geçerlidir (Ozdemir ve Demir, 2021). Genel olarak, lignoselülozik biyokütle, PL'den daha fazla bir kalorifik değere sahiptir ve biyokütle külünün yanma kalıntısı farklı bir kl bileşimine sahiptir. Bu, gelişmiş bir külle ilgili indeks değeri sağlar (Kraszkiewicz ve ark., 2017). Bu nedenle, PL ve biyokütle yakıt karişımlarının birlikte yanması, PL'den daha iyi bir pislik ve akma indeks özelliğine sahip olabilir.

Büyüyen tavuk üretimi önemli miktarda PL'nin meydana gelmesine sebep olurlar. Bunun sonucunda da özellikle gübre ve altlık malzemelerinden oluşan, güvenli olmayan ve verimsiz, bertarafı zorlayan bir sorun haline gelir. Literatür, hayvansal kökenli atıkların yüksek ısıl değerinin 19.0 MJ kg^{-1} 'e ulaştığını göstermektedir (Maj, 2022). Bu yüksek kalorifik değerler onu değerlendirilebilir ve uygulanabilir yenilenebilir enerji kaynağı haline getirir. Ayrıca, fosil yakıtların yüksek fiyatları nedeniyle, tavuk kmeslerindeki ısıtma için geliştirilen özel fırınlarda PL'nin yakılmasına büyük ilgi vardır. Bu, döngüsel ekonomi yaklaşımı ve çiftlik hayvanlarının gübresinin yakıt olarak kullanımı üzerine düzenlemeler, PL'nin tavuk kmeslerini ısıtmak için doğrudan yakma için bir yakıt olarak kullanılmasını teşvik etmektedir (Turzynski ve ark., 2022). Ancak, PL, hızla bozuşmaya uğrar ve nem içeriği miktarlarının yüksek olması nedeniyle kalorifik değerleri 19.0 'dan $9.0-13.5 \text{ MJ kg}^{-1}$ 'e düşer, bu da yanmayı engeller (Choudhury ve ark., 2020), yanma uygulandığında külle ilgili sorunlara neden olur (Ozdemir ve Demir, 2021). Bu amaçla, g santralinde veya çiftlikte doğrudan yakma için özellikleri iyileştirmek için n karişım veya ön işlem yapılmalıdır. Bazı biyoyakıt girdilerinin, yüksek HHV,

düşük kül içeriği, düşük ateşleme noktası ve optimal borular arasında tıkanma sorunu yaşatması, yüksek akma ve kül erime sıcaklıkları gibi özellikleri vardır. Bu sistemler için zorlayıcı olmayan özellikleri de onları yanmaya elverişli hale getirir. Genel olarak, yanma özelliklerini optimize etmek için yanma karakteristikleri analiz edildikten sonra birden fazla girdi karşılaştırılması önerilir (Yurdakul ve ark., 2021).

Birçok yapısal ve kimyasal faktör, PL'nin yanabilirlik ve kül özelliklerini etkileyen temel unsurlardır. Bu çalışmada, enerji bitkisi tatlı sorgum bagası ve PL pirolizinden elde edilen yeni bir yan ürün olan piroliz yağının (PO) birleştirilmesiyle PL'nin yanma özelliklerini, olası yanma ile ilgili zorluklarını ve kütle ilgili sorunlarını iyileştirmek için basit, pratik bir yöntem test edilmiştir. Bu araştırma, PL, tatlı sorgum bagası, karışımları ve piroliz yağı eklemesini inceleyerek, standart fiziko-kimyasal yakıt analizi ile yanma davranışlarını araştırmıştır. Ayrıca, karışık PL karışımlarının yakılma özellikleri, yeni bir yöntem olan görüntü analiz yöntemi ile değerlendirilmiştir. Bunun dışında kazan sisteminde gaz hatlarında tıkanmalara yol açma ve akma eğilimini karşılaştırmak için kül bileşimi analizi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Birleşmiş Milletlerin sürdürülebilir kalkınma amaçlarına ulaşılması için dünya genelinde düşük karbonlu yenilenebilir enerjiye kaynaklarına yönelim artmıştır. Mevcutta kullanılan rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidroelektrik enerji gibi sistemler kaynaklar arasında biyokütle enerjisi cazip bir seçenek olarak ortaya çıkmakta ve dünyanın birincil enerji talebinin yaklaşık %10'unu karşılamaktadır (Alma, 2022).

Biyoenjerji, çoğunlukla biyolojik hammaddeler olan biyokütlelerden elde edilen gaz, sıvı veya katı enerji türlerini belirtmek için kullanılan bir terimdir. Biyokütle kaynakları ise genelde başta ormancılık ürünleri olmak üzere, tarımsal kalıntılar, özel enerji bitkileri, park ve bahçe ürünleri, endüstri bitkisi atıkları, belediye atıkları ve hayvansal atıklar gibi orijinali fotosentez olan canlı bitkilerden elde edilen materyal olarak tanımlanabilir (Özdemir ve Er, 2018). Biyokütle termokimyasal proseslerde direkt veya dolaylı olarak bir dizi işlem sonunda gaz, sıvı ve elektrik enerjisi gibi diğer formlara dönüştürülebilen katı biyoenjerjinin bir parçasıdır.

Biyokütle, sürdürülebilir enerji üretimi açısından hayati öneme sahiptir. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi belli zamanlarda üretilebilir olmayıp, emre amade tedarik sağlayabilen sürekli güvenilir bir kaynaktır. Biyokütle, doğrudan yakıt olarak kullanılan veya kolayca biyoyakıtı dönüştürülebilen, doğal olarak kendiliğinden oluşan bir malzeme olarak tanımlanabilir. Türkiye'de net elektrik tüketimi, üstel nüfus artışı, kentleşme ve ekonomik kalkınma nedeniyle giderek artmaktadır (Nebati ve ark., 2021). Eş zamanlı olarak sera gazı (GHG) emisyonları da önemli ölçüde artışa devam etmektedir. Enerji güvenliği, fosil yakıtlara olan dışa bağımlılığı azaltma ve sera gazı emisyonlarını azaltmayı amaçlayan politikalar enerjiyi çeşitlendirmeye yönelik değişiklikleri öngörmektedir. Amaçlanan hedeflere ulaşmak için enerji sektöründe yenilenebilir kaynakların yüzdesini artıracak, sera gaz emisyonlarını azaltacak ve diğer ülkelerden ithal edilen fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltacak politikalar çerçevesinde yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payını artıracak uygulamalar devreye alınmıştır. Türkiye'nin toplam biyokütle enerji potansiyelinin yıllık ortalama 17,0

Mtoe (milyon ton petrol eşdeğeri) olduğu tahmin edilmektedir (Guler ve ar., 2021). Hayvansal atıklardan ve tarımsal artıklardan elde edilen enerji potansiyeli sırasıyla 23.760 terajoule (TJ) ve 998.473 TJ olarak hesaplanmıştır (Avcıoğlu ve ark. 2019; Melikoğlu ve Menekse 2020). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinden faydalanılması açısından son on yılda biyokütle santralleri kurulumları hız kazanmış ve farklı bölgelerde bu enerji santralleri yatırımları gerçekleşmektedir.

Kümes hayvanı atıklarından enerji elde etmek amacıyla yakılması yenilenebilir enerji üretmek amacıyla 2014 yılından itibaren AB genelinde teşvik edilmektedir. Türkiye'de yılda 10 milyon ton civarında atık ortaya çıktığı tahmin edilmektedir (Atımtay ve Yurdakul, 2020). Belli bir oranda enerji değeri olan kümes hayvanı atlığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kanatlı hayvan atıklarından enerji üretimine olanak sağlayan alternatif teknolojilerin geliştirilmesi yıllar geçtikçe rağbet görmektedir. Ancak, kümes hayvanı atığının yakılarak enerjiye dönüştürülmesi zor ve yakılması proses problemlerine neden olmaktadır.

Maj (2022), hayvansal kaynaklı atığın yüksek ısı değeri (HHV) 19 MJ/kg'a (kuru bazda) ulaştığını ve bu durumun onu değerlendirilebilir bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak konumlandığına dikkat çekmektedir. Hayvan kaynaklı atıklarının kompozisyonu ve yanma karakterini barınma sistemi ve kullanılan altlık çeşidi ve çiftlik içinde uygulanan altlık yönetiminin yakıt ve kül özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini bildirmektedir. Kümes hayvanı atığı kompozisyonu ve mineral içeriği nedeniyle zor bir yakıt olarak nitelenmiştir. Bu nedenle yanma özelliklerinin iyileştirilmesi için diğer yakıtlarla birlikte yakılmasını önermiştir.

Katsaros ve ark. (2021), kümes hayvanı atığını tek başına, odun talaşı ile karışım halinde ve karşılaştırma amacıyla yumuşak ağaç peletlerinin yanma davranışını sabit yataklı laboratuvar ölçekli bir reaktörde araştırmıştır. Farklı malzemeler, yakıtların termal ayrışma davranışı, N gazlı türlerin oluşumu, kül oluşturan elementlerin salınımı ve aerosol emisyonlarına göre değerlendirilmiştir. N gazlı bileşiklerin çoğunlukla gaz halindeki türlerin volatilizasyon aşamasında üretilmiştir. Kül oluşturan elementlere ilişkin olarak, potasyum (K) ve sodyumun (Na) salınım oranları sırasıyla %15–50 ve %20–37 arasında değişmiş, kükürtün (S) salınım oranı %54–92 arasında tespit edilmiştir. Aerosol emisyonlarının maksimum potansiyeli, kül oluşturan elementlerin hesaplanmasına dayanarak tahmin edilmiştir. Özellikle, kümes hayvanı atığı yanması

sırasında maksimum aerosol emisyonları 2806 mg/Nm³ (kuru baca gazı, hacimce %13 O₂) olarak gözlenmiş ve bileşiminde esas olarak gaz fazındaki K salınım oranından etkilenmiştir. NO_x emisyonları, aerosol oluşumu potansiyeli, korozyon riski ve kül erime davranışı gibi yanmayla ilgili zorlukların ön değerlendirmesi için yakıt endeksleri de araştırılmıştır. Kümes hayvanı altlığının tek başına yakılmasındaki zorlukları iyileştirmek için odun talaşı ile yakılmasının umut verici bir seçenek olduğunu ifade edilmiştir.

De Holanda Pasolini ve ar. (2023), kanatlı gübresinin enerji değerini iyileştirmek için kurutulması ve termal enerji üretiminde biyokütle olarak uygulanmasını incelemiştir. Çalışmalarında saf kanatlı gübresinin kimyasal ve fiziksel özelliklerini detaylandırıp, ayrıca farklı çalışma koşullarının kurutulmasına 60°C ve 80 °C ye 1,0 m/s ve 1,4 m/s etkisinin araştırılmasını amaçlamıştır. Kurutmanın deneysel sonuçlarıyla, literatürde bulunan ince tabaka teorisine dayalı modellerde simüle edilmiştir. Yaklaşık analiz sonuçları, kanatlı gübresinin yüksek düzeyde nem (%78), kül (%29), uçucu madde (%65) ve düşük sabit karbon (%5) içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. Enerji açısından kuru kümes hayvanı gübresi, ortalama kalorifik değeri 11 MJ/kg'ın üzerinde olan umut verici bir biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Turzyński ve ark. (2022), kümes hayvanı çiftliğinin kendi kendine ısıtma yeterliliğini sağlaması için tavuk gübresi ile saman veya odun talaş karışımlarının kullanıldığı bir yanma sürecinin karakterizasyonunu incelemiştir. Deneysel küçük ölçekli bir laboratuvar reaktöründe ve hava atmosferinde termogravimetrik analiz (TGA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test edilen karışımların yanması sırasında elde edilen ortalama maksimum sıcaklıkları yaklaşık 1000 °C'ye ulaşmıştır. Daha yüksek uçucu madde içeriğine sahip gübre (%45) ve saman/odun talaş karışımı (>%80) eklenmesinin, karışımdaki genel uçucu madde miktarında bir artışa ve daha yüksek bir alev sıcaklığına neden olmuştur. Malzemelerdeki uçucu madde içeriğindeki artış alev sıcaklığını 600 °C'den 900 °C'ye çıkartmıştır. Diğer yandan, gübreye büyük miktarda saman eklenmesi, saman bazlı külün merkezindeki sıcaklığın düşük olması (~1000–1100 °C) nedeniyle ızgarada sinter oluşumuna yol açmıştır. Odun talaşı ve gübre karışımı için yapılan deneyler sırasında bu sorun gözlenmemiştir. Benzer şekilde, yanma sırasındaki NO_x emisyonu, odun içeren numunelerde, saman içeren numunelere kıyasla daha düşük olmuştur. Test edilen numunelerin enerji analizi, gübre

ve altlık karışımının yerinde yakılmasının kümeslerin ısı talebini fazlasıyla karşıladığını göstermiştir.

Her ne kadar odunsu biyokütlenin yakılması iyi gelişmiş ve zaman içinde oturmuş bir teknoloji olarak kabul edilse de yanma ünitelerinde yakıt olarak uygulandığında kümes hayvanı altlığı için durumun böyle olduğunu söyleyemeyiz. Bunun nedeni, odunsu biyokütle ile karşılaştırıldığında bileşimindeki belirgin farklılık olmasıdır. Yapısal, fiziksel ve kimyasal farklılıklar biyo-yakıt ham maddesinin ön işleme ve yanma aşamalarında zorluklara neden olabilmektedir. Daha spesifik olarak kümes hayvanı altlığı, ızgaralar üzerinde eriyip topaklanmaya ve sistem arızasına neden olabilecek düşük ölçekli sıcaklıklara sahip bileşikler oluşturan alkali elementlerden (Si, K, Na vb.) oluşan yüksek miktarda kül içerir (Ozdemir ve ar., 2022). Ayrıca külün içerdiği S, Cl, K, Na, Zn, Pb gibi uçucu ve yarı uçucu elementler yanma işlemi sırasında kısmen gaz (baca gazı) fazına salınır (Ozdemir ve ark., 2018). Bu elementler homojen reaksiyonlara katılarak aerosoller (PM1 olarak da bilinen çapı 1 µm'den küçük parçacıklar) oluştururlar. Bu ince parçacıklar yanma ünitesinin daha soğuk yüzeylerinde (ısı değiştirici eşanjör) yoğunlaşabilir ve birikintiler oluşturarak (slagging) ısı transfer kapasitesinin azalmasına, korozyon ve kül birikim (fouling) sorunlarına neden olabilir (Ozdemir ve ark., 2020). Külde bulunan çeşitli bileşikler arasında K, diğer kül oluşturan elementlerle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek konsantrasyonlarda bulunduğundan aerosol oluşumu üzerinde en yüksek etkiye sahiptir (Pintana ve Tippayawong, 2016).

PL'de bulunan Cl ve S konsantrasyonları lignoselülozik odundan önemli ölçüde daha yüksektir ve yanma sırasında emisyon sorunlarına neden olabilir. Spesifik bileşikler buharlaşabilir ve HCl, Cl₂, SO_x (SO₂ veya SO₃) gibi gaz emisyonları oluşturabilir. AB komisyon düzenlemelerine göre çiftlikte yakma sırasında SO_x emisyon limitleri 50 mg/Nm³ü (kuru gaz, %11 O₂) aşmamalıdır (Turzyński ve ark., 2022). İlave olarak, Cl ve S bileşikleri, kül oluşumunun buharlaşma-yoğunlaşma mekanizması yoluyla, külde bulunan inorganik maddeleri (çoğunlukla K) aerosoller (KCl, K₂SO₄) oluşturmak üzere harekete geçirebilir. Bu durum, yakma tesisinde, özellikle de kazan gibi soğutulmuş yüzeylerde kül birikmesinin artmasına neden olabilir.

Diğer yandan rutubet içeriği, özellikle ön uygulama tedbirlerinin mevcut olmadığı durumlarda, PL'nin yanma davranışıyla ilgili bir diğer önemli belirleyici faktördür

(Ozdemir ve Sezer, 2013). PL'deki nem oldukça değişkenlik göstermekte ve yüksek değerlerde bulunduğunda yakıt homojenliğini, enerji içeriğini ve sistem boyutlarını olumsuz yönde etkilemektedir (Sarı ve ark., 2016). Verimli bir PL yanması için ağırlıkça %10'un altında bir nem içeriği tavsiye edilir (Dalolio ve ark., 2017).

PL yanmasıyla ilgili bu zorluklar, Őimdiye kadar yapılmamıŐ ve bilimsel literatürde rapor edilmemiŐ olan spesifik yakıtın ayrıntılı yanma davranışının araştırılması ihtiyaçını göstermektedir. Kanatlı altlığının yakılmasında akışkan yataklı kazanlar fazla kullanılan yakma sistemleridir (Onenc ve ark., 2018). Çünkü akışkan yataklı kazanlar, tavuk gübresi gibi biyokütlenin yakılması için bu kazanların yakıt açasından esnek olmasından kaynaklanmaktadır. Kömür ve linyit için tasarlanmış akışkan yataklı bir kazana biyokütle kolaylıkla beslenebilir. Bu, akışkan yataklı sistemlerin diğerlerine (pulverize kömür, ızgaralı vb.) göre en önemli avantajıdır. Akışkan yataklı yanma (FBC), diğer yakma sistemleriyle karşılaştırıldığında avantajlarından dolayı, yani daha düşük NO_x emisyon değerleri ve etkili bir SO_x kontrolü nedeniyle tercih edilmektedir. Genellikle FBC, kabarcıklı akışkan yatak (BFBC) ve türbülanslı yataklar kullanılır. Bu reaktörler kompakttır. Yüksek ısıyı hapsedme ve ısıyı hızlıca transfer etme özelliklerine sahiptir. Dolayısıyla yüksek ısı geri kazanımına olanak sağlar. Öte yandan, akışkan yataklarda yanma, yüksek nem içeriğine sahip malzemeler kullanıldığında, yanma verimini düşürerek, reaktör duvarında zayıf akıŐkanlaŐmaya ve topaklaşmaya neden olarak problemlere neden olabilir ve özel yönetim tecrübesi gerektirir.

Gürel ve ark (2024), tavuk gübresinin sirkülasyonlu akışkan yataklı bir kazanda yerel linyit ile yakılma potansiyelini araŐtırmıŐlardır. Tavuk gübresi, uçucu madde değerlerinin fazla olması ve orijinal yoğunluklarının kömür yakıtına göre çok daha düşük miktarda olmalarından dolayı kazanın üst kısımlarında yanmıştır. Bu durum yakıt karışımındaki tavuk gübresi miktarının artmasıyla birlikte yatak sıcaklığının düşmesine neden olmuştur. Ayrıca yakıt karışımındaki tavuk gübresi payı arttıkça yanma veriminin de arttığı gözlenmiŐtir.

Kanatlı hayvan gübresinde rutubet %80'e kadar ulaşabilir ve elektrik üretimi optimizasyonu için büyük miktarda biyokütle yakılmasını gerektirir. Rutubet yüksekliği, dehidrasyon sürecini ve ardından devolatilizasyon özelliklerini etkileyerek ekipman seçimi ve proses yönetimini etkiler. Yüksek nem içeriği biyokütlerde tutuşma

sorunlarına neden olabilir ve yanma sıcaklığını düşürebilir, reaksiyon ürünlerinin yanmasını engelleyebilir ve sonuç olarak yanma kalitesini etkileyebilir. Çünkü ıslak biyokütle yanmadan önce termal işlemlerde uzun bir kalma süresi gerektirir (Parlak ve ark., 2021). Ayrıca, daha az neme sahip olan kümes hayvanı gübresi, daha yüksek kalorifik değere sahip biyokütleye dönüşür. Bu nedenle yanma verimliliğinin yükseltilmesi, enerji verimliliğinin artırılması için rutubetin %25'ten daha düşük seviyelere azaltılması tavsiye edilir (Rico-Contreras ve ark., 2017).

Billen ve ark (2014) fosfor bakımından zengin kümes altlığının akışkan yatakta yakılması sonucu, topaklanma, curuflanma, duvar aglomerasyonu sebeplerinden dolayı kazanda yatak oturması ve bu nedenle sistemin durmasına sebep olduğunu, bu çalışmalarında yatağın oturma esas sebebi olan alkali elementlerin zararları, ortaya çıkış süreçlerini, içerik incelemesini ve bunları azalmaya yönelik çalışmalarını detaylı test ve gözlemleri ile anlatmışlardır.

Lamichhane ve ark. (2017), lignoselülozik (yulaf samanı ve söğüt) ile lignoselülozik olmayan biyokütle (kümes hayvanı altlığı) örneklerinin yanma karakterleri ve kül içeriklerini 800°C, 900°C ve 1000°C'de yakarak element analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanarak araştırdıkları çalışmalarında; kümes hayvanı altlığının, söğüt ve yulafla karşılaştırıldığında daha yüksek alkali indeksi, klor ve kükürt içeriği ve daha düşük kül füzyon sıcaklığı ve külde silika verdiğini bildirmiştir. Ayrıca kümes hayvanı altlığında çok yüksek kül içeriği, potansiyel olarak yüksek hacimli kül işleme ekipmanı gerektirdiğini, yanma odasında/kazanda kullanıldığında partikül giderme, cüruf oluşumu ve toz oluşumuna daha fazla dikkat edilmesini önermiştir.

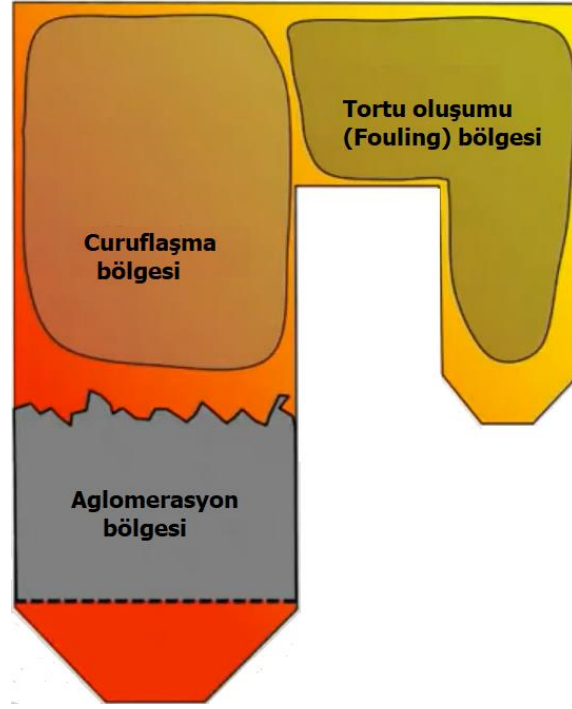
Maj ve ark. (2022), hazırladıkları makalede hayvansal kökenli iki tür biyokütle olan inek gübresi ve tavuk dışkısını ele almışlardır. Bu ürünlerin yanma ve kül özelliklerini incelemişlerdir. Bu ürünlerin diğer yakıtlara göre daha fazla miktarda kül içerik değerlerine sahip olduklarını belirtip, cüruf oluşumları, toz kirlenmesi, kül birikme ve yatak aglomerasyonu için değerlendirmelerini yapmışlardır.

Kaknics Judit ve ark. (2015), farklı tipte yatak malzemeleri kullanarak bitkisel biyokütlenin akışkan yatakta yakılmasını gözlemlemişlerdir. Gözlemlerinde yatağın akışkanlaşmasını, aglomera birikmesini, bu birikmelere sebep olan farklı nedenler olan

yatak malzemesi, sıcaklık, hava akışı parametresini, kül miktarını, ön işleme gibi aşamalarını farklı parametrelerle detaylıca incelemişlerdir.

Toklu (2017), Türkiye'nin çeşitli kırsal bölgelerindeki biyokütle enerji potansiyellerini araştırmıştır. Petrol kökenli yakıtların arzlarının sınırlı olduğunu belirtmiştir. Biyokütle bazında özellikle odun potansiyelini ortaya koyarak, bu potansiyelden elde edilebilecek enerji miktarlarını, yapılacak yatırımlarla beraber istihdama katkısını hesaplamalarıyla desteklemiştir. Sonuçta iklim değişikliklerinin önüne geçmek için, biyokütle enerji potansiyelinin artırılması gerektiğinin üstünü tespitleriyle detaylıca belirtmiştir.

Kanatlı hayvan gübrelerinin biyokütle olarak kullanılarak termal enerji üretimi yöntemine dayanan çalışmaları desteklemek amacıyla, kanatlı hayvan gübresinin bileşimde kullanılan diğer malzemelerle karıştırılmadan kurutulmasının yanı sıra fiziksel, kimyasal ve enerjik özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir. Kanatlı hayvan atıklarının kompozisyonunu iyileştirmek için biyokütle kaynaklarının kullanımı literatürde çok rastlanan araştırma konusu değildir. Bu nedenle bu çalışma, en başta biyokütle enerjisini ve biyokütleden enerji üretim sürecini inceleyip, en uygun yakma teknolojilerini belirtip, kümes hayvanı altlıklarının (PL) kurutulmasıyla biyokütle uygulamalarında yenilenebilir bir enerji kaynağı açısından yanmada değerlendirilmesini amaçlamıştır. Bu amaçla, ürünlerin kimyasal özellikleri ve fiziksel özelliklerinin yanında, biyokütlenin kül bileşimine ve bu bileşimlerden ileri gelen problemler üzerindeki etkisinde araştırılmıştır. Özellikle uygulanan yakma sıcaklıklarına bağlı olarak ergimeye başlayan potasyum, sodyum ve fosfor gibi elementler yakma tesisinin farklı bölgelerinde cüruflaşma ve cidarlara yapışma eğilimini artırmaktadır (Şekil 2.1). Bu nedenle biyokütle yakıtlarının kül miktarı ve kül bileşiminin etkisi de araştırılmıştır.



Şekil 2.1. Biyokütle yakma tesisi kül ile ilgili problemler ve görüldüğü bölgeler.

2.1. Biyokütle ve Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, biyolojik yöntemlerle üretilen tüm maddelerdir. Bu maddeler güneşten dünyamıza doğru gelen foton ışınlarını biyokimyasal çevrim sonucu organik maddeler olarak depolarlar. İnsanlar ve dünyadaki diğer canlı yaşamların, varlıklarını devam ettirebilmek için kullandıkları besin maddelerinden sonra direk veya dolaylı yöntemlerle oluşturdukları, onlardan arta kalan ve doğrudan değerlendirmesi mümkün olmayan maddelerdir. Bu maddeler atık olarak isimlendirilirler. Atıkların türleri, katı, suda erimiş halde ve gazla dönüşmüş halde olup, kesinlikle geri dönüşümleri olmayan, kimyasal iç yapıları çok kompleks ve özellikleri birbirlerine benzemeyen türde malzemelerdir. Bu malzemeler hayvan yemi üretimi için değerlendirilebilmektedir. En önemli potansiyel olan biyokütle kaynaklarını; tarımsal ürünlerin hasatları sonrası oluşan atıkları, orman ürünlerinden geriye kalan kabuk, kök gibi atıkları, gıda ve tarım endüstrinden geriye kalan besin sektöründe kullanılmayacak atıkları, ev ve işyerlerinde oluşan atıksuları, evsel bazlı ürünlerin katı haldeki atıklarının organik kısımları ve hayvanlar için kullanılan gübreler olarak tanımlayabiliriz (Resmi Gazete, 2005).

Biyokütle yakıtı organik maddelerin oluşturduğu yenilenebilir bir enerji kaynağı olup bünyelerinde depolanmış güneşten gelen ışınların enerjilerini içerir. Biyokütle

yakıtların değerlendirilmesi sonucu oluşan enerji türüeyse biyokütle enerjisi ismi verilmiştir. Biyokütle yakıtının yanma emisyonları çok düşük olup, fosil yakıtlara göre (kömür, doğalgaz, petrol) asit yağmuru oluşumlarına sebep vermesi oranı daha azdır. Biyokütle yakıtlarının uygun teknolojilerle ve uygun sistemler kullanılarak enerjiye dönüştürüldüğünde, hayvan, insan ve doğaya zararsız, sürdürülebilirliği olan ve yeni teknolojilerinden dolayı güvenlik faktörleri üst sınıfta olan enerji kaynağıdır.

Biyokütle enerji üretiminde etkin kullanımını sağlamak üzere geliştirilen teknolojilerde biyokütlenin içeriği, nem miktarı, ısıl değerleri, fiziksel boyutları, yoğunluğu, yanma sonucu ortaya çıkan küllerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yanma sonucu ortaya çıkan küllerinin miktarı gibi özelliklerin göz önünde bulundurulması gerekir. Yakıt olarak biyokütlenin kullanılacağı enerji üretim tesislerinin yönetmelikte belirtilen baca emisyon sınır değerlerini sağlayarak yüksek verimlilikte çalışabilmesi için yanma işleminin eksiksiz, kararlı, zararsız olarak gerçekleştirilmelidir.

Biyokütlenin enerji üretimi açısından göz önünde tutulan özelliklerinden nem miktarı, içeriğinin fazla olmasına nazaran yanma verimini düşürmektedir. Bu ürünleri pelet yaparak, sıkıştırma yöntemi metodundaysa biyokütlenin içeriğinde belirli miktarlarda nem değerleri içermeleri istenir. Biyokütlelerin nem miktarları çok düşük olsalar bile fosil yakıtlara nazaran düşük yakıt kalorisi içeriğine sahiptirler. Yani, aynı kaloriye ulaşabilmek için petrol, doğalgaz, bitüm gibi fosil yakıtlara göre daha fazlaca biyokütle yakıtı kullanılması gerekmektedir. Bu durum biyokütlelerin toplanması ve biyokütle yakıtların nakliye masraflarını arttıracığından, ekonomik çözüm olarak en doğru yöntemin biyokütle yakıtların bulunduğu alanda tüketilebilmeleri ya da daha kısa mesafelere taşınmasıdır (Guyon ve ark., 2003).

Biyokütle enerji potansiyeli yüksek olan bitki ve malzemelerin geniş bir şekilde her ortamda yetiştirilebilmesi, üretim ve çevrim teknolojilerinin sektörel bazda kolay şekilde ulaşılabilir olması ve depolanabilme yöntemlerinin kolay olması nedeniyle diğer rüzgâr, hidroelektrik, güneş, dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerjilere ve fosil enerji kaynaklarına göre ön plana çıkmasını sağlamaktadır.

2.2. Biyokütle Enerji Dönüştürme Süreci

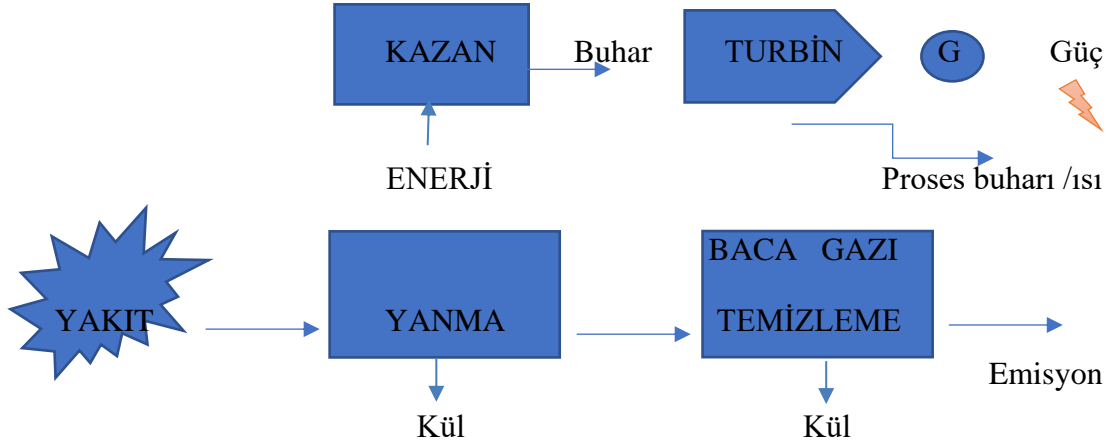
Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi, çeşitli işlemler yoluyla ve farklı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Tesis kurulumu için en önemli hususlardan biri, seçilen teknolojinin ticari ve kendini kanıtlamış olup olmamasıdır. Bu husus elektrik veya ısı /buharın üretiminin istikrarlı bir şekilde devam ettirilebilmesi için önem arz etmektedir. Kendini kanıtlamış ticari teknoloji kullanımı, projenin mali açıdan uygulanabilirliği ve sistemin kullanım süresinin uzun yıllara yayılabilmesi için çok önemlidirler.

Bu biyokütle enerji elde etme teknolojilerinden bahseder isek , su /buhar kazanı ile birlikte ızgaralı teknoloji kullanan biyokütle yakma tesisleri, su/buhar kazanı ile birlikte dolaşımli akışkan yatak (CFB) teknolojisi kullanan biyokütle yakma tesisi , su/buhar kazanı ile birlikte kabarcıklı akışkan yatak (BFB) teknolojisi kullanan biyokütle yakma tesisleri , organik rankine devir (ORC) teknolojisi kullanan yanma tesisleri , biyogaz tesisleri (aneerobik sindimi + gaz motoru) şeklinde sıralayabiliriz.

Tercih edilecek teknolojilerin seçimi biyokütle türünün; yakıt esnekliğinin, yükleme kapasitesinin, yatırım maliyetinin ve tesis büyüklüğünün dikkate alınması gerekmektedir (PwC Türkiye, 2021).

2.3. Biyokütle Yanma Teknolojileri

Biyokütle yakma santralleri genel olarak hammadde alımı, yakıt hazırlama, yakıt depolama sistemi, yanma sistemleri (Izgaralar – CBF- BFB) dahil olmak üzere tesis boyunca bir dizi akış aşamalarından meydana gelir. Şekil 2.2’de biyokütle yakma tesislerinin enerji üretimine kadar olan akım şematize edilmiştir. Bundan sonraki aşamaları, kazan yüksek sıcaklığa çıkana kadar, çıkan yanma gazlarındaki enerjiyi yüksek basınçlı buhara dönüştüren, sonunda elektrik enerjisine ve proses ısısına dönüşen enerji dönüşüm sürecidir. Sistemlerdeki siklonlar, elektrostatik çökticiler ve yıkayıcılar gibi normal olarak kullanılan ekipman tipleri de emisyonların ve baca gazının temizlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.2. Biyokütle Yakma Tesisi Şematığı.

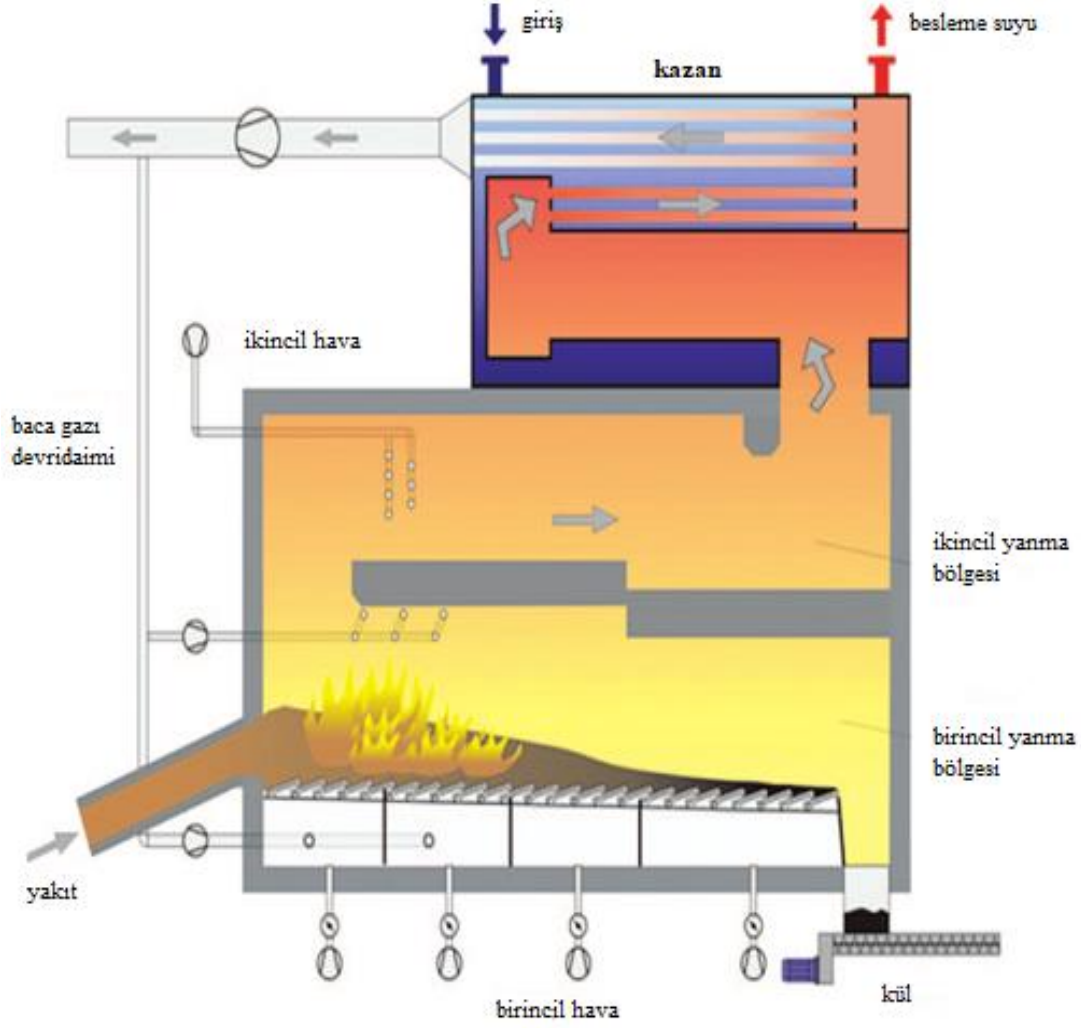
Izgaralar, dolaşımli akışkan yatak ve kabarcıklı akışkan yatak olmak üzere biyokütle enerji tesisleri için en yaygın kullanımı olan ve ülkemizde de özellikle tercih edilen üç adet yakma sistemi teknolojileridir.

2.3.1. Izgara teknolojisi

Izgaralı yanma genellikle sabit yatak teknolojisi olarak adlandırılır. Genel olarak ızgara yakıtlı üniteler, yüksek nem, yüksek kül içeriği ve değişen parçacık boyutlarına sahip yataklar için uygundur. Seçilecek ızgaranın tipi ve boyutu, sistemde kullanılacak biyokütle türüne, biyokütle türünün yanma davranışına, nem içeriğine, kül erime noktasına ve partikül boyutuna bağlı olacaktır.

Yakma işlemi ve dolayısıyla kazanın verimliliği için, yakıtın veya yakıtın karışımının ızgaradaki yakıt yatağında dağılımının düzenli olması önemlidir.

Izgara tipli kazanlarda yakıt yatağında ve üstünde gerçekleşir. Izgaranın her bir parçası farklı işlemler ile kendi bölümü için gereken havayı almak üzere hava bölümlerine ayrılmıştır (kurutma, yakma) Birincil verilen hava ızgaranın altından yatağa verilir, ısıtılmış birincil hava ıslak yakıtların kurummasına da yardımcı olur. İkincil hava ise, uçucu maddeleri ve yakıt tozu parçacıklarını yakmak için ızgaranın üstündeki fırına verilir (Şekil 2.3). Izgaranın yakma türünü belirlerken biyokütle parçacıklarının boyutu ve yanma kalitesi dikkate alınır. Izgaranın çalışma kontrollerinin yanma sürecini en iyi hale getirecek şekilde yapılması gerekmektedir. En sık kullanılan ızgara tipleri; hareketli ızgara, titreşimli ızgara ve adımlı ızgaralardır. Kullanılacak yakıtın türüne ve üretilecek enerji miktarına göre bu tiplerden birisi seçilir

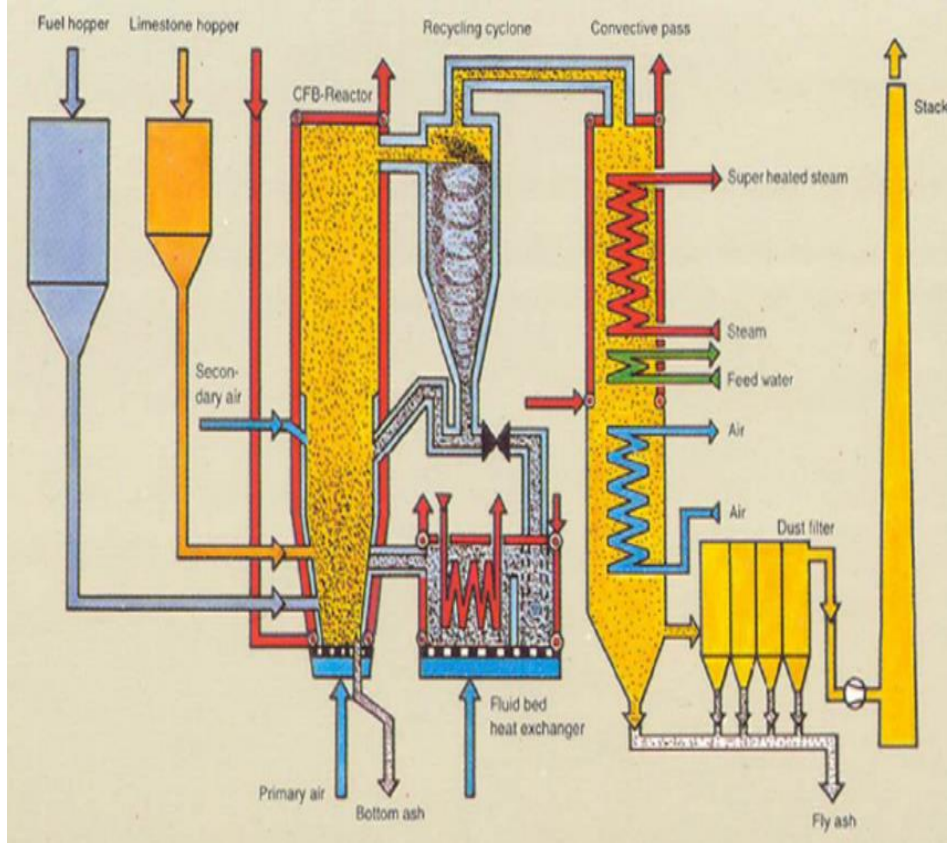


Şekil 2.3. Izgaralı Kazan şematığı (Albrecht ve ark. 2008).

2.3.2. Dolaşımli akışkan yatak

Dolaşımli akışkan yataklar daha büyük enerji üretmek istenen tesislerde kullanılır. CFB konfigürasyonunda, katılan maddelerin baca gazı akışından izole edildiği ve bunların daha düşük bir fırında geri dönüştürüldüğü katı ayırıcılar bulunur. Toplanan parçacıklar sirkülasyon şeklinde kazan yatağına geri getirilmektedir.

Bu sistemde akışkanlaşma hızları yüksektir. Akışkanlaşmayı sağlamak için genelde kum veya kül kullanılır. Yatak malzemeleri, alt kısımdan üst kısma doğru kademeli olarak azalan bir yoğunluk ile kazan boyunca dağılır. Parçaların büyük bir kısmı yataktan havalanarak bir siklon ile tekrar dolaştırılır. Dolaşımdaki yatak malzemesi kazandaki sıcaklık kontrolü için kullanılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Dolaşımlı akışkan yatak şematığı (Vasan ve ark. 2015).

Dolaşımli akışkan yatak kazanlarının bakım maliyetleri yüksektir. Yatak altındaki refrakterler ve kazanlar arasındaki duvarlarda sık sık bakım yapmak gerekir. Ayrıca yüksek bir birincil hava basıncı gerektiğinden işletme maliyetleri fazladır. Yüksek bir birincil hava basıncı ile çalıştılarından dolayı yatak malzemesi sürekli olarak eklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle kül atık miktarları da yüksektir ve ek maliyetler doğurur.

2.3.3. Kabarcıklı akışkan yatak

Kabarcıklı akışkan yatakların ana çekirdekleri, yanma odasıdır. Su soğutmalı yan duvarlara ve tabana sahiptirler. Yatak fırının alt kısmında hava kolektörleri bulunur ve bunların üstlerinde alttan hava verilerek yatağın akışkanlaşmasını sağlayan nozullar bulunur (Şekil 2.5). Bu nozullar alttan yakıtın karıştırılmasını da sağlarlar. Yatak malzemesi olarak genel olarak silis kumu kullanılır. Resirkülasyon ve primer fanlarına yüklenerek içerideki alttan giren hava miktarı arttırıldığında havada uçuşan bu yatak malzemeleri, hareket ederek, kabarma şeklinde, kaynamış gibi karışırlar.



Şekil 2.5. Kabarcıklı akışkan yatak içindeki nozulların görüntüsü

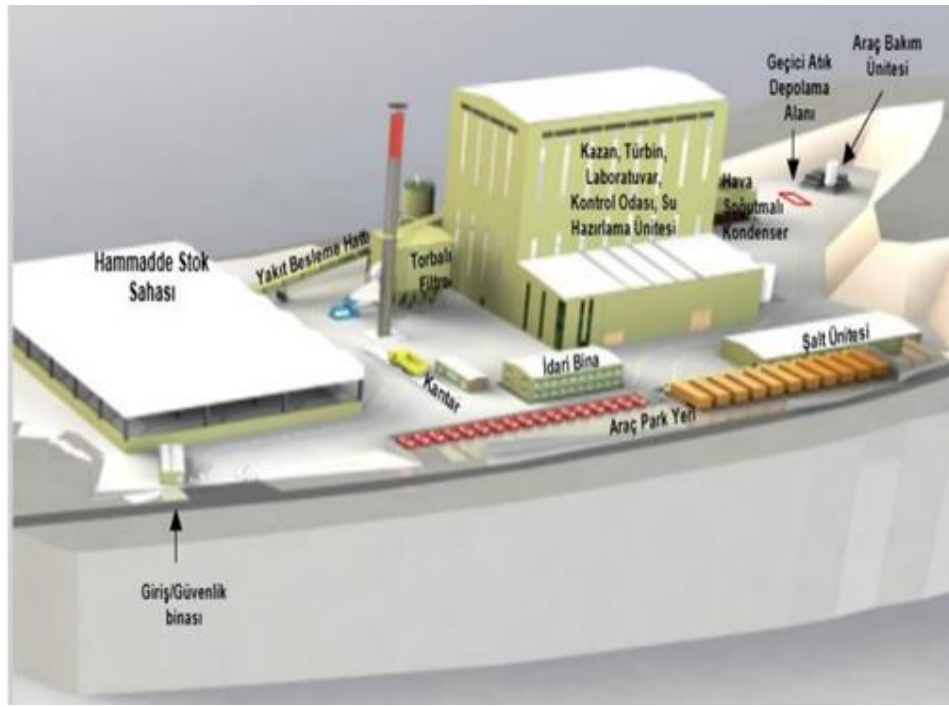
Birincil hava, yakma havasının yaklaşık %30'u dur ve biyokütlenin nem içeriğine göre değişmektedir. Kalan hava, kazan üzerindeki ikincil ve üçüncül hava kanalları üzerinden, yakma işlemini genişletecek şekilde enjekte edilir. Akışkan yatağın dinamiği, hava hızı ve içindeki parçacıkların boyutları ile direkt olarak ilişkilidirler. BFB çalışma aralığı, minimum akışkanlaşma hızı ile yatak parçacıklarının geçen gaz tarafından sürükleneceği çekiş hızı arasındadır. Yanma odası refrakter yük değişiklikleri ile korunduğundan, soğuk başlama kapasiteleri, ızgara teknolojisine kıyasla nispeten yavaştır.

Bu tip kazanlar yaş malzeme içeriği fazla olan ve fazla ısıl gücü olmayan yakıtların kullanıldığı tesisler için tercih sebebidir. Akışkan yatak teknolojileri özünde, terminleri kolay olan biyokütle yakıtları için, bu yakıtların sistemde karışım halinde yüksek verim ile yakılarak temiz ve güvenli bir şekilde buhardan elektrik üretildiği sistemlerdir. Çok farklı ürün çeşitliliği, uygun normlarda emisyon değerleri sağlaması, değişken kalorifik değerlere sahip yakıtlar ile çalışabilmesi, yüksek yanma verimi, kolay işletme ve düşük personel sayısı ile kendini kanıtlamış bir teknolojidir.

Akışkan yataklı yanma sistemlerinde yatak içerisi kaynama şeklinde olduğu için düşük sıcaklıklarda bile ısı verimli bir şekilde transfer edilebilir. Bu tesislerde hem kümes hayvanı altlığına bertarafı sağlanmakta hem de devamlı yakıt bulunabilmesinden

dolayı yüksek emre amadelik göstermektedirler. Ayrıca kümes hayvanı altlığının yanında, diğer biyokütle ürünlerinin de kullanılması bu tesislere olan ilgiyi arttırmaktadır.

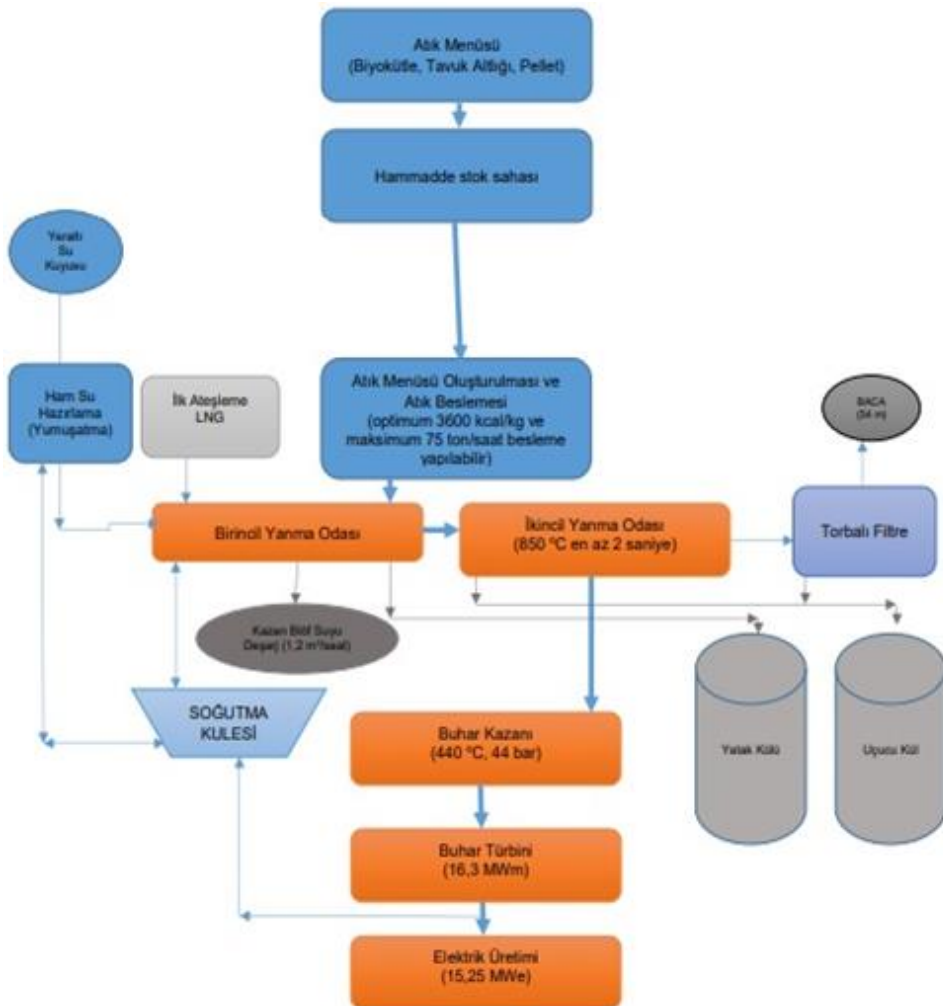
Bu tesislerde genel hatlarıyla , depolama sahası, yakıtların kazana ulaşmasını sağlayan yakıt besleme hatları, yakıtların yakıldığı kazan binası, uçucu küllerin tutulduğu torbalı filtre binası, yönetim binası, gelen yakıt araçlarının tartıldığı kantar, kazan çevresinde dolaşan borulardaki suyun ısınarak, buhardan elektrik üretim dönüşümünü sağlayan türbin binası, soğutma kulesi, geçici depolama alanları ve bakım üniteleri, baca, su hazırlama üniteleri, yangın depoları ve yangın binaları, emisyon izleme üniteleri, tüm sistemlerin kontrol edildiği kontrol binaları, kazan içerisine taze hava sağlayan primer denilen birincil fanlar, kazan içerisinde oluşacak gazı baca ve torbalı filtre sistemine doğru çekmeyi sağlayan fan ve kazan içerisinde oluşacak yüksek sıcaklığı dengelemeye yarayan, gerektiğinde bacadan aldığı CO₂'i tekrar kazan içerisine vererek O₂'ni boğarak yatak sıcaklıklarını düşürürler (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sakarya’da bulunan, kabarcıklı akışkan yatak teknolojisine sahip elektrik santrali

Şekil 2.6’de Sakarya İli içerisinde bulunan kabarcıklı akışkan yatak teknolojisine sahip tesisin yerleşimi gösterilmiştir. Bu tesiste kümes hayvanı altlığı veya kümes hayvanı altlığı karışımı biyokütle ürünleri ham madde stok alanında depolanırlar. Bir reçete

şeklinde kazana, yakıt besleme bantlarıyla beslenirler. Besleme bantlarından sonra yakıt kazan yanma odasına ulaşır. Yakıt buraya ulaştıktan sonra kazan sıcaklığı 850-900 derecelere yükseltilir. Yakıt yandıktan sonra yanma odasında minimum 2 saniye kaldıktan sonra yükselen gaz ve küller torbalı filtreye ve bacaya doğru ilerler. Oluşan uçucu küller, torbalı filtrelerde tutularak kül atma sistemi aracılığıyla kül silosuna verilir. Ayrıca uçucu külün kül silosundaki havalandırma tertibatı için tozsuzlaştırma ünitesi ve filtreleri vardır. Burada tutulan küllerde pinomatik taşıma sistemiyle kül silolarına nakledilir. Sistemde kazanda 440 derece ve 44 bar basınca getirilen buhar, türbine beslenir ve elektrik üretimi gerçekleşir. Türbinden çıkan buhar soğutma kulesine gönderilip, burada sisteme beslenecek ham su ile su tekrar sisteme beslenilerek kullanılır (Şekil 2. 7).



Şekil 2.7. Sakarya'da bulunan kabarcıklı akışkan yatak teknolojisine sahip kümes hayvanı altlığı yakılan enerji santrali prosesi

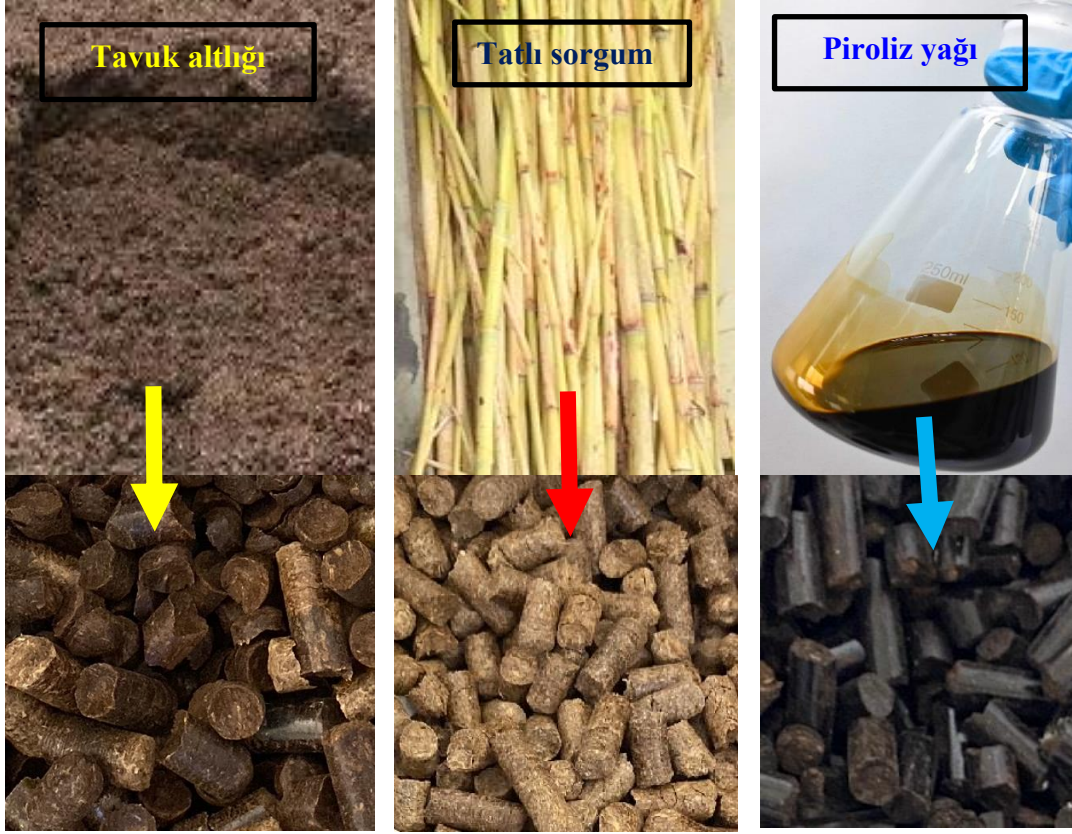
Hayvansal kökenli biyokütle hammaddelerin yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesinde yakıt özelliklerinin tanınması önemli bir konudur. Hayvansal atıklar da dahil biyokütle hammaddelerinin yaklaşık ve elementel laboratuvar değerlerini içeren birçok bulgu vardır. Ancak, kümes hayvanı altlığı gibi hayvansal atıkların yanma tesislerindeki temel problemlerini kül kompozisyonlarından ileri gelen tortulaşma, korozyon, yatak aglomerasyonu ile bu problemlere neden olan yanma sıcaklığı uygulamaları olmaktadır. Tavuk gübresi zor yanan bir hammaddedir, kül oranı yüksektir, enerji değeri değişken ve düşüktür. Bu özellikleri iyileştirmek için pek çok yenilenebilir olmayan ve diğer bitkisel, ormansal biyokütle enerji kaynakları ile beraber yakma araştırmaları devam etmektedir. Bu çalışmada, özellikle kabarcıklı akışkan yatak yakma teknolojisi baz alınarak, kümes hayvanı altlığının yanma özelliklerini iyileştirebilecek yenilenebilir biyokütle kaynakları incelenmiştir. Kümes hayvanı altlığının yanma özelliklerinin tatlı sorgum bagası ve kümes hayvanı altlığının pirolizinden ortaya çıkmış piroliz yağı ile iyileştirilebileceği düşünülerek, enerji potansiyelindeki iyileşme; yaklaşık ve elementel parametrelere ilave olarak alev imaj analizi, alevlenebilirlik indeksi ve kül analizi parametreleri ile karakterize edilmiştir.

3. MATERYOL VE METHOD

3.1. Deneysel Materyaller

Çalışmada kullanılan kümes hayvanı altlığı örnekleri, Türkiye'nin Sakarya ilindeki tavuk çiftliklerinden alınırken, gübre tavuk kümeslerinden çıkarılmıştır. Bölgedeki deneysel kullanım için PL partilerini temsil etmek üzere farklı tavuk kümeslerinden her biri 10 kg'lık olarak 15 alt örnek toplandı. Yatak malzemeleri, başlıca tavuk dışkıları ve tüylerden oluşan talaş ve gübreden oluşan bir karışımdı ve nem içeriği yaklaşık olarak %15-30 idi. Bu çalışmada kullanılan tatlı sorgum bagası, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, Gulseker çeşididir. Yaprakları soyulmuş bitki saplarından su ekstraksiyonu işleminden sonra ortaya çıkan yan ürün olarak kalan posası Türkiye'nin Sakarya ilindeki bir yerel çiftçiden elde edilmiştir. Posa örneği, nem içeriği %10 değerinin altına düşürülünceye kadar açık hava koşullarında kurutulmuş ve ardından homojenize edilmiş örnekler daha sonra laboratuvar değirmeni (Perten 3100) ile öğütülmüş ve sonraki analizler için 2 mm gözenekli bir elekte elenmiştir. PL ve biyokütle örneklerinin yanma özelliklerini belirlemek için üç homojenize örnek üzerinde yaklaşık analiz (proximate), elementel analiz (ultimate) ve ısı değer kalorimetre analizi yapılmıştır. Piroliz yağı, tavuk atığı için 600°C'de hızlı bir piroliz işlemi kullanan gazlaştırma tesisinden temin edilmiştir. Piroliz/gazlaştırma prosesinde yoğunlaştırılabilir buhar kondenserde soğutulur ve altta bir tankta toplanır. Yüzeydeki malzeme daha sonra ham biyo-yağı elde etmek için ayrı bir şekilde toplanır.

Çalışmada, farklı biyokütle peletleri, PL'yi SS ile 0,0% SS (T₀), 25% SS (T₁), 50% SS (T₂) ve SS 75% (T₃) oranında karıştırılarak hazırlandı ve 100% SS sadece tatlı sorgum bagası (T₄) ile karşılaştırıldı. İkinci bir faktör olarak, bu örneklerin paralel setleri, PL peletlerinin enerji değerini artırmak ve düşük kül birikimi sağlamak için ek olarak %10 piroliz yağı ile karıştırılmıştır (Şekil 3.1). Deney çalışmaları için kullanılan ham maddeler, bu maddelerin özellikleri Tablo 3.1'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan biyokütle malzemeleri ve hazırlanan biyoyakıtlar

Kuru ağırlık bazında %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında tavuk altığına, tatlı sorgum bagası karıştırılarak hazırlanan biyoyakıtlar ardından sanayi tip pellet makinesinde 8 mm çapında pellet olacak şekilde peletlenmiştir. Peletler oluşturulurken herhangi bir sıcaklık ve buhar uygulanmamıştır. Hazırlanan biyoyakıt numuneleri elle beslenmiş ve makineden alınan peletlenmiş numuneler ayrı ayrı paketlenmiştir. Yukarıda bahsedilen örneklerin bir paralel numunelerine yine kuru ağırlık bazında %10 oranında piroliz yağı karıştırılarak ayrıca peletlenmişlerdir. Pelet üretim sürecinde sürtünme kaynaklı sıcaklıkları yükselen peletler işlemden sonra soğutulmuş ve ardından plastik torbalarda paketlenmiştir. Biyoyakıt analizleri bu pellet numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yine bu pelletler yakma testinde kullanılarak yanma performansları alev imaj analizi ile değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1. Kumes hayvanı altlığı, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağı örneklerinin özellikleri.

Parameters	Tavuk altlığı	Tatlı sorgum	Piroliz yağı
Lignin %	5.23	3.31	-
Hemiselüloz %	29.49	27.75	-
Selüloz %	22.65	22.91	-
Rutubet (%)	22.45	10.06	3.50
Kül (%)	12.46	5.55	0.42
Uçucu madde (%)	72.74	81.95	-
Sabit karbon %	14.80	12.50	-
C %	45.29	45.05	68.70
H %	4.70	4.70	8.20
N %	5.20	1.45	7.20
O %	44.80	47.01	16.00
HHV MJ kg ⁻¹	16.25	18.37	34.59
Ca	2.88	2.49	0.15
Mg	0.57	1.17	0.06
Si	1.17	0.85	-
K	3.48	2.06	0.44
P	2.03	0.92	0.02
Na	0.62	0.36	0.23
Al	0.05	0.97	0.04
Fe	0.04	0.59	0.11
Zn	0.06	0.29	0.02
S	0.71	0.65	0.56
Cl	0.48	0.13	0.21

3.2. Kuru madde ve nem muhtevası tayini

Aynı zamanda etüv yöntemi de denilen bu yöntemde, malzemelerin kuru madde miktarı ve nem içeriği 105 °C' de ürünlerin sabit bir tartım sonucuna gelinceye kadar etüv içerisinde önce kurutulup sonra da desikatörde soğutulma işlemi yapıldıktan sonra ağırlıklarının ve ağırlık kayıplarının, orijinal numune ağırlıklarına yüzde olarak

orantılanmasıyla bulunur. Deneyler Şekil 3.2 de görülen Memmert Un 55 markalı etüv ve Şekil 3.3 de görülen Weightlab markalı hassas terazi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.2. Memmert Un 55 etüv cihazında örneklerin kurutulması

Hazırlanan biyoyakıt örnekleri önce sabit ağırlığa ulaşana kadar 60°C'de kurutulmuş ve daha sonra yaklaşık 15-30 saat boyunca proksimet ve elementel analiz için 105°C'de kurutulmuştur.

$$\text{Rutubet (\%)} = (\text{kuru ağırlık/ilk ağırlık}) \times 10$$



Şekil 3.3. Weightlab marka hassas tartı cihazı ile ağırlıkların belirlenmesi

3.3. Uçucu Madde Tayini

Sabit tartım konumuna getirilen krozelerin içlerine 1 gramlık numuneler koyulur. Daha sonra krozelerin kapakları kapatılarak 950 derecelik kül fırınına yerleştirilir. Örnekler 7 dakika boyunca bu sıcaklıktaki fırında bekletilir. Kül fırınından ürünler alınarak, Şekil 3.4'de görülen desikatörde soğutularak son tartımları yapılır. Kütlelerindeki farktan uçucu madde miktarı hesaplanır. Çalışma kapsamında hazırlanan örnekler ASTM E870 standardına göre Şekil 3.5'de görülen Carbolite marka kül fırını kullanılarak 950°C'de, 7 dakika boyunca yakılmış ve uçucu madde miktarı aşağıdaki formül kullanılarak kütledeki kayba dayanarak tahmin edilmiştir (Taşar, 2021)

$$Uçucu\ madde\ yüzdesi\ (\% UM) = \left(\frac{g1 - g2}{g1} \right) \times 100 - M$$

g1: Örneğin ilk ağırlığı (g)

g2: Örneğin analiz sonucu ölçülen ağırlığı (g)

M: Nem yüzdesi



Şekil 3.4. Carbolite marka kül fırını ve kül fırınının içi



Şekil 3.5. Desikatör (nem alıcı)

3.4. Kül miktarı tayini

Yakma yöntemine göre 550 °C'lik kül fırınında sabit ağırlığa gelmiş krozelere fırından çıkartılıp, desikatörlerde soğutulur, hassas terazide son ölçümleri yapılır (3.1). Daha sonra 1 gr civarındaki malzeme kroze ile beraber tartılır (3.2). 550 derecelik kül fırınına kroze içindeki malzemeyle koyulur, yaklaşık 1 saat fırında bekletilir. Fırından alınıp, desikatörde soğutulduktan sonra tartımları yapılır (3.3) (Taşar, 2021). Kül içeriği ASTM D1102 protokolü kullanılarak belirlenmiş, örneklerin açık krozelere 550°C'de kül fırınında yakılmış ve kalıntı kütlesi hesaplanarak bulunmuştur.

$$a1 = \text{Nemi alınmış ölçüm} \quad (3.1)$$

$$a2 - a1 = Ag \quad (3.2)$$

$$a3 - a1 = Bg \quad (3.3)$$

$$\text{Kül yüzdesi (\%)} = 100 \times \frac{Bg}{Ag}$$

3.5. Sabit karbon tayini

Sabit karbon, biyokütlenin piroliz aşamasında devolatilizasyondan sonra char kısmında kalan katı karbonun kütle fraksiyonu olarak tanımlanır. Biyokütle ve kümes hayvanı altlığı örneklerinin kül, rutubet ve uçucu madde miktarları toplamlarının 100 değerinden çıkartılmalarıyla bulunan bir değerdir. Yani uçucu gazlar ve külün

uzaklaştırılmasından sonra geriye kalan malzemeler sabit karbondur (Boylu ve Karaağaçlıoğlu, 2018).

$$\text{Sabit karbon (\%)} = 100 - \text{Rutubet} - \text{Uçucu madde} - \text{Kül}$$

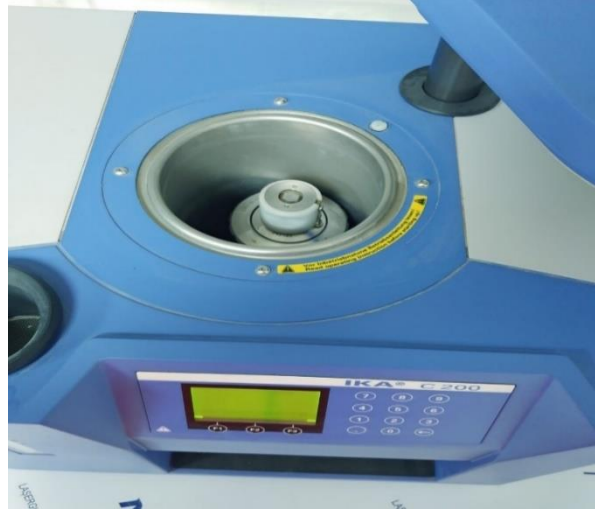
3.6. Kalorifik değer tayini

Biyokütle hammaddesi örneklerinin ısıl değeri, birim ağırlıktaki örneklerin komple yanması sonucunda ortaya çıkan ısıl birimidir. Bu ısıl birimler, örneklerin organik yapısındaki yanmamış maddelerin miktarına bağlıdırlar. Isıl değerleri etkileyen faktörler, kül miktarı, rutubet ve elementel içeriktir. Kalorimetre yardımıyla ölçülür. Örneklerin kalorimetre bombası içinde, basınç altında, oksijen yardımıyla sabit ölçülmüş bir hacimde yakılması ve komple yakılma gerçekleştikten sonra oluşan ısısının ölçülmesi metoduna dayanır (Korkmaz, 2022). Çalışma kapsamında hazırlanan örneklerin ısıl değeri Şekil 3.6 de dış yüzeyi ve kumanda ekranını, Şekil 3.7 da deney öncesi kalorimetre bombasının yerleştirilmesinin gösterildiği IKA C200 kalorimetre cihazı ve Şekil 3.8 de görülen bu cihaza ait kalorimetre bombasıyla hesaplanmışlardır.

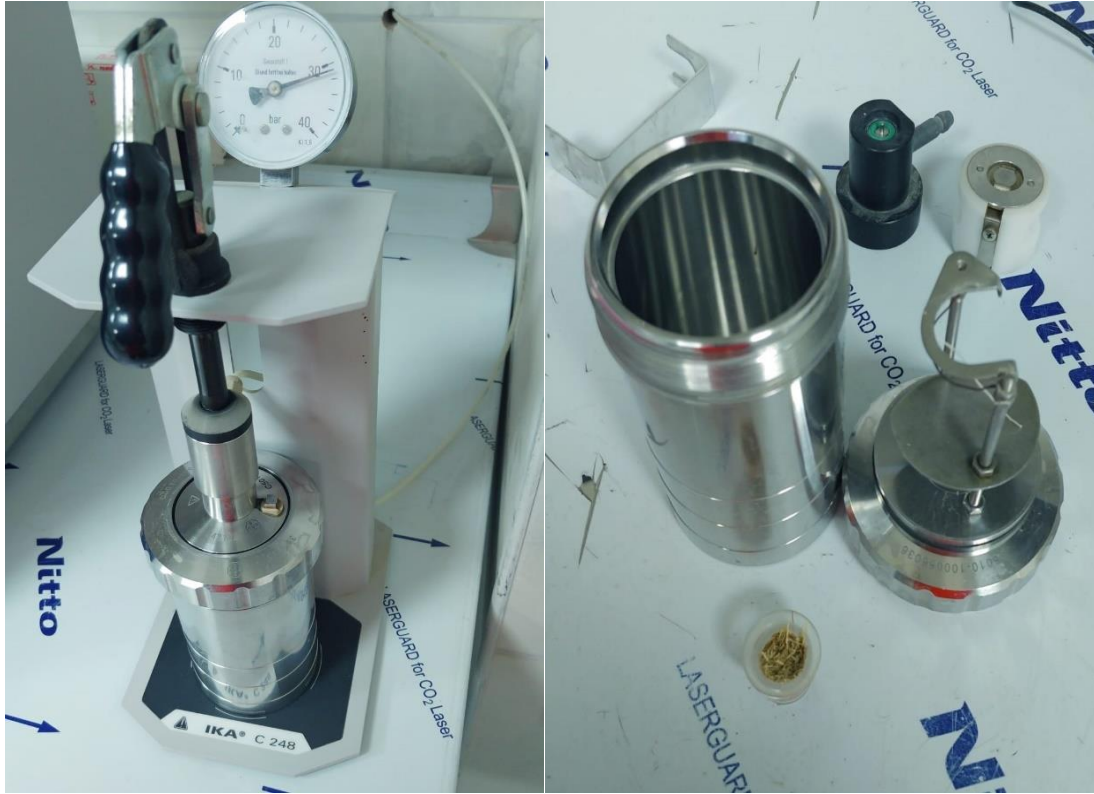


Şekil 3.6. IKA C 200 kalorimetre cihazı

Yakıt yandığı sırada oluşan su buhar fazına geçtiğinde verdiği ısı düşük ısıl, yakıt yanması sırasında oluşan su sıvı halde kaldığında ise verdiği ısı yüksek ısıl değerlerdir. Kalorimetre cihazları üst ısılı ölçer. Düşük ısıl değeri ise formüllerle hesaplanırlar.



Şekil 3.7. Kalorimetre bombası içindeki numunelerin, IKA C200 kalorimetre cihazında kalorifik değer tayini yapılması



Şekil 3.8. Kalorimetre bombası ve bomba içerisine oksijen gazı doldurma ünitesi

Isıl değerleri belirlemek için, PL ve tatlı sorgum bagası örnekleri 1 mm'de öğütüldü, sırasıyla 60°C'de kurutuldu ve ardından 105°C'de 24 saat kurutuldu. Islak ağırlık belirlendikten sonra, yüksek ısıl değer (HHV) referans sıcaklıkta (25°C) bomba tipi bir kalorimetrede (IKA, C200) doğrudan bir tablette 1 g üzerinde belirlendi. Tam yanmanın 6 dakikada gerçekleşmesinin ardından, kalorifik değer kalorimetre

ekranında Kcal Kg⁻¹ olarak okundu. Düşük ısı değeri (LHV), HHV ölçümleri ve yakıt örneklerinin nem içeriği kullanılarak bir analitik formülle bulunmuştur.

$$LHV = HHV \left(1 - \frac{MC}{1000}\right) - P_s \left(\frac{MC}{1000}\right) \Delta H_v \quad (3.4)$$

MC 60 °C'deki nem içeriğini (g kg⁻¹) temsil eder, Ps örnek ağırlığını (1.00 ± 0.01 g) ve Hv su buharının ısı içeriğini (2.54 MJ kg⁻¹) temsil eder.

3.7. Elementel analiz tayini

Biyokütle numunelerinin temel elementel analiz bileşenleri, biyokütle yakıt kalorifik değerinin ve potansiyel kirlenici davranışının belirlenmesinde önemli bilgiler verir. Elementel analiz cihazlarıyla ölçümleri yapılır. Bu cihazlarda temel prensip, numunenin yüksek sıcaklıklara getirilerek yanması yöntemine dayanır. Katı örneklerdeki anorganik ve organik maddelerin yapılarında bulunan karbon, kükürt, azot ve hidrojen elementlerinin aynı anda tayinlerine yönelik cihazlardır. Yüksek sıcaklıklarda (950 derece-1300 derece arası) yakma sistemleridir. Yöntemleri bu yüksek sıcaklıklarda karbon, hidrojen, kükürt ve azot içeren maddeleri saf oksijenli ortamda tamamen parçalayarak gaz fazlarındaki bileşik içeriklerine dönüşmektedir. Yanma sonucunda karbon CO₂'e, hidrojen H₂O'ya; azot N₂'ye ve kükürt SO₂ gazlarına dönüşür. Cihazlarda bu oluşan gazlar üzerindeki numunelerdeki karbon, hidrojen, kükürt ve azot miktarlarını yüzde cinsinden hesaplarlar. Karbon, hidrojen, kükürt cihazın kızılötesi absorpsiyon dedektörleri, azot ise termal iletkenlik dedektörleri ile hassas olarak ölçülür. Elementel analiz cihazları ile homojen birleşimi olan tüm organik katıların analizleri yapılabilir. Karbon ve hidrojen yakıtın kalorifik değerine pozitif, oksijen negatif ve azot ile kükürt potansiyel kirlenici gaz emisyonu göstergesidir. Örneklerin karbon (C), hidrojen (H), azot (N) ve kükürt (S) gibi temel analizleri CHN628 Analizörü kullanılarak ASTM D5373-14 yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Toplam oksijen (O) fark yöntemiyle belirlenmiştir.

$$Oksijen (\%) = 100 - Karbon(\%) - Hidrojen(\%) - Azot(\%) - Kükürt(\%)$$

3.8. Alevlenebilirlik indeksi

Alevlenebilirlik indeksi, biyokütlenin yakma koşulları altında tutuşma performansının bir göstergesidir. Yüksek indeks değerine sahip biyokütle, yakma tesislerinde hızlı

ayrışmayı kolaylaştırarak genel yanma verimliliğini artırır. Alevlenebilirlik indeksi (Ii), aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir.

$$Ii = \frac{HHV - 81 \times FC}{VM + MC} \quad (3.5)$$

HHV Kcal kg⁻¹ cinsinden yüksek ısıl değeri temsil eder, FC sabit karbon (%), VM uçucu madde (%) ve MC nem içeriği (%) olarak ifade edilir.

3.9. Alev imaj analizi

Test edilen örneklerin yanma özelliklerini görselleştirmek için Polesek-Karczewska ve ark. (2018) tarafından çalışılan bir laboratuvar yanma yöntemi kullanılmıştır. Yaklaşık 250 gr ağırlığında kuru bir pelet örneği delikli düz bir ızgara üzerine yerleştirilmiş ve yanma odasına konulmuştur. Biyokütle örnekleri, ızgaranın altından sağlanan sıcak hava (yaklaşık 350°C) ile kendiliğinden alev alması sağlanmıştır. Tüm yanma süreci boyunca alev yanma evresi, yanma sisteminin önüne yerleştirilen yüksek çözünürlüklü bir kamera ile kaydedilmiştir. Farklı yanma süreçlerine karşılık gelen görüntü dosyaları 450 × 800 piksel görüntüler olarak kaydedildi ve görüntülerin analizleri için Image-J yazılımı kullanılmıştır. RGB renk uzayı, alev görüntü işlemede yaygın olarak kullanılır. Image-J programı, görüntünün belirli bir alanındaki RGB profili analizi ile baskın renk yoğunluğunu belirlemeyi mümkün kılar. Kırmızı renk yoğunluğunu belirlemeden önce, RGB renk uzayı, görüntünün yanmamış renk uzayının yansımalarını azaltmak için gri ölçek haline dönüştürülür. Görüntüde eşit alanlar oluşturmak için belirli bir sayıda piksel 1 cm olarak ayarlanır ve 1 cm yüksekliğinde dikdörtgen alanlar kılavuzlar kullanılarak oluşturulur. Kırmızı renk yoğunluğunun ortalama değerleri, bu alanlardan her biri için hesaplanmıştır.

3.10. Kül bileşimi ve yanma indisleri

Biyokütle örneklerinin inorganik bileşimi, bir Inductively Coupled Plasma-Mass Spektrometri (ICP-MS Optima 2200 Perkin Elmer, ABD) cihazı kullanılarak asit sindirimi ile katı kül artığına nitrik asit, hidroklorik asit sindirimi uygulanarak belirtilen bir ASTM D3682 yöntemi ile önceden değerlendirerek incelenmiştir. Sindirim öncesi, biyokütle ve kül örnekleri kül fırınında 550°C'lik bir yakma sıcaklığında tamamen yanmıştır. Biyokütlenin mineral bileşimi ile ilişkili sorunların tahmin edilmesi amacıyla PL ve karışımların aerosol emisyonlarının, kül erime

davranışının, aerosol emisyon indeksi, kül erime indeksi, baz asit oranı, yüzeye yapışma kaplama indeksi, kuruma indeksi, erime indeksi, yatak aglomerasyon indeksi ve kazan korozyon eğilim indeksi, daha önceki çalışmalarda (Garcia Maraver ve ark., 2017; Ozdemir ve Demir, 2021) tanımlanan prosedüre dayanarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama, yakıtın kimyasal analizi, kül oluşturan elementler arasındaki kimyasal reaksiyonlar ve farklı element grupları arasındaki etkileşimlere dayanmaktadır. Yakıt indisleri, külün kimyasal bileşimine dayanarak erime davranışını tahmin etmek için sıklıkla kullanılır.

Partikül emisyon indeksi (PEI), biyokütle peletlerinde aşağıdaki aerosol oluşturan elementlerin konsantrasyonunun toplamı kullanılarak değerlendirilir (denklem 3.6).

$$PEI = K + Na + Zn + Pb \quad (3.6)$$

Biyokütle örneklerinin kül erime davranışı (AMB), aşağıdaki denklem (3.7) kullanılarak elementlerin mol bazında tahmini olarak hesaplanır.

$$AMB = \frac{Si+P+K}{Ca+Mg} \quad (3.7)$$

Isı transfer yüzeylerindeki kül partiküllerinin çökmesi veya kuru birikimi, kaplama eğilimini gösteren kül birikme eğilimi denklem (3.8) kullanılarak hesaplandı.

$$FI = \frac{Fe_2O_3+CaO+MgO+Na_2O+K_2O+P_2O_5}{SiO_2+Al_2O_3+TiO_2} \times (Na_2O_3 + K_2O) \quad (3.8)$$

Biyokütle cürufanma eğilimi değerlendirme indeksi, denklem (3.9) kullanılarak tahmin edilmiştir. BSI 0.7'nin altındaysa, yumuşama sıcaklığı 1000 °C'nin altında ve BSI 1.7'nin üzerindeyse, yumuşama sıcaklığı 1200 °C'nin üzerindedir.

$$BSI = \frac{MgO+Al_2O_3+Fe_2O_3}{CaO+P_2O_5} \quad (3.9)$$

Yatak aglomerasyon indeksi, bir akışkan yatak reaktöründe yanma süreçlerinde kül birleşimini gösterir ve denklem (3.10) kullanılarak tahmin edilir

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O+K_2O} \quad (3.10)$$

Son olarak, külün erime sıcaklıkları, sıcaklık duyarlılık analizi kullanılarak değerlendirilir ve ASTM D 1857 yöntemine göre Deformasyon Sıcaklığı (DT), Küresel Sıcaklık (ST), Yarı Küresel Sıcaklık (HT) ve Akış Sıcaklığı (FT) olarak verilir.

3.11. İstatiksel analiz

İki ana faktör olan piroliz yağı ve tatlı sorgum bagasının tavuk gübresinin yanma özellikleri üzerindeki etkilerini ve bağımlı değişkenler üzerindeki etkileşimlerini değerlendirmek için çok faktörlü varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. İlave olarak, bağımlı değişkenlerdeki değişkenliğin ne kadarının açıklandığını değerlendirmek için regresyon analizi kullanılmıştır. Biyokütle enerji göstergeleri bir korelasyon analizine tabi tutulmuştur. Yukarıdaki analizler, $P = 0.05$ değerlerindeki istatistiksel yazılım paketi StatsDirect (V2.7.2, StatsDirect, Ltd., Altrincham, Cheshire, İngiltere) içinde gerçekleştirilmiştir.

3.12. Akış diyagramı

Tek başına yakıldığında pek çok yanma probleminin olduğu tavuk altlığının yanabilirlik ve kül özelliklerini iyileştirmek için planlanan çalışmanın grafiksel özet gösterimi Şekil 3.9’de verilmiştir. Enerji bitkisi tatlı sorgum bagası ve PL pirolizinden elde edilen yeni bir yan ürün olan piroliz yağının (PO) birleştirilmesiyle PL'nin yanma özelliklerini, olası yanma ile ilgili zorluklarını ve külle ilgili sorunlarını iyileştirmek için basit, pratik bir yöntem olarak düşünülmüştür.



Şekil 3.9. Tavuk altlığının yanma özelliklerini ve kül depozit problemlerini iyileştirmek için birlikte yakma uygulamasının ve gerçekleştirilen analizlerin şematik gösterimi

4. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

4.1. Malzeme Özellikleri

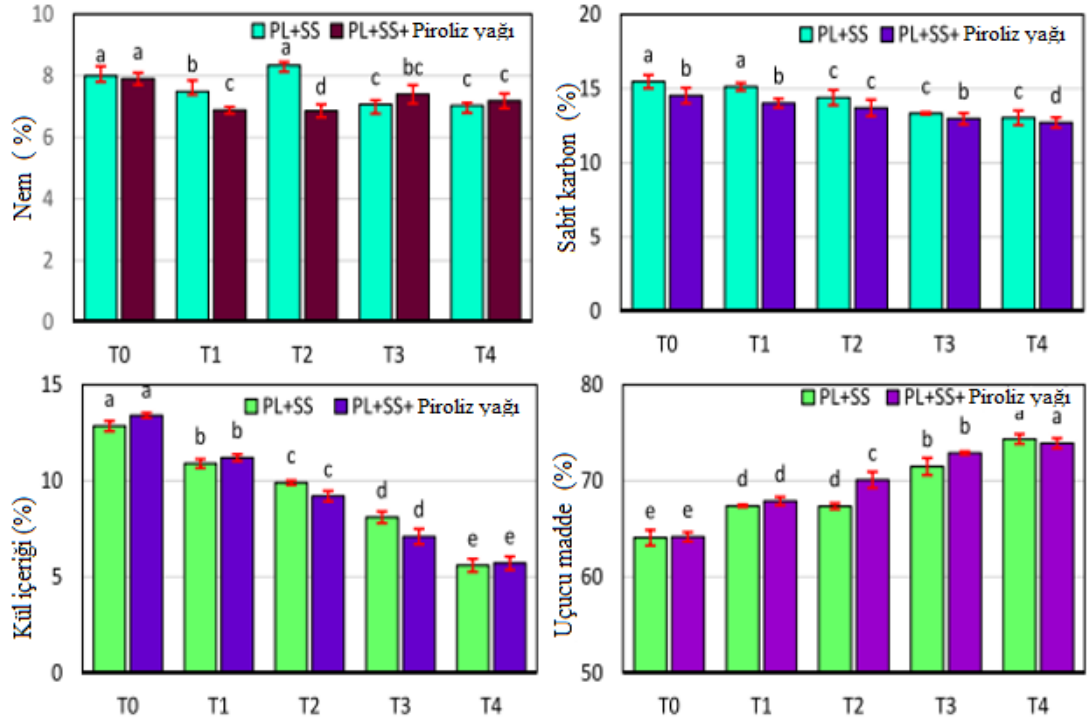
Proksimet analiz parametreleri, yani biyokütlerdeki nem miktarları, kül miktarları, uçucu madde tayinleri ve sabit karbon içerikleri; enerji içeriğini, enerji geri kazanım oranını ve biyokütlerin yanma için uygunluğunu belirleyen önemli bir faktördür. Hazırlanan karışımların nem içeriği, piroliz yağı ve SS'nin tavuk gübresine eklenmesiyle önemli ölçüde etkilenmiştir (Tablo 4.1). Piroliz yağı eklenmesi kül ve uçucu madde içeriğini anlamlı bir şekilde etkilemedi, ancak SS ve etkileşim etkisi önemliydi. SS bagasının nem içeriği %7,08 idi ve SS'nin PL'ye eklenmesi karışımların nemini önemli ölçüde azalttı. Bu nem konsantrasyonu, rapor edilen PL ve biyokütle-PL karışımı için bildirilen değerlerden (%10,00'den az olan ISO standartlarına uyuyor) çok daha düşüktür. Genellikle peletleme sürecinde nem içeriği azalır ve belirlenen nem içeriği sırasıyla 7,24% ve 7,58% idi. Aynı kompozisyonlar, PL ile karıştırılmış farklı türlerdeki enerji mahsulleri biyokütlesi ile yapılan diğer pelet çalışmalarında değerlendirilmiştir. PL'nin enerji içeriği, uçucu madde içeriğinin %64 olduğunu göstermektedir, bu da makul bir yanma özelliğini gösterir. SS'nin PL'ye eklenmesi, uçucu madde miktarını artırdı ve uçucu madde miktarı, %25 (T1), %50 (T2) ve %75 (T3) SS ilavesi ile sırasıyla %67, %68 ve %71,50 artmıştır. Piroliz yağı ilavesi daha sonra uçucu maddeyi sırasıyla %68, %70 ve %73'e çıkardı. Benzer şekilde, SS ve piroliz yağı, kuru madde bazında kül içeriğini %12,85'ten %7,10'a kadar azalttı, bu da yakma sırasında oluşan malzemelerin büyük bir kısmının, yanma sırasında oluşan külleme, erime ve birleşmeye tepki vermeyen ürünler olduğunu göstermektedir. Sabit karbon, SS ve piroliz yağı ilavesi ile %15,47'den %12,71'e düşürüldü. Bu, biyokütlerdeki daha düşük sabit karbon içeriğinin, biyokütle için daha düşük bir tutuşma sıcaklığı anlamına geldiğinden, termokimyasal açıdan önemlidir. Düşük nem miktarı, düşük kül içerikleri ve nispeten yüksek uçucu madde içeriği, tavuk gübresinin yanmasını olumlu yönde etkilediği ve yanma sırasındaki işlemi ve enerji dönüşümünü önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, etkin bir yanma işlemi için düşük kül ve nem içeriği ile yüksek uçucu madde içeriği önerilir. Şekil 4.1'de bu durum net olarak gözlemlenmektedir. Hem tatlı sorgum bagası hem de piroliz yağı eklenmesi,

PL peletlerinin kısa analiz parametrelerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Karışıma SS eklenmesiyle birlikte, peletlerin kül içeriği 13,40'tan 5,60'a kadar dereceli olarak azalırken, uçucu madde içeriği %64,07'den %74,35'e kadar artmıştır. Kül içeriğindeki azalma ve uçucu madde miktarındaki artış, enerji değerini artırabilir ve yanma performansını iyileştirebilir. Tavuk gübresi yanmasının ve biyoenerji geri kazanımının, SS gibi biyoenerji mahsulleri yan ürünleri ve gazlaştırma yan ürünü PO gibi yan ürünlerle kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Tutuşma endeksi, biyokütle partiküllerinin kazan koşullarında muhtemel performansını ölçmek amacıyla gösterge olarak kullanılır. Şekil 4.2 de biyoyakıt peletlerinde SS içeriğindeki değişimi ve piroliz yağı içermeyen veya içeren ateşleme endeksi değerlerini gösterir. PL'ye SS eklenmesi, peletin ateşleme endekslerini %25'lik bir karışımda kaydırdı ve karışımdaki SS'nin daha fazla artması ile neredeyse sabit kaldı (41,94-42,02). Benzer şekilde, PL'ye PO ilavesi; SS karışımlarının ateşleme indeksini anlamlı şekilde artırdı, ancak tüm tahmini ateşleme endeksi değerleri, kullanımda verimli bir şekilde kullanılabilir aralıkta olan 35'in üzerindedir, çünkü yüksek uçucu madde içeriği hızlı yanmayı ve daha fazla alevlenme yanmayı teşvik eder. Bu bağlamda, SS'nin yüksek uçucu madde içeriği, yüksek sıcaklıklardaki yaygın kül sorunlarından kaçınmak için düşük sıcaklıklarda hızlı tutuşmayı teşvik edici bir özellik sağlar.

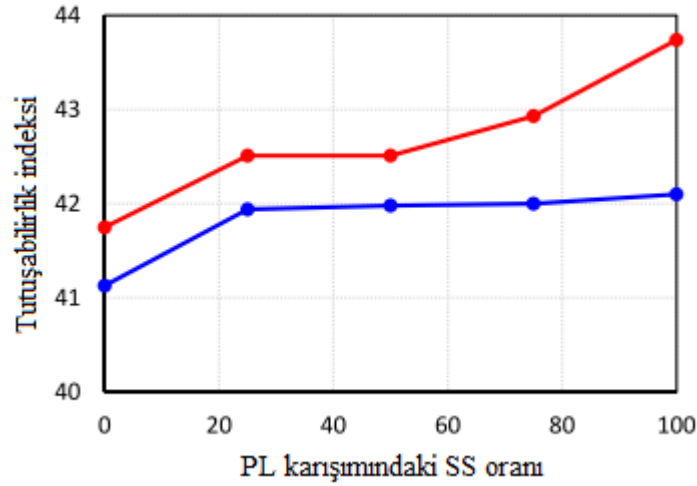
Tablo 4.1. Piroliz yağı (Faktör A) ve tatlı sorgum bagasıyla (Faktör B) harmanlanmış kümes hayvanı altlığının, yaklaşık analiz parametreleri üzerindeki etkisine yönelik varyans analizi (ortalama)

Kaynak	df	Nem	Uçucu madde	Kül içeriği	Sabit karbon	Isıl değeri	Tutuşma endeksi
Piroliz Yağı (A)	1	0.872	0.0376	0.0974	3.5308	25.696.1	0.7140
		***	ns	ns	***	***	***
Bagas (B)	4	0.753	48.107	46.947	4.9623	29.128.9	1.7743
		***	***	***	***	***	***
A × B	4	0.794	1.1423	0.978	0.1852	1728.7	0.6686
		***	***	***	ns	**	***
Artan	21	0.049	0.0566	0.07	0.1735	269.1	0.0833
Toplam	29						

ns, önemsiz ; *, **, ***, sırasıyla $P < 0.05$, 0.01 ve 0.001 önemli olasılık seviyeleridir



Şekil 4.1. Kümes hayvanı altlığına; piroliz yağı ve tatlı sorgum ilavesinin, nem, sabit karbon, kül ve uçucu madde içeriğine etkileri. Farklı harfler, Duncan'ın yeni çoklu aralık testine göre %5 düzeyinde önemli bir farklılığı belirtir.



Şekil 4.2. Kümes hayvanı altlığının tutuşabilirlik indeksi, tatlı sorgum bagası (mavi çizgi) ve %10 piroliz yağı (kırmızı çizgi) ile iyileştirilmesi

4.2. Elementel Birleşimler

Katı biyokütlelerin enerji potansiyeli, C, H, N, S ve O için kütleli katılımları içeren nihai enerji parametrelerinin analizi ile belirlenir. PL, SS ve PO'nun elementel analiz sonuçları Tablo 3.1'de tablolaştırılmıştır. Nihai analiz, genel olarak, PL ve SS'nin daha düşük C ve N içeriğine sahip olduğunu ancak PO'dan daha yüksek O içeriğine sahip

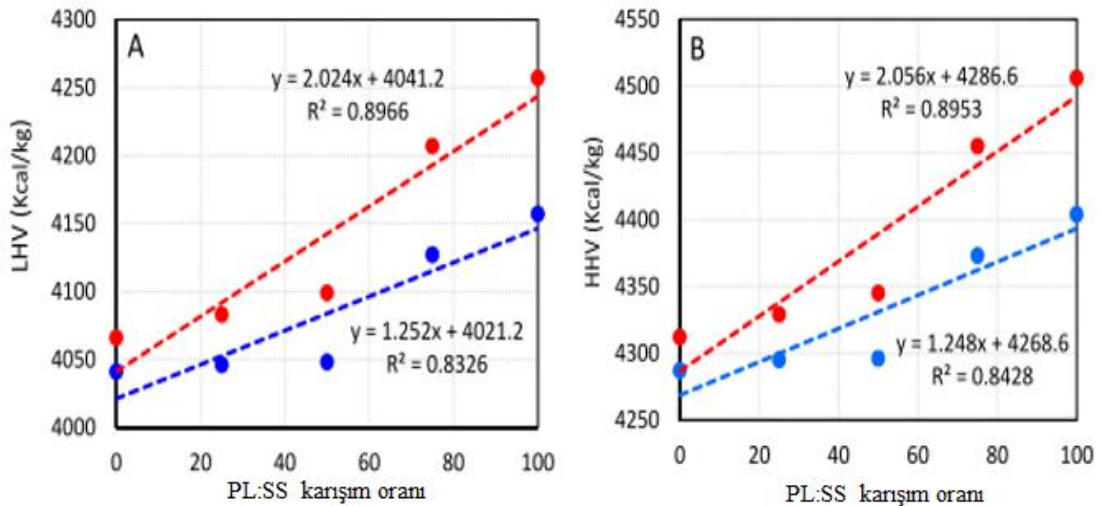
olduğunu göstermektedir. H ve S içerikleri karşılaştırılabilir düzeydedir. Yüksek C ve H içeriğine sahip ve düşük N ve O konsantrasyonuna sahip biyoküteller, daha düşük sıcaklık, daha kısa ateşlenme süresi gerektirir ve bu nedenle termokimyasal süreçler sırasında daha yüksek enerji verir ve bu da tercih edilir (Dalolio' ve ark, 2017; Anyaoha, 2022). Tablo 3.1'de sunulan elementel kompozisyonundan, PL ve SS'nin elementel kompozisyonunda anlamlı farklılıkların olmadığı, ancak N içeriklerinde PL'nin özellikle SS'ye kıyasla istisnai olarak daha yüksek N içeriğine sahip olduğu görülebilir. Ayrıca, PO'nun hem PL hem de SS'ye kıyasla önemli ölçüde daha fazla C, H ve N, ancak düşük O içeriğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Nihai analiz dışında, biyokütlenin inorganik bileşimi yanma performansını önemli ölçüde etkiler ve yanma sistemlerinde çeşitli yanma problemleri oluşturur (Kraszkievicz ve ark., 2017). PL'deki inorganik bileşenler genellikle daha fazla silika, potasyum ve fosfor gibi sorunlu mineral bileşenlere sahiptir, bu da daha çok alüminyum, demir ve kalsiyum gibi bileşenlere sahip olan bilinen kömüre kıyasla (Yurdakul ve ark., 2021). Tablo 3.1'den görülebileceği gibi, PL, SS ve PO'ya kıyasla çok daha yüksek K, P, Si, Na, Ca, S ve Cl içermektedir. Bir akışkan yataklı kazanda yanmayı düşündüğümüzde, tavuk dışkısının biyokütellerindeki küllemeden dolayı ortaya çıkan problemlerin indirgenmesi için optimal kül mineral bileşimi için ön işleme veya ortak yanma beslemesi düzenlenmesi gereklidir. PL'den üretilen piroliz yağı, PL'den önemli ölçüde daha düşük K, Mg, Al ve S konsantrasyonlarına sahiptir. Bu nedenle, SS ve PO, biyokütle peletlerinin enerji yoğunluğunu artırırken, sorunlu minerallerin içeriğini en aza indirmek için mineral bileşimini iyileştirmek için umut verici adaylardır

4.3. Kalorifik Değer

PL'nin tek başına yanması, yüksek nem ve kül içeriği ile düşük ısı değerlerinden dolayı bazı sorunlarla karşılaşır. Bu nedenle, lignoselülozik biyoküteller ve enerji açısından zengin piroliz yağı ile birlikte yanması, PL'nin enerjik değerini artırmasına yardımcı olabilir. Başlangıçta PL, SS ve PO için hammaddelerin ısısal değerleri önemli ölçüde farklıydı, 17.93 (PL) ile 34.39 (PO) MJ Kg⁻¹ arasında değişiyordu (Tablo 3.1). Şekil 4.3'de PL karışımlarına SS ve PO eklenmesi ile elde edilen LHV ve HHV seviyeleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Regresyon denklemleri, SS ve PO'nun PL karışımlarının enerjik özelliklerine etkisini tanımlamak için doğrulandı. Sonuçlar, PL:SS karışımında %10'luk daha yüksek oranda SS ve PO'nun daha yüksek bir kalorifik değere sahip olduğunu gösterdi. Şekil 4.3'ten, tavuk altlığı karışımındaki SS oranının

artmasıyla ısı içeriğinin arttığı görülmektedir. SS oranının %25'ten %100'e çıkarılmasıyla, HHV değerleri 4295 ± 12 kcal kg⁻¹'den 4404 ± 9 kcal kg⁻¹'e yükseldi (Şekil 3). R² (denklemler tarafından açıklanan toplam varyansın yüzdesi), 0.8326 ile 0.8966 arasında değişiyordu (Şekil 3). LHV ve HHV değerlerindeki artan eğilim, PL'nin görece yüksek nem ve kül minerallerine sahip olmasından kaynaklanabilir, bu da LHV'yi azaltır.

SS, düşük mineral oranına sahip ancak yüksek oranda uçucu madde içeren yapıdadır; bu yapı, yüksek oranda selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşur ve PL'den daha fazla depolanan biyokütle enerjisine sahiptir (Ozdemir ve Demir, 2021). Bu nedenle, PL'deki SS oranları ile ısı değerleri arasında pozitif regresyon çizgileri gözlemlendi. Ayrıca, yakıt karışımlarına %10 PO eklendiğinde PL: SS karışımlarının HHV değerleri 0.5–2.6 % aralığında daha da artmıştır. Biyokütelerin ısısal değeri, nem ve kül içeriği ile negatif korele olmasına rağmen uçucu madde miktarı ve sabit karbon içeriği ile pozitif korele olur (Maj, 2022). Belirlenen uçucu madde miktarı, sabit karbon içeriği, nem miktarı ve kül içerikleri konsantrasyonları, tavuk dışkısı için bildirilen çalışma değerleri aralığında Fahimi ve ark. (2022) ve karışıma lignoselülozik biyokütle eklenmesi, Ozdemir ve ark. (2018) 'in yapmış olduğu çalışmalara uygun olarak karışımların LHV ve HHV'sini artırır (Gutiérrez ve ark., 2020). Piroliz yağının biyokütle peletlerine olumlu katkısı, Riva ve ark. (2020) tarafından biochar termokimyasal deneysel testlerinde de rapor edilmiştir.



Şekil 4.3. Kümes hayvanı altlığının, tatlı sorgum bagası (mavi çizgi) ve %10 'luk piroliz yağı ile LHV (Düşük ısı) ve HHV (Yüksek ısı) değerlerinin artması

4.4. Flame Görüntü Analizi

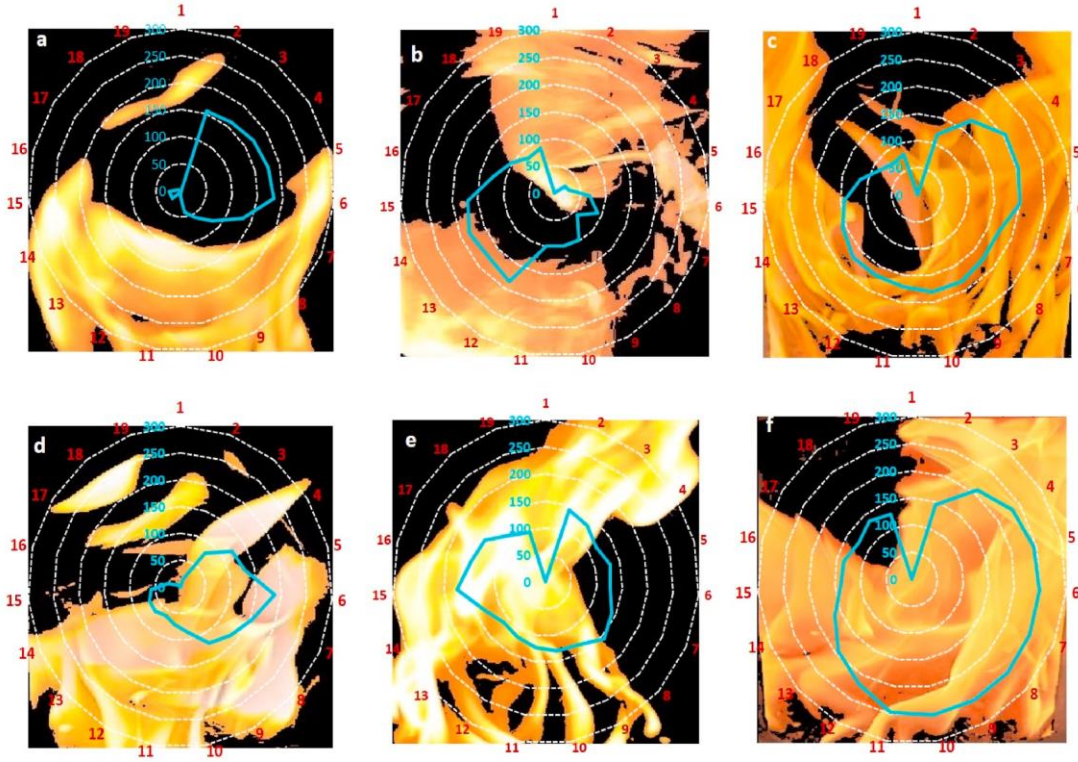
Saf kanatlı hayvan altlığı saf tatlı sorgum bagası ve bunların karışımına ait alev görüntü analizi bulguları Şekil 4.4 'te gösterilmiştir ve bu, piroliz yağından farklıdır. Alt satırda, saf tavuk gübresine, tatlı sorgum bagasına ve bunların %50 + %50 karışımına %10 piroliz yağı eklenmesine karşılık gelen yanma görüntüleri gösterilmektedir. Saf kanatlı hayvan altlığına kıyasla, karışımdaki tatlı sorgum bagası oranı arttıkça alev alanının boyutu, parlaklığı ve görüntülerin kırmızı renk yoğunluğu artmıştır. Alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu, biyokütle peletlerine piroliz yağı eklenmesiyle daha da artmıştır. Bu sonuçlar, tatlı sorgum bagasının ve piroliz yağının tavuk gübresi yanması üzerindeki daha güçlü etkilerini doğrulamaktadır. Tatlı sorgum bagası ve piroliz yağı için uçucu alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu saf tavuk gübresinden daha büyük ve daha kuvvetlidir. Tatlı sorgum bagasının tek başına ve piroliz yağı ile kombinasyon halinde tavuk gübresine kıyasla daha kısa tutuşma süresine sahip olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, hazırlanan peletlerin tutuşma gecikme süreleri saf tavuk gübresi, tatlı sorgum bagası ve %50 + %50 karışım için sırasıyla 75, 29 ve 38 sn'dir. Peletlere %10 piroliz yağı eklendiğinde, tutuşma gecikme süreleri sırasıyla 49, 28 ve 33 sn'ye kısalmıştır. Biyokütle yanması üzerine yapılan önceki çalışmalar, tutuşma gecikme süresinin doğrudan katı yakıtların uçucu madde içeriğiyle ilişkili olduğunu göstermiştir (Ozdemir ve ark., 2022). Mevcut çalışmada gözlemlenen tutuşma gecikme süresindeki değişiklikler, farklı karışım oranlarında tavuk gübresi, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağının uçucu madde içeriği ve bileşimine atfedilebilir. Bu bağlamda, tutuşma gecikme süresi tatlı sorgum bagası, piroliz yağı ve tatlı sorgum bagası + piroliz yağı ile karıştırıldığında sırasıyla %39, %56 ve %63 iyileşmiştir. Bu sonuçlar, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağı tarafından sağlanan daha fazla uçucu maddenin dehidrasyon, devolatilizasyon ve yanmaya olumlu katkı sağladığı olgusuyla tutarlıdır. Buna bağlı olarak, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, tatlı sorgum bagası ve piroliz yağı karışımında kırmızı renk yoğunluğu daha belirgin görünmekte ve bu, uçucu madde salımı, uçucu madde yanması ve kömürleşme süreçlerinin sürekli yanma sürecini göstermektedir. Tatlı sorgum bagası ve piroliz yağının birlikte yanmasında yüksek alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu, benzer bir çalışmada gözlemlenen tavuk gübresine kıyasla karbon açısından zengin biyokütlelerin yüksek yanma verimliliği ile açıklanabilir (Polesek-Karczewska ve ark., 2018).

Alev görüntü analizi, %50 oranında karıştırılan tavuk gübresi (PL), tatlı sorgum bagası (SS) ve piroliz yağı (PO) arasındaki sinerjik etkileri göstererek alev alanını ve kırmızı renk yoğunluğunu artırmaktadır (Şekil 4.4). PL: SS karışımlarındaki alevin ve kırmızı renk yoğunluğunun hızlı artışı, yukarıda tartışıldığı gibi, yanma sırasında SS tarafından katkıda bulunan uçucu maddelerin geniş ölçüde gaz çıkarmasından kaynaklanmaktadır. SS karışımlarındaki C, H ve lignoselülozik içeriğin saf PL peletlerine kıyasla daha yüksek seviyelerde olması, geniş alev alanı ve daha güçlü kırmızı renk yoğunluğunun bir nedeni olabilir. Biyokütlenin ana bileşenleri olan hemiselüloz, selüloz ve lignin ile C ve H içerikleri, tutuşma ve yanma davranışlarında önemli bir rol oynar; dolayısıyla alev alanı ve kırmızı renk yoğunluğu, SS ve PO'nun katkıda bulunduğu uçucu madde, C, H ve selüloz, hemiselüloz ve lignin arasındaki sinerjik etkilerle açıklanabilir. Wzorek ve ark. (2021) ve Yurdakul ve ark. (2021) de yanma sırasında tavuk gübresi de dahil olmak üzere hayvan gübresi ve lignoselülozik biyokütle arasında sinerjik etkiler gözlemlemişlerdir. Biyokütle kalıntılarının gaz çıkarmasının tavuk gübresinden daha erken gerçekleştiğini ve salınan biyokütle uçucularının yanmasının, tavuk gübresinin gaz çıkarmasını ve tutuşmasını teşvik etmek için ekstra ısı sağladığını açıklamışlardır. Tutuşabilirlik indeksi ile kırmızı renk yoğunluğu arasındaki güçlü korelasyon ($r = 0.87^{**}$) SS ve PO'nun tavuk gübresi yanma verimliliğine olan faydalarını desteklemektedir. Biyokütlerde selüloz, hemiselüloz ve lignin, tam yanmayı teşvik eden ve yanmamış hidrokarbonları azaltan daha yüksek bağlı oksijen içeriği sağlar (Anyaooha, 2022). Daha yüksek buharlaşma gizli ısı da yakıtın buharlaşmasını iyileştirir ve alev hacmi ve kırmızı renk yoğunluğu ile yansıyan yanma verimliliğini artırır.

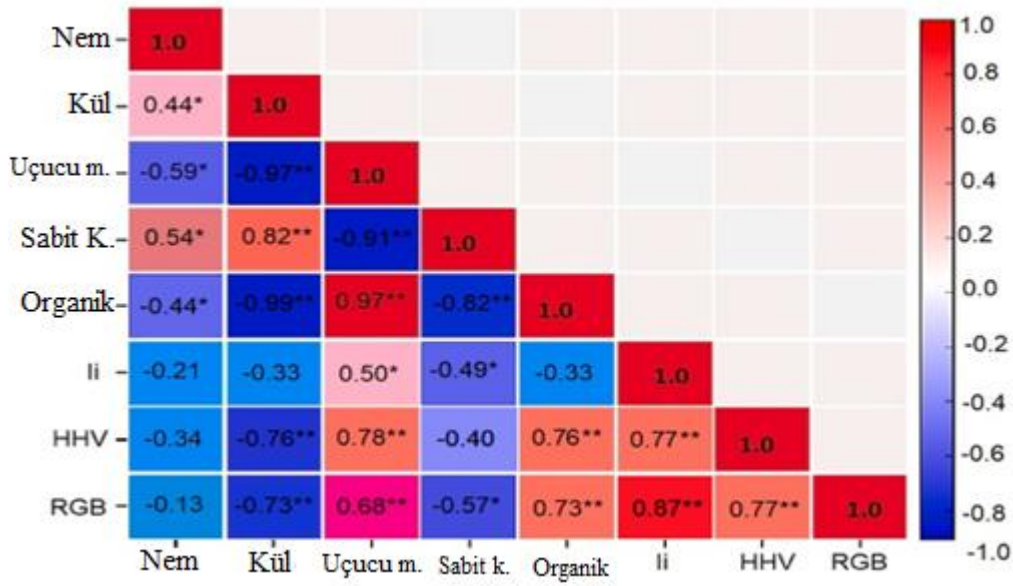
Alevin kırmızı renk yoğunluğu üzerindeki biyokütle yakıt parametrelerinin değişimini daha iyi anlamak için, hazırlanan biyoyakıt peletlerinden elde edilen proksimet kompozisyon parametreleri ve tutuşma indeksi değerleri kullanılarak Pearson korelasyonları yapıldı. Şekil 4.5, uçucu madde ve organik madde içeriğinin alevin kırmızı renk yoğunluğu üzerinde önemli olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Yüksek ısıl değer (HHV) ve tutuşabilirlik indeksi (Ii) de kırmızı renk yoğunluğunu olumlu etkilemektedir. Öte yandan, tavuk gübresinden kaynaklanan kül içeriği ve sabit karbon, kırmızı renk yoğunluğu üzerinde önemli olumsuz etkilere sahiptir.

Şekil 4.5'te incelenen parametreler açısından ilişki derecesi farklılık göstermektedir. Kül içeriği, uçucuların pozitif olduğu yüksek ısıl değer (HHV) ile negatif korelasyon

göstermektedir (Ozdemir ve Demir, 2021). Buna ek olarak, kül ve nem içeriği uçucu madde ile negatif korelasyon göstermektedir. Bulgular, katı biyoyakıtın bileşiminin yanma kalitesini önemli ölçüde etkilediğini daha fazla aydınlatmaktadır. Buna bağlı olarak, kırmızı renk yoğunluğunu ölçmek, tutuşabilirliği belirlemek için pratik bir tekniktir ve yakıt karışımının yanma kalitesini nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir. Bu nedenle, alev görüntüsünü analiz etmek için RGB yaklaşımını kullanmak, yanma kalitesini belirlemenin yararlı bir yolu olabilir.



Şekil 4.4. Pelet için görüntü analizi ve kırmızı renk yoğunluğu (a) PL (T0), b) SS (T4), c) PL:SS (T2), d) (T0+PO, e) T4+PO and, f) T2+PO.



Şekil 4.5. Proksimet kompozisyon parametreleri ile alevin kırmızı renk yoğunluğu arasındaki Pearson korelasyonu (**p < 0.01, *p < 0.05)

4.5. Kül Bileşimi ve İndeksleri

PL yanma külü, genellikle K, Ca, Na, Mg, HCO₃ ve CO₃ gibi ana kül bileşenlerinden kaynaklanan genel olarak alkalin doğası nedeniyle 9.5–13.5 aralığında bir pH'a sahipti, Bu durum, yanıcı üzerinde ve ısı değiştiricide kül tabakasının oluşmasına neden olabilir. Mevcut çalışmada, kül ile ilgili sorunları belirtmek için kül içeriğini azaltma veya tavuk gübresinin mineral bileşimini değiştirme endeks değerleri araştırılmıştır. (Tablo 4.2) . Şekil 4.6 da görülen literatürde önerilen çeşitli boru tıkanmaları (Şekil 4.6- a) yatak cüruf oluşumu (Şekil 4.6-b) tahmini indeksler ve kül depozitleri (Şekil 4.6 – c) , bu çalışmada kül ile ilgili sorunları göstermek için kullanılmıştır. Bunlar arasında, partikül emisyon indeksi, kül erime davranışı, biyokütle cüruf oluşumu indeksi, tıkanma indeksi ve birleşme indeksi gibi indeksler bulunmaktadır.

PL külü, Na, K, S veya Cl gibi düşük erime noktasına sahip elementlerin baskın bileşenlerini içermektedir. Ayrıca, mineraller, silis dioksit (SiO₂) ve kükürt (S) arasındaki reaksiyonu oluşturan K ve Ca gibi yüksek oranda içeriklere sahiptir. Bu reaksiyon, alkali silikat ve alkali sülfatların oluşumuna neden olarak yanıcılar üzerinde kül birikimlerine yol açabilir ve yanma hızlarını ve kirletici emisyonlarını etkileyebilir. SS, PL'ye kıyasla daha düşük kül, potasyum ve fosfor içeriğine sahiptir. Ayrıca, piroliz yağı küçük miktarlarda kül ve mineral element içermektedir, bu da daha düşük bir kül içeriğine neden olmaktadır.

Yüksek sıcaklık genellikle kül materyalinin gaz fazına dönüşümünü ve dolayısıyla inorganik partikül emisyonunu artırır. Yakıtta K, Na, Zn ve Pb'nin artan toplamı, yanma sırasında uçucu kül oluşturan emisyonları oluşturur ve bu kül oluşturan gazlar değişim tüplerinde nükleasyon veya yoğunlaşmaya başlar. Bu çalışmada, test edilen tüm yakıt peletlerinin indeks değerleri >10.000'den fazla olup, yüksek potansiyele sahip aerosol emisyonunu göstermektedir. PL, SS'den daha fazla K ve Na içerdiği için, PL: SS kombinasyonunda aerosol emisyon potansiyelini azaltır. Ancak, SS ve PO'nun PL'ye eklenmesi, indeks değerlerini istenilen <1000 aralığının altına indirmedir (Tablo 4.2). İndeks formülünden açıkça görüleceği gibi, Ca, Si ve P'nin gaz fazına K salınımını etkilediği açıktır. Bu nedenle, iyi tanımlanmış bir Ca, Si ve K karışımı, aerosol oluşumunu hafifletebilir.

Biyokütle örneklerinin kül erime davranışı, $(Si + P + K) / (Ca + Mg)$ molar oranı ile belirlenir. Genellikle, Si'nin K ve P ile birlikte bulunması külün erime sıcaklığını düşürdüğü varsayılır. Bununla birlikte, Ca ve Mg konsantrasyonu arttığında tam tersi gözlenir (Kraszkievicz ve ark., 2017). Bu indekse dayanarak, erime sıcaklıkları artan indeks değerleri ile azalır. PL, SS ve PL: SS için indeksler sırasıyla 2,36, 1,54 ve 1,86 (mol/mol) yüksek değerlere sahip olduğundan, düşük kül erime sıcaklıklarının beklenmesi gerekir. Kül erime analizi sonuçları, PL için DT 1116, ST 1128, HT 1133 ve FT 1165 °C değerlerini gösterdi. Benzer şekilde, SS için belirlenen erime sıcaklığı DT 1136, ST 1157, HT 1173 ve FT 1243 °C idi.

Biyokütle külünde bulunan K₂O ve Na₂O gibi düşük erime mineralleri, yanma sırasında buharlaşarak eriyik bileşikler oluşturur ve cüruf oluşumuna ve tıkanmaya neden olur (Garcia-Maraver ve ark., 2017). PL, cüruflenme endeksi açısından en yüksek değere (FI <40) sahipti ve külde potasyum, sodyum ve fosforun bulunması nedeniyle aşırı yüksek olarak sınıflandırıldı. Diğer yandan, SS'nin endeks değeri orta aralıktaydı (FI 0,6–40). Dolayısıyla, PL: SS karışımının FI sonuçları, endeks değerini azalttı. Ancak ne SS ne de PO karışımı, düşük bir kül tıkanma eğilimini karşılamadı (Tablo 4.2). Bu bulgu, tavuk gübresinin cüruflenme veya tıkanma açısından daha duyarlı olduğunu öne süren önceki sonuçlarla uyumludur.

PL ve SS'nin her ikisinde de yüksek bir K konsantrasyonunun bulunması, karışımların birleşme eğilimini arttırmıştır. Bunun kısmen, erime K'nin yüksek sıcaklıklarda 600-1000 °C'nin üzerinde yanması ve SiO₂ ve K₂O'nun oluşumuyla ilgili olduğu, bu

bileşenlerin cürufun hâkim kısmını oluşturduğu ve yatak birleşiminde silikat ve alkali sülfatların oluşumunu teşvik ettiği düşünülmektedir.

PL ile SS veya PO'nun karışımları kül miktarını önemli ölçüde azaltmıştır; ancak, ana bitki besinlerinin mineral bileşiminde çok az değişiklik olmuştur. Tarımda kül kullanımı, bitki besinlerini ürün üretim döngüsü sırasında sorumlu bir şekilde geri kazanmanın bir yolu olabilir ve bu da Avrupa Birliği'nin döngüsel ekonomi Eylem Planı ile uyumlu bir şekilde atık malzemelerin gübre olarak kullanımını teşvik etmektedir.

Tablo 4.3. Kümes hayvanı altlığının (PL) curuflaşma ve kül birikme indeksi ve bunların tatlı sorgumu bagası (SS) ve piroliz yağıyla (PO) kombinasyonları

Uygulama	PEI	AMB	BSI	FI	BAI
Pl (T ₀)	43515	2.36	0.31	296.91	0.03
SS (T ₄)	26410	1.54	0.43	22.14	0.05
PL:SS 50% (T ₂)	33264	1.86	0.38	157.43	0.04
T ₀ +PO 10%	41428	2.31	0.32	283.56	0.03
T ₄ +PO 10%	24562	1.52	0.43	22.02	0.05
T ₂ +PO 10%	31756	1.85	0.38	151.84	0.05
İstenen değer	>1000	<0.6	>0.72	<0.6	>0.15

Partikül emisyon indeksi (PEI), kül ergime davranışı (AMB), biyokütle curuflaşma indeksi (BSI), gaz yolu tıkanma indeksi (FI), ve yatak curuflaşma indeksi (BAI)



a



b



c

Şekil 4.6. Biyokütle enerji santrallerinde kütle ilgili sorunlar

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Küresel tavuk eti endüstrisi büyüdükçe, tavuk üretim tesisleri önemli miktarda dışkı atığı üretmektedir. Yoğun kümes hayvanı üretiminin yapıldığı bölgeler ve hayvan sayısının yüksek olduğu kümeslerde, tavuk altlığı atıklarının uygun olmayan şekilde depolanması ve bertaraf edilmesi, hava ve su kirliliğinin yanı sıra sağlık açısından da risk oluşturmaktadır. Kümes atıkları, zoonotik kuş gribi gibi insan ve hayvan enfeksiyonlarını içerebilir. Bu nedenle kanatlı gübresinin hijyen koşulları altında yönetilmesi ve bertaraf edilmesi gerekir. Bu bağlamda, atığın doğrudan elektrik üretmek için biyokütle santrallerinde yakılması hızlı bir bertaraf imkânı sunar. Ancak, tavuk altlığının mono yakılması, yapısal, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı pek çok problem oluşturmaktadır. Geleneksel yakma santrallerinde yanma sıcaklığı genellikle 850 °C'nin üzerindedir. Yaklaşık 600- 800 °C arasında bazı erime eğilimli minerallerin varlığı nedeniyle küller yapışkan hale gelir. Genel olarak ve biyokütlenin kimyasal yapısına bağlı olarak, yanma sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, refrakter fırın, eşanjör ve sonraki soğutma ünitelerinin yüzeylerinde toz birikimi, cüruflaşma ve yatak taşlaşması hasarı riskini artırır.

Tavuk gübresinin alev alması zordur, yanma için yüksek sıcaklık gerekir, fakat erime eğilimli minerallerin yüksek olması kül yapışma problemlerine neden olur. Bu nedenle yanmadan önce, yakıt hammaddesinin yapısal ve bileşimsel engelleri, yakıtın özelliklerinin veya külün bileşiminin değiştirilmesi yoluyla ortadan kaldırılmalıdır. Bu çalışma, tavuk gübresinin yanmasını kolaylaştırmak, enerji değerini yükseltmek ve kül ile ilgili problemleri azaltmak için tatlı sorgum bagası ve tavuk gübresinden elde edilen piroliz yağını önermektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, tatlı sorgum biyokütlesinin %25'ten %75'e çıkarılmasıyla tavuk altlığı karışımlarındaki C, H, sabit karbon, uçucu madde ve ısı değerlerinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Ayrıca, kül ve nem içeriği azalmıştır. Peletlere %10 piroliz yağı eklemesi biyoyakıt yaklaşık ve elementel analiz parametrelerini daha da iyileştirmiştir.

Alev özellikleri ve RGB renk yoğunluğu sonuçlarının imaj analizi, alev boyutunu ve kırmızı renk yoğunluğunu biyokütle yanma davranışını başarılı bir şekilde ayırt

ettiğini göstermektedir. Tatlı sorgum ve piroliz yağının biyoyakıt karışımlarına orantılı olarak eklenmesi, biyoyakıt peletlerinin kalorifik değerini yükseltmiş, alev özelliklerini ve kırmızı renk yoğunluğunu önemli ölçüde iyileştirmiştir. Tavuk altlığına tatlı sorgum eklenmesi uçucu madde artışı, kalorifik değer artışı ve kül oranının azalışına paralel olarak alevlenme indeksini %25 oranında iyileştirmiş, piroliz yağı ilavesi ise tutuşabilirlik indeksini ilave olarak %7 oranında iyileştirmiştir. Alevlenme indeksi ile kırmızı renk yoğunluğu ($r= 0,87^{**}$) arasındaki güçlü korelasyon, tatlı sorgum ve piroliz yağı, tavuk altlığının yanma verimliliğine olan pozitif katkısını desteklemiştir. Öte yandan, tatlı sorgum ve piroliz yağı biyoyakıtların kül içeriğini önemli ölçüde azaltmasına rağmen, kül bileşimi ve kül özellikleri üzerindeki sinerjik etkileri sınırlı kalmış ve hesaplanan indeks değerleri istenen aralıklara uygun bulunmamıştır. Yaklaşık ve elementel kompozisyonun, kül indekslerinin ve alev görüntü analizinin bulguları dikkate alındığında, başarılı yanmanın en iyi oranının sırasıyla 45:45:10 PL: SS:PO olduğu bulunmuştur.

Tavuk atığı, Kyoto Protokolü ve AB'nin biyokütleyi enerji amaçları için kullanımıyla ilgili politikası tarafından tanımlandığı gibi temiz enerji üretme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, tatlı sorgum bagası ve biyokütle piroliz tesislerinde ortaya çıkan yan ürün piroliz yağının, tavuk altlığı için birlikte yanma adayı olarak yenilenebilir enerji potansiyeli göstermektedir. Ancak, tavuk altlığının biyokütle santrallerinde problemsiz yakma için uygun yönetim yolları bulmak ve kül indeks değerlerini daha iyi noktalara getirebilmek, bunlardan dolayı oluşacak sorunlara kalıcı yöntemler bulabilmek amacıyla daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- Albrecht, B., Zahirovic, S., Bastiaans, R., van Oijen, Jeroen, Goey, Philip. (2008). A Premixed Flamelet–PDF Model for Biomass Combustion in a Grate Furnace. *Energy & Fuels - ENERG FUEL*. 22. 10.1021/ef7007562.
- Alma, M. H. (2022). TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu. Ankara, Türkiye, TÜBA Raporları, 46.
- Anyaocha, K.E. (2022). Synergistic perspective on biomass co-utilization in thermo chemical processes. *Bioresour. Technol. Rep.* 101043 <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101043>.
- Atimtay, A., Yurdakul, S. (2020). Combustion and co-combustion characteristics of torrefied poultry litter with lignite. *Renew. Energy* 148, 1292–1301. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.068>.
- Avcıoğlu A.O., Dayıoğlu M.A, Türker U. (2019) Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renew Energy* 138:610 619. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053>
- Aydan Aksoğan Korkmaz (2022). Farklı linyitlerin kısa ve elementel analiz verilerine dayanarak üst ısıl değerlerinin hesaplanması. *KONJES*, c. 10, sy. 1, ss. 49–60, doi: 10.36306/konjes.869637.
- Billen, P., Creemers, B., Costa, J., Caneghem, J., Vandecasteele, C. (2014). Coating and melt induced agglomeration in a poultry litter fired fluidized bed combustor. *Biomass and Bioenergy*. 69, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.07.013>.
- Boylu, F., Karağaçlıoğlu, İ. E. (2018). Kömür Bileşenlerinin Kalorifik Değer Üzerindeki Etkisi Üzerine Değerlendirme. *Yerbilimleri/Earth Sciences*, 39(3), 221-236. <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.503930>
- Chastain, J.P., Coloma-del Valle, A., Moore, K.P. (2012). Using broiler litter as an energy source: energy content and ash composition. *Appl. Eng. Agric.* 28 (4), 513–522. <https://doi.org/10.13031/2013.42081>.
- Choudhury, A., Felton, G., Moyle, J., Lansing, S. (2020). Fluidized bed combustion of poultry litter at farm-scale: environmental impacts using a life cycle approach. *J. Clean. Prod.* 276, 124231 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124231>.
- Dalolio, F.S., da Silva, J.N., de Oliveira, A.C.C., Tinoco, I.D.F.F., Barbosa, R.C., de Oliveira Resende, M., Albino, L.F.T., Coelho, S.T. (2017). Poultry litter as biomass energy: a review and future perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 941–949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.104>.
- Dede, Ö. H., Dede, G., Dede, C., Özdemir, S. (2018). Hayvansal atıklardan biyogaz üretimi için küçük ölçekli reaktör modeli geliştirilmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 8(1), 138-146.

- de Holanda Pasolini, V., Lima, R. M., Costa, A. B. S., de Sousa, R. C. (2023). Drying of poultry manure for biomass applications in the combustion. *Biomass Conv Bioref.* 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04001-6>
- Fahimi, A., Bontempi, E., Fiameni, L., Guedes, A., Guimaraes, R., Moreira, K., Santos, A. C., Valentim, B., Predeanu, G., Balanescu, M., Olgun, H., Boiron, M.C., Cathelineau, M. (2022). Incineration of aviary manure: the case studies of poultry litter and laying hens manure. *Waste Biomass Valor* 13 (7), 3335–3357. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01739-4>.
- Gajera, B., Datta, A., Gakkhar, N., Sarma, A. (2023). Torrefied mustard straw as a potential solid biofuel: a study with physicochemical characterization, thermogravimetric and emission analysis. *Bioenerg. Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10600-y>.
- Garcia-Maraver, A., Mata-Sanchez, J., Carpio, M., Perez-Jimenez, J.A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *J. Energy Inst.* 90 (2), 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.002>.
- Gržinić, G., Piotrowicz-Cieślak, A., Klimkowicz-Pawlas, A., Górný, R. L., Ławniczek-Wałczyk, A., Piechowicz, L., Wolska, L. (2023). Intensive poultry farming: A review of the impact on the environment and human health. *Sci. Total Environ.* 858, 160014 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160014>.
- Guler, D., Charisoulis, G., Battenfield, B.P. (2021). Suitability modeling and sensitivity analysis for biomass energy facilities in Turkey. *Clean Techn Environ Policy* 23, 2183–2199. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02126-8>
- Gürel, B., Kurtuluş, K., Yurdakul, S., Karaca Dolgun, G., Akman, R., Önür, M. E., Varol, M. (2024). Combustion of chicken manure and Turkish lignite mixtures in a circulating fluidized bed. *Renew Sustain Energy Reviews*, cilt.189.
- Gutiérrez, A.S., Eras, J.J.C., Hens, L., Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *J. Clean. Prod.* 269, 122317 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>.
- Guyon, P., Graham, B., Beck, J., Boucher, O., Gerasopoulos, E., Mayol-Bracero, O. L., Roberts, G. C., Artaxo, P., and Andreae, M. O. (2003) Physical properties and concentration of aerosol particles over the Amazon tropical forest during background and biomass burning conditions, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 951–967.
- Kaknics, J., Michel, R., Richard, A., Poirier, J. (2015). High-temperature interactions between molten miscanthus ashes and bed materials in a fluidized-bed gasifier. *Energy & Fuels.* 29. 150215142400006.
- Kantarli, I.C., Kabadayi, A., Ucar, S., Yanik, J. (2016). Conversion of poultry wastes into energy feedstocks. *Waste Manage. (Tucson, Ariz.)* 56, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.019>.
- Katsaros, G., Sommersacher, P., Retschitzegger, S., Kienzl, N., Tassou, S. A., Pandey, D. S. (2021). Combustion of poultry litter and mixture of poultry litter with woodchips in a fixed bed lab-scale batch reactor. *Fuel*, 286, 119310.

- Kraszkiewicz, A., Kachel-Jakubowska, M., Niedziołka, I. (2017). The chemical composition of ash from the plant biomass in terms of indicators to assess slagging and pollution of surface heating equipment. *Fresenius Environ. Bull.* 26 (11), 6383–6389.
- Kumar, P., Subbarao, P.M.V., Kala, L., Vijay, V.K. (2022). Influence of physical, mechanical, and thermal properties of biomass pellets from agriculture residue: pearl millet cob and mix. *Bioresour. Technol. Rep.* 20, 101278 <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101278>.
- Kumaş, K., Akyüz, A. Ö. (2020). Analysis of pollution load originating from cattle, small ruminant and poultry: A comparative case study for Isparta, Turkey. *Int J Energy Applications and Technologies.* 7(3), 50-53.
- Lamichhane, G., Acharya, A., Poudel, D. K., Aryal, B., Gyawali, N., Niraula, P., Parajuli, N. (2021). Recent advances in bioethanol production from Lignocellulosic biomass. *International Journal of Green Energy*, 18(7), 731–744. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1880910>
- Li, J., Paul, M.C., Younger, P.L., Watson, I., Hossain, M., Welch, S. (2016). Prediction of high-temperature rapid combustion behaviour of woody biomass particles. *Fuel* 165, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.061>.
- Lynch, D., Henihan, A.M., Bowen, B., Lynch, D., McDonnell, K., Kwapinski, W., Leahy, J. J. (2013). Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. *Biomass Bioenergy* 49, 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.009>.
- Maj, I. (2022). Significance and challenges of poultry litter and cattle manure as sustainable fuels: a review. *Energies* 15 (23), 8981. <https://doi.org/10.3390/en15238981>.
- Maj, I., Kalisz, S., Ciukaj, S. (2022). Properties of animal-origin ash-A valuable material for circular economy. *Energies*, 15(4), 1274. <https://doi.org/10.3390/en15041274>
- Melikoglu M, Menekse Z.K. (2020). Forecasting Turkey’s cattle and sheep manure based biomethane potentials till 2026. *Biomass Bioenerg.* 132:105440. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105440>
- Nebati, E. E., Taş, M., Ertaş, G. (2021). Türkiye’de elektrik tüketiminde talep tahmini: zaman serisi ve regresyon analizi ile karşılaştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 348-357.
- Rico-Contreras, J. O., Aguilar-Lasserre, A. A., Méndez-Contreras, J. M., López-Andrés, J. J., Cid-Chama, G. (2017). Moisture content prediction in poultry litter using artificial intelligence techniques and Monte Carlo simulation to determine the economic yield from energy use. *Journal of Environmental Management*, 202, 254-267., <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.034>.
- Onenc, S., Retschitzegger, S., Evic, N., Kienzl, N., Yanik, J. (2018). Characteristics and synergistic effects of co-combustion of carbonaceous wastes with coal. *Waste Manag.* 71, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.009>.
- Ozdemir, S., Sezer, B. (2013). Utilization of poultry litter as organic fertilizer or bio-fuel. *J Poult Res.* 10, 20–24.

- Özdemir, S., Er A. (2018). Tavuk gübresi ve tarımsal atıkların biyoyakıt karakterlerinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (2), 489-494,
- Ozdemir, S., Dede, O.H., Inan, M., Turp, S.M. (2018). Effects of sewage sludge on energy content and combustion emissions of energy crops. *Int. J. Agric. Biol.* 20 (7), 1575–1580. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0671>.
- Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K. (2020). A mini literature review on sustainable management of poultry abattoir wastes. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 22 (1), 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00934-1>.
- Ozdemir, S., Demir, M.S. (2021). Biofuel characteristics and combustion emissions of poultry litter and lignocellulosic biomass. *Environ. Prog. Sustain. Energy*, e13555. <https://doi.org/10.1002/ep.13555>.
- Ozdemir, S., Şimşek A., Ozdemir, S., Dede, C. (2022). Investigation of poultry slaughterhouse waste stream to produce bio-fuel for internal utilization. *Renew. Energy* 190, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.113>.
- Parlak, N., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K., Bahramian, M. (2021). Mathematical modeling of thin-layer solar drying of poultry abattoir sludge. *International Journal of Environmental Research*, 15, 177-190.
- Pehlivan, U., Ozdemir, S., Ozer, H., Dede, O. H. (2024). Fuel properties and incineration behavior of poultry litter blended with sweet sorghum bagasse and pyrolysis oil. *J Environ Manage.* 357, 120844.
- Polesek-Karczewska, S., Turzyński, T., Kardaś, D. (2018). Front velocity in the combustion of blends of poultry litter with straw. *Fuel Process. Technol.* 176, 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.03.040>.
- Prabakaran, R., Valavan, S.E. (2021). Wealth from poultry waste: an overview. *World's Poult. Sci. J.* 77 (2), 389–401. <https://doi.org/10.1080/00439339.2021.1901557>.
- PwC Türkiye (Mart 2021). Biyokütle ve Biyoenerji Sektörlerine Genel Bakış. <https://www.pwc.com.tr/tr/sectorler/enerji/biyokutle-ve-biyoenerji-sektorlerine-genel-bakis-web.pdf>
- Rahman, M., Hassan, A., Hossain, I., Rahman Jahangir, M.M., Chowdhury, E.H., Parvin, R., 2022. Current state of poultry waste management practices in Bangladesh, environmental concerns, and future recommendations. *J Adv Vet Anim Res.* 9 (3), 490–500. <https://doi.org/10.5455/javar.2022.i618>.
- Resmi Gazete, 2005. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun. Sayı: 25819.
- Riva, L., Cardarelli, A., Andersen, G.J., Buø, T.V., Barbanera, M., Bartocci, P., Fantozzi, F., Nielsen, H.K. (2020). On the self-heating behavior of upgraded biochar pellets blended with pyrolysis oil: effects of process parameters. *Fuel* 278, 118395. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118395>.
- Sari, O.F., Ozdemir, S., Celebi, A. (2016). Utilization and management of poultry slaughterhouse wastes with new methods. In: *Eurasia 2016 Waste Management Symposium*. 02–04 May 2016, Istanbul, Turkey.

- Taşar, Ş. (2021). Biyokütle kaynaklarının proximate bileşimleri ile üst ısı değerleri arasında yeni bir denklem geliştirilmesi ve denklemin başarısının araştırılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 22(1), 42-51. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.744752>
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey, *Renewable Energy*. 107, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>.
- Toptas, A., Yildirim, Y., Duman, G., Yanik, J. (2015). Combustion behavior of different kinds of torrefied biomass and their blends with lignite. *Bioresour. Technol.* 177, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.072>.
- Turp, G.A., Turp, S.M., Ozdemir, S., Yetilmezsoy, K. (2021). Vermicomposting of biomass ash with bio-waste for solubilizing nutrients and its effect on nitrogen fixation in common beans. *Environ. Technol. Innov.* 23, 101691 <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101691>.
- Turp, G.A., Celebi, A., Ozdemir, S. (2023). Enhancing energy potential of sweet sorghum by biomass ash compost in the context of climate change and agroecosystem. *Ind. Crop. Prod.* 199, 116776 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116776>.
- Turzyński, T., Kluska, J., Kardaś, D. (2022). Study on chicken manure combustion and heat production in terms of thermal self-sufficiency of a poultry farm. *Renew. Energy* 191, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.034>.
- Vasan, A. M., Prasanna, N., Gopalakrishnan, V. (2015). CFD analysis of multiphase transient flow in a CFB riser. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(85), 580-588.
- Wzorek, M., Junga, R., Yilmaz, E., Niemiec, P. (2021). Combustion behavior and mechanical properties of pellets derived from blends of animal manure and lignocellulosic biomass. *J. Environ. Manag.* 290, 112487 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112487>.
- Yurdakul, S., Gürel, B., Varol, M., Gürbüz, H., Kurtulus, K. (2021). Investigation on thermal degradation kinetics and mechanisms of chicken manure, lignite, and their blends by TGA. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 63894–63904. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12732-0>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ümit PEHLİVAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012 , İstanbul Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi , Jeoloji Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM

- 2012 ve 2018 yılları arasında çeşitli madencilik firmalarında endüstriyel ve değerli maden aramacılığı faaliyetleri üzerine mühendis olarak çalıştı. 2018 yılından itibaren ise Sakarya'da bulunan biyokütle ve kümes hayvanı altlığı yakıtı ile elektrik üretimi sağlayan bir enerji santralinde şube müdürü olarak görevine devam etmektedir.

TEZDEN ÜRETİLEN ESERLER:

- “Fuel properties and incineration behavior of poultry litter blended with sweet sorghum bagasse and pyrolysis oil”
- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120844>
- Umit Pehlivan, Saim Ozdemir, Hasan Ozer, Omer Hulusi Dede,
- Fuel properties and incineration behavior of poultry litter blended with sweet sorghum bagasse and pyrolysis oil,
- Journal of Environmental Management 04.04.2024