

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TAVUK GÜBRESİ VE LİNYİT KARIŞIMLARININ AKIŞKAN
YATAKLI BİR KAZANDA YAKILMASI SİRASINDA OLUŞAN
EMİSYONLAR**

Hasip Turan ORUÇ

**Danışman
Prof. Dr. Sema YURDAKUL**

**II. Danışman
Doç. Dr. Barış GÜREL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2024**



© 2024 [Hasip Turan ORUÇ]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tavuk Gübresinin Türkiye’deki Miktarı	2
1.2. Çalışmanın Amacı.....	3
1.3. Neden Biyokütle Kullanılmalı?	3
1.4. Biyokütle Nedir?.....	4
1.5. Biyokütle Kaynakları	4
1.5.1. Tarımsal Ürünler.....	5
1.5.2. Tarımsal Kalıntılar.....	6
1.5.3. Hayvansal Atıklar	6
1.5.4. Siyah Çözelti.....	6
1.5.5. Şeker Endüstrisi Atıkları	7
1.5.6. Orman Endüstrisi Atıkları	7
1.5.7. Endüstriyel Atıklar	7
1.5.8. Belediye Katı Atıkları (Kentsel Katı Atıklar)	8
1.5.9. Kanalizasyon Çamuru.....	8
2. BİYOKÜTLE TERMOKİMYASAL DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ.....	9
2.1. Yakma	11
2.1.1. Kazık Brülörleri	12
2.1.2. Stoker Yakıtlı Kazanlar	12
2.1.3. Süspansiyonlu Kazanlar	12
2.1.4. Akışkan Yataklı Kazanlar (AYK)	12
2.2. Gazlaştırma.....	13
2.3. Piroлиз.....	14
2.4. Diğer İşlemler	15
3. BİYOKÜTLE BİYOKİMYASAL DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ.....	16
3.1. Fermantasyon.....	16
3.2. Anaerobik Çürütme	16
3.3. Mekanik Ekstraksiyon.....	17
4. MATERYAL VE YÖNTEM	18
4.1. Kullanılan Malzemeler	19
4.2. Materyal.....	19
4.3. Orijinal DAYK'nın Tasarımı Ve Kompakt Yanma Odasının Üretimi	20
4.4. Deneysel Test Tesisi.....	23
5. ELDE EDİLEN SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	27
5.1. Yakıt karışımlarının yanmasından kaynaklanan baca gazındaki emisyonlar	27
5.1.1. Baca gazındaki CO emisyonları	27
5.1.2. Baca gazındaki NO _x emisyonları	30

5.1.3. Baca gazındaki CO ₂ emisyonları.....	33
5.1.4. Baca gazındaki SO ₂ emisyonları.....	35
5.2. Pratik Çıkarımlar ve Sınırlamalar.....	38
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	41
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	48



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BIYOKÜTLENİN AKIŞKAN YATAKTA YAKILMASI SIRASINDA OLUŞAN EMİSYONLAR

Hasip Turan ORUÇ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sema YURDAKUL
II. Danışman: Doç. Dr. Barış GÜREL

Bu çalışmada, kümes hayvancılığı sonucu oluşan tavuk gübresinin (TG)'nin bertarafı için bir dolaşımli akışkan yataklı kazan sistemi tasarlanmış, imal edilmiş ve test edilmiştir. Fazla hava oranının ve yakıt karışımındaki TG oranının yanma verimliliği ve baca gazı emisyonları üzerindeki etkisini belirlemek için sistemde TG ve Kale Linyitinin (L) ayrı ayrı yanma ve birlikte yanma testleri gerçekleştirilmiştir. Karışımındaki TG payı arttıkça, yanma verimi %86'dan %95'e yükselmiştir. CO emisyonları artarken, SO₂ ve NO_x emisyonlarının TG oranına bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. CO emisyonları %100L için 726 ila 2241 mg/Nm³ arasında ve %100TG için 838 ila 2450 mg/Nm³ arasında değişmiştir. NO_x emisyonları %100TG için 177,5 ile 240 mg/Nm³ arasında değişirken, %100L için 276,3 mg/Nm³ olmuştur. SO₂ emisyonları (ortalama) %100L için 5200 mg/Nm³ civarında iken, yakıt karışımındaki TG payı arttıkça emisyonlar azalmış ve %100TG için sıfır olmuştur. Fazla hava oranı arttıkça CO emisyonları azalmıştır. SO₂ ve NO_x emisyonları neredeyse tüm yakıt karışımlarında fazla hava oranı arttıkça artmıştır. Sonuç olarak Tavuk gübresinin linyit ile birlikte yakılması, atık bertarafı, emisyon azaltımı ve yerli kaynakların kullanımı açısından umut verici olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Emisyon, DAYK, Biyokütle, Tavuk gübresi, Linyit

2024, 48 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EMISSIONS GENERATED DURING THE COMBUSTION OF A MIXTURE OF CHICKEN MANURE AND LIGNITE IN A FLUIDIZED BED BOILER

Hasip Turan ORUÇ

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Sema YURDAKUL
II. Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Barış GÜREL**

To dispose of chicken manure (CM) produced by poultry farming, a circulating fluidized bed boiler (CFBB) system was created, built, and tested in this study. The influence of the surplus air ratio and the amount of TG in the fuel mixture on combustion efficiency and flue gas emissions were assessed using combustion and co-combustion tests of CM and Kale Lignite (L) in the system. The combustion efficiency rose from 86% to 95% as the amount of CM in the mixture increased. Depending on the CM ratio, it was found that emissions of SO₂ and NO_x decreased while emissions of CO increased. For 100%L, the CO emissions ranged from 726 to 2241 mg/Nm³; for 100%CM, it ranged between 838 and 2450 mg/Nm³. For 100%CM, NO_x emissions varied from 177.5 to 240 mg/Nm³, and for 100%L, it was 276.3 mg/Nm³. The average SO₂ emissions for 100%L were approximately 5200 mg/Nm³, but as the percentage of CM in the fuel mix increased, emissions dropped until they were zero for 100%CM. As the percentage of excess air increased, CO emissions decreased. With a rise in excess air content in nearly all fuel mixes, SO₂ and NO_x emissions increased. Therefore, using domestic resources, reducing emissions, and disposing of waste are all potential benefits of co-combustion chicken manure with lignite.

Keywords: Emission, CFBB, Biomass, Chicken manure, Lignite

2024, 48 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması TÜBİTAK 218M440 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Sema YURDAKUL'a ve Doç. Dr. Barış GÜREL'e, yardımlarından dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca Prof. Dr. Kamil EKİNCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Karani KURTULUŞ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Hasip Turan ORUÇ
ISPARTA, 2024

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri	9
Şekil 4.1. DAYK sisteminden bir görünüm.....	22
Şekil 4.2. DAYK'nın şematik görünümü ve yanma odasının ayrıntılı görünümü	22
Şekil 4.3. Yanma odası kalıp izolasyon malzemesinin montaj görüntüsü	23
Şekil 4.4. 350 kWth kapasiteli DAYK sisteminin proses diyagramı ve ölçüm yerleri.....	24
Şekil 4.5. DAYK sisteminin ayrıntılı montaj katı model resmi.	26
Şekil 5.1. %100 L yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyona etkisi	29
Şekil 5.2. %50 L +% 50 TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyonlarına etkisi	29
Şekil 5.3. %100 TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyona etkisi	30
Şekil 5.4. %100L yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO _x emisyonları.....	31
Şekil 5.5. %50L %50TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO _x emisyonları.....	31
Şekil 5.6. %100TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO _x emisyonları.....	32
Şekil 5.7. %100L yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO ₂ emisyonları	34
Şekil 5.8. %50L%50TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO ₂ emisyonları	34
Şekil 5.9. %100TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO ₂ emisyonları	35
Şekil 5.10. %100L yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO ₂ emisyona değerleri.....	36
Şekil 5.11. %50L%50TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO ₂ emisyon değerleri.....	36
Şekil 5.12. %100TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO ₂ emisyona değerleri.....	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Yakıtların element analizi.....	19
Çizelge 4.2. Yakıt karışımlarının yaklaşık analiz sonuçları ve alt kalorifik değerleri.....	19
Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan sınır koşulları parametreleri	21
Çizelge 4.4. Yatak malzemesinin (katı madde) parçacık çapı dağılımı	21



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

DAYK	Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazan
L	Linyit
TG	Tavuk Gübresi
λ	Hava Fazlalık Katsayısı



1. GİRİŞ

Enerji talebi, teknoloji ilerlemesi ve nüfus artışı ile birlikte hızla artmaktadır. Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kaynaklardan sağlanmaktadır ve bu kaynaklar sınırlı birer kaynaktır. Ayrıca, geleneksel enerji kaynaklarının maliyeti yükseliyor ve çevresel etkileri ciddi bir sorun teşkil ediyor. Bu nedenlerle, alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları, bu araştırmalar ve yatırımlar sayesinde önemli bir yer edinmiş durumdadır. Güneş, rüzgar ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payı günümüzde yaklaşık olarak %13'e kadar yükselmiş durumdadır (Boztepe, 2011).

Biyokütle, karbon, hidrojen ve oksijen içeren, bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen ve hızla yenilenebilen organik maddeleri ifade eder. Bu tür maddeler, güneş enerjisi ve CO₂'nin bitkiler tarafından fotosentez yoluyla işlenmesiyle üretilir. Fotosentez sırasında bitkiler atmosfere oksijen salarlar. Biyokütle, bu organik materyallerin enerji kaynağı olarak kullanılmasıyla elde edilen enerjiyi ifade eder. Bu süreçte, oksijen kullanılarak CO₂ salınır ve ısı enerjisi üretilir. Bu döngü, biyokütlenin sürekli olarak yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Fotosentez güneş ışığı olduğu sürece devam edeceğinden, biyokütle asla tükenmez bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Biyokütle enerjisi, doğrudan yakılarak veya termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm yöntemleriyle elde edilebilir (Kurt ve Koçer 2010, Anonim 2019a).

Kömürle enerji üretme yöntemleri, küresel ısınma, hava kirliliği ve fosil yakıtların tükenme riski nedeniyle giderek artan bir baskı ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle emisyonları ve fosil yakıt tüketimini azaltmak için birlikte yakma teknolojilerinin kullanılması önerilmektedir. Kazanlarda biyokütle kullanımının fosil kaynakların korunması, finansal net tasarruf, CO₂ ve NO_x emisyonlarının azaltılması ve istihdam yaratma fırsatları gibi çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar sunduğu belirtilmiştir (Saidur vd., 2011).

Ülkemizde önemli miktarlarda tavukçuluk faaliyetleri sonucu ortaya çıkan tavuk gübresi, tavuk çiftliklerinin enerji ihtiyacı için kullanılabileceği ön görülmektedir. Bu kullanımın aynı zamanda atıkların bertaraf edilmesine de yardımcı olacağı düşünülmektedir. Buna dayanarak, bu çalışma kapsamında Türkiye’de tavuk gübresi gibi yerli kaynakların kullanımını artırmak için bir Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazan sistemi tasarlanmış, üretilmiş ve test edilmiştir. Geliştirilen sistem, düşük kalorifik değere sahip yerli enerji kaynaklarının enerji santralleri, sanayi işletmeleri ve ısıtma sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Orijinal yanma odası, tek bir parça olarak üretilerek üretim sürecinde kolaylık ve yakıtların yanması sırasında verimlilik sunmaktadır. Gerçek sistemlerde, yanma odası tek parça olarak üretilmek yerine, ayrı ayrı parçalar halinde üretilip birleştirilir. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan sistem bu yönüyle özgünlük taşımaktadır. Çalışmanın temel amacı, geliştirilen özgün DAYK yanma odasında tavuk gübresinin yerel bir linyit ile yakılarak verimli ve çevre dostu bir şekilde enerji üretiminde kullanılmasıdır.

1.1. Tavuk Gübresinin Türkiye’deki Miktarı

Çok uzun zamandır, çiftlik hayvanlarının katı atıkları gübre veya yakıt olarak kullanılmıştır. Son yıllarda, üretim sistemlerinin yoğunlaşması ve çiftliklerin büyümesiyle birlikte gübre miktarı ve niteliği de değişmiştir. Özellikle tavukçulukta, iki tür gübreden bahsedilebilir: saf tavuk gübresi ve altlıkla karışık gübre. Yumurtlayan tavuk işletmelerinde üretilen gübre genellikle saf tavuk gübresidir. Bir yumurtlayan tavuk, ekonomik ömrü boyunca yaklaşık 55 kg yaş gübre üretir. (Yumurta Üreticileri Merkez Birliği). Ülkemizde yumurtlayan tavuk varlığı yıllara göre değişmekle birlikte 40-45 milyon adet civarındadır. Bu durumda, Türkiye’de yaklaşık olarak yılda 2,5 milyon ton yaş tavuk gübresi üretilmektedir. Ancak eğer gübreler doğru şekilde işlenip depolanmazsa, endüstriyel atıklar gibi zararlı olabilmektedirler. Özellikle tavuk gübresi, uygun olmayan bir şekilde işlenirse veya depolanırsa, toprak yüzeyini ve yer altı sularını kirletebilmekte ve hastalıkların yayılmasına ortam sağlayabilmektedir. Bu nedenle atık gübrelerin doğru yöntemlerle yönetilmesi ve işlenmesi çevre sağlığı açısından son derece önem arz etmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Dünya enerji talebinin artması ve fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlılığı göz önünde bulundurulduğunda, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep hızla artmaktadır. Biyokütle, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla uygulama alanı en geniş olanıdır. Avrupa Birliği, Kyoto Protokolü hedeflerini ve yüksek enerji talebini karşılamak için biyoyakıtların kullanımını teşvik etmektedir. Bu nedenle, ülkemiz biyokütleyle yönelerek sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirmelidir. Biyokütle çeşitli işlemlerle katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülebilir ve bu ürünler yüksek ısı değerlerine sahip, taşınabilir ve depolanabilir yakıtlara dönüştürülebilirler. Bu gelişmeler, enerji üretiminde çevresel etkileri azaltmak ve enerji güvenliğini artırmak için önemli bir adım teşkil etmektedir (Özay vd., 2014).

Çalışma kapsamında ülkemizde birçok bölgede tavuk yetiştiriciliğinin sonucunda oluşan tavuk gübrelerinin değerlendirilmesi amacıyla, yumurtacı tavuk gübresinin yerli Kale linyiti ile ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılması sonucu oluşan yakıt karışımlarının [(%100 linyit, %75 linyit/%25 tavuk gübresi (TG), %50 linyit/%50 tavuk gübresi (TG) ve %25 linyit/%75 tavuk gübresi (TG)] akışkan yataklı kazanda yakılması sonucunda oluşan CO, NO_x ve SO₂ emisyonları ile yanma veriminin incelenmesi amaçlanmaktadır.

1.3. Neden Biyokütle Kullanılmalı?

Biyokütle, odunsu ve odunsu olmayan bitkisel ve hayvansal organik atıkları içeren biyolojik ve sürdürülebilir bir materyal olarak tanımlanır. Bu atıklar, doğru yöntemlerle kullanılarak alternatif bir enerji kaynağına dönüştürülebilir. Özellikle ahşap ve bitki/hayvan atıkları, enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyokütle ya doğrudan yakılarak ya da çeşitli işlemlerle yakıt kalitesi artırılarak, taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir özelliklere sahip biyoyakıtlara dönüştürülerek enerji teknolojilerinde kullanılmaktadır. Bu yakıtların tercih edilme sebepleri arasında biyokütlenin kolayca temin edilebilir olması, yüksek enerji yoğunluğuna sahip alkol veya diğer gazlara dönüştürülebilmesi, ekonomik olması, kırsal bölgelerde istihdam yaratması,

düşük sülfür içeriği, yüksek enerji potansiyeli ve net CO₂ emisyonlarının sıfır olması yer almaktadır. Bu özellikler, biyokütlenin çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır (Hepbaşlı vd., 2004).

1.4. Biyokütle Nedir?

Biyokütle, bitkilerden (yosun, ağaçlar ve tarım ürünleri dahil) elde edilen tüm organik maddeleri tanımlayan bir terimdir. Güneş ışığı, fotosentez süreciyle bitkiler tarafından organik materyale dönüştürülür ve bu süreç tüm kara ve su bitki örtüsünü ve organik atıkları kapsar. Biyokütle, güneş enerjisinin kimyasal bağlarda depolandığı organik bir madde olarak kabul edilebilir. Karbon, hidrojen ve oksijen arasındaki bağlar, sindirim, yanma veya ayrışma sırasında kırıldığında, bu maddeler depoladıkları kimyasal enerjiyi serbest bırakır. Biyokütle, insanlık için her zaman önemli bir enerji kaynağı olmuştur ve şu anda dünya enerji arzına %10-14 arasında bir katkı sağladığı tahmin edilmektedir (McKendry, 2002a).

1.5. Biyokütle Kaynakları

Biyokütle kaynakları, karalardan denizlere kadar geniş bir yelpazede bulunabilir. Tarımsal atıklar, orman artıkları, endüstriyel atıklar, hayvansal atıklar, evsel atıklar ve kanalizasyon atıkları önemli biyokütle kaynakları arasında yer alır. Biyokütle sadece yenilenebilir olmasıyla değil, aynı zamanda her yerde yetiştirilebilmesi, sosyoekonomik gelişmeye ve çevre korumasına katkı sağlaması, elektrik üretimi, kimyasal maddelerin üretimi ve özellikle taşıt yakıtları gibi çeşitli alanlarda kullanılabilmesi nedeniyle stratejik bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Biyokütle kaynakları genellikle bitkisel atıklar, hayvansal atıklar ve şehir/endüstriyel atıklar olmak üzere üç ana kategoriye ayrılabilir ve enerji üretimi için büyük potansiyel taşımaktadır.

Bitkisel kaynaklı biyokütle atıkları arasında odunlar (enerji ormanları ve çeşitli ağaç türleri), yağlı tohum bitkileri (kolza, ayçiçeği, soya), karbonhidrat bitkileri (patates, buğday, mısır, pancar, enginar), elyaf bitkileri (keten, kenevir, tatlı sorgum, miskantus), protein bitkileri (bezelye, fasulye, buğday) ve genel bitkisel

artıklar bulunmaktadır (Karaosmanoğlu, 2003). Türkiye'de, bu bitkisel atıklar arasında fındık ve ceviz kabukları, prina, ayçiçeği kabukları, çığit ve mısır gibi artıklar enerji üretimi amacıyla değerlendirilmektedir. Bu biyokütle kaynaklarının ısı değeri genellikle 3800-4300 kcal/kg arasında değişmektedir (Koçer ve Ünlü, 2007).

Hayvansal atıklar da biyokütle kaynakları içinde önemli bir yer tutar, özellikle büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan yetiştiriciliğiyle elde edilen atıklar biyogaz ve gazlaştırma gibi modern teknolojiler kullanılarak enerjiye dönüştürülebilmektedir (Saz, 2015).

Çöp depolama alanlarındaki katı atıklar, evsel ve endüstriyel atıklar, evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları ve kanalizasyon atıkları da biyokütle kaynakları arasında yer alır. Bu atıklar, anaerobik organizmalar yardımıyla metan gazına dönüştürülebilirler. Ayrıca, piroliz ve yüksek sıcaklıklarda yakma gibi yöntemlerle de enerji elde edilebilir. Bu süreçler, uygun tesislerde hava ile yakılarak elde edilen ısı enerjisiyle elektrik üretiminde kullanılmaktadır (Koçer ve Ünlü, 2007, Anonim, 2019b).

1.5.1. Tarımsal Ürünler

Şeker kamışı, mısır, buğday, sorgum ve ayçiçeği, kolza (kanola) ve soya fasulyesi gibi bitkisel yağ içeren ürünler başta olmak üzere enerji kaynağı olarak özel olarak yetiştirilebilecek birçok tarımsal ürün bulunmaktadır. Bu ürünlerin çoğu, sıvı yakıt kaynaklarına dönüştürülmek amacıyla yetiştirilir. Yani, bu mahsuller hasat edildikten sonra etanol (benzin yerine geçen bir yakıt) veya biyodizel gibi yakıtlara dönüştürülür. En yaygın enerji bitkileri, şeker kamışı (özellikle etanol üretiminde kullanılan "enerji kamışı" türü) ve mısırdır.

Yüksek yağ içeriğine sahip tohumlar, soğuk sıkım yöntemiyle yağ elde edildikten sonra transesterifikasyon işlemine tabi tutulur ve biyodizel üretimi sağlanır. Biyodizel üretiminde kullanılabilecek çeşitli tohumlar bulunmakla birlikte, en yaygın olanı "kolza tohumu"dur. Diğer hammaddeler arasında palm yağı, ayçiçek yağı, soya fasulyesi yağı, içyağı (hayvansal yağ) ve geri dönüştürülmüş kızartma yağları yer alır. Hammadde maliyeti, toplam üretim

maliyetine önemli bir etki yapmaktadır. Bugün dünya genelinde, özellikle Malezya gibi palm yağı kullanan ülkelerde 85 biyodizel tesisi, toplamda 1,28 milyon ton kapasiteye sahiptir (Korbitz, 1998).

Filipinler'de ise biyodizel, hindistan cevizi yağıyla karıştırılarak traktör ve kamyonlarda kullanılmaktadır.

1.5.2. Tarımsal Kalıntılar

Dünya çapında her yıl büyük miktarlarda atık üretilmektedir ve büyük ölçüde kullanılmaktadır. Yaygın tarımsal atıklardan biri, pirincin yaklaşık %25'ini oluşturan pirinç kabuğudur. Diğer bitkisel atıklar arasında şeker kamışı lifi (küspe olarak bilinir), hindistancevizi kabuğu ve kabukları, hurma yağı lifi, yerfıstığı kabukları ve saman yer alır.

1.5.3. Hayvansal Atıklar

Biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılabilecek pek çok hayvan atığı bulunmaktadır. En yaygın kaynaklar, domuz, tavuk ve sığır gübreleridir; çünkü bu hayvanlar genellikle küçük alanlarda büyük miktarlarda atık üretirler. Geçmişte, bu hayvansal atıklar genellikle gübre olarak satılır ya da doğrudan tarım alanlarına yayılırdı. Ancak, koku ve su kirliliğine yönelik daha katı çevre düzenlemelerinin getirilmesiyle, bu atıkların daha etkin bir şekilde yönetilmesi için yeni yöntemler geliştirilmiştir.

Bu atıkları dönüştürmenin yaygın bir yolu anaerobik çürütmedir. Anaerobik çürütme işlemi sonucunda elde edilen biyogaz, içten yanmalı motorlarda elektrik üretimi için kullanılabileceği gibi, doğrudan yemek pişirme ya da ısıtma amaçlı da yakılabilir. Ayrıca, gıda işleme ve mezbaha atıkları da anaerobik çürütme için uygun hammaddeler arasında yer almaktadır.

1.5.4. Siyah Çözelti

Siyah çözelti, kağıt ve kağıt hamuru üretim sektöründe ortaya çıkan bir atık üründür ve biyokütle enerji kaynağı olarak piroliz veya gazlaştırma işlemleriyle değerlendirilebilir.

1.5.5. Şeker Endüstrisi Atıkları

Şeker kamışı endüstrisi, her yıl büyük miktarlarda küspe (şeker kamışı lifi) üretilmektedir. Küspe, enerji kaynağı (proses ısısı ve elektrik üretiminde gerekli olan buhar üretmek için kazan besleme stoğu olarak) kullanılabileceğinden potansiyel olarak önemli bir biyokütle enerjisi kaynağıdır.

Birçok şeker kamışı değirmeni, kendi enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla küspe kullanırken, son zamanlarda bazı fabrikalar, büyük miktarda elektrik üreterek bunu şebekeye ihraç etmek için genişletilmekte ve geliştirilmektedir.

1.5.6. Orman Endüstrisi Atıkları

Ormancılık artıkları, ağaçlandırmaların inceltilmesi, ağaç yollarının temizlenmesi, kağıt hamuru ve kereste için kök odunun çıkarılması ve doğal aşındırma gibi işlemler tarafından üretilir. Ahşap işleme endüstrisi ayrıca genellikle talaş, ağaç kabuğu ve talaş artıklarından önemli miktarda kalıntı üretir. Bu atıklar malzeme olarak genellikle kullanılmaz, orman atıkları genellikle sahada çürümeye bırakılır, ancak geleneksel odun veya orman atıklarının aynı şekilde bir yakıt kaynağı olarak toplanabilmektedir ve kullanılabilmektedir.

1.5.7. Endüstriyel Atıklar

Gıda sektörü, biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılabilecek çeşitli kalıntı ve yan ürünler üretir. Bu atıklar, et üretiminden şekerleme yapımına kadar gıda endüstrisinin her alanından gelir ve enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Katı atıklar arasında, meyve ve sebzelerin kabukları ve artık parçaları, kalite kontrol kriterlerine uymayan gıdalar, şeker ve nişasta üretimi sırasında ortaya çıkan küspe ve lifler, filtre çamurları ve kahve telvesi gibi maddeler bulunmaktadır. Bu atıklar genellikle gıda şirketleri tarafından bertaraf edilmeleri için ödeme yapılarak çöplüklerde bertaraf edilir (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği).

Sıvı atık akışları, etlerin, meyve ve sebzelerin yıkanması, haşlanması, etlerin ön pişirilmesi, kümes hayvanları ve balıkların işlenmesi, temizlik ve işlem süreçleri ile şarap üretimi sırasında ortaya çıkar. Bu endüstriyel atıkların biyogaz üretmek için anaerobik olarak sindirilme veya üretilen etanole fermente edilme potansiyeli mevcuttur ve atıktan enerjiye dönüşümün birkaç ticari örneği halihazırda mevcuttur (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği).

1.5.8. Belediye Katı Atıkları (Kentsel Katı Atıklar)

Her yıl milyonlarca ton evsel atık toplanır ve büyük çoğunluğu çöplüklere atılır. MSW'nin bileşimi, toplama hizmetinin konumuna ve türüne göre değişir. Bu MSW'deki biyokütle kaynağı, çürüyen maddeler, kağıt ve plastikten oluşur ve toplanan MSW'nin ortalama %80'ini oluşturmaktadır (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği).

Belediye katı atıkları, doğrudan yakma veya çöp sahasında doğal anaerobik çürütme ile enerjiye dönüştürülebilir. Bu çöplüklerde, MSW'nin doğal bozulması sonucu oluşan gaz (yaklaşık %50 metan ve %50 karbon dioksit) depolanan atıklardan toplanır ve içten yanmalı motorlar ya da gaz türbinleri aracılığıyla ısı ve elektrik üretimi için kullanılmadan önce arıtılır (Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği).

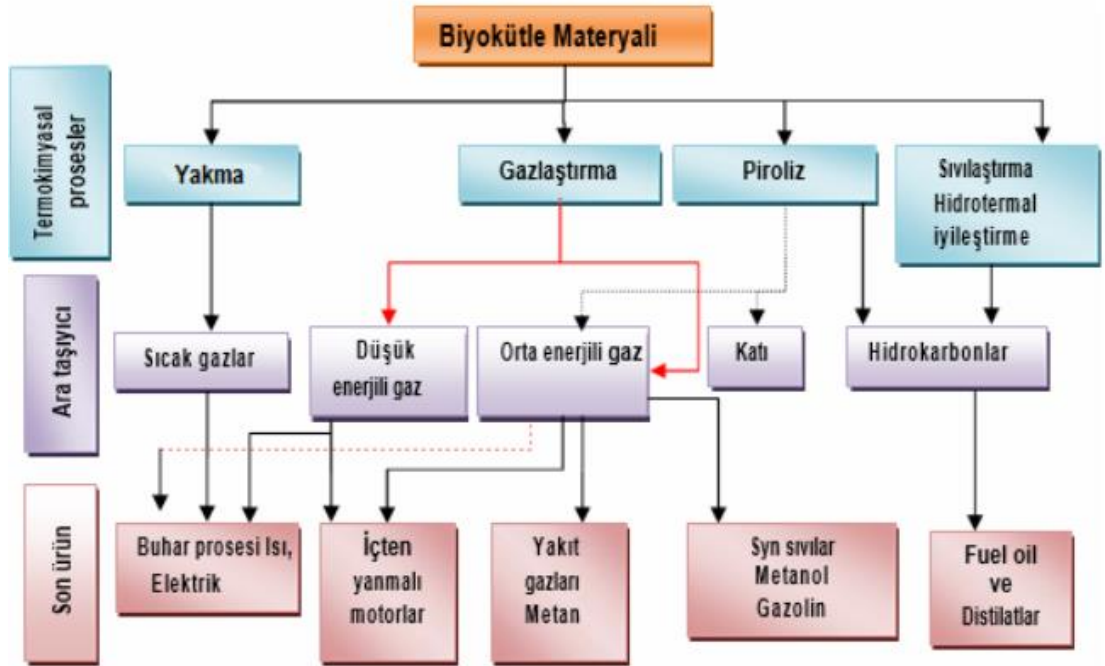
1.5.9. Kanalizasyon Çamuru

Kanalizasyon çamurları, daha önce bahsedilen diğer hayvansal atıklara benzer bir biyokütle enerji kaynağıdır, ancak gelişmiş ülkelerde uzun yıllardır arıtılmaktadır. Anaerobik çürütme yöntemiyle kanalizasyon çamurundan biyogaz üretilir. Kalan çamur ise ya yakılabilir ya da ek biyogaz ve "biyo-yag" üretmek amacıyla piroliz işlemine tabi tutulabilir.

2. BİYOKÜTLE TERMOKİMYASAL DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Biyokütle termokimyasal dönüşüm teknolojileri, biyokütle kaynaklarından enerji ve kimyasal ürünler elde etmek için geliştirilmiş yöntemlerdir. Bu teknolojiler, biyokütlenin düşük enerji yoğunluğu, düşük yoğunluk ve taşıma zorlukları gibi dezavantajlarını aşmakta etkilidir (Özay vd., 2014). Biyokütle termokimyasal proseslerin temel hedefi, fosil yakıtların yerine geçebilecek, kararlı özelliklere sahip, depolanabilir ve taşınabilir yakıtlar üretmektir. Bu süreçler, biyokütle kaynaklarının çeşitliliği ve miktarı, enerji taşıyıcıları, kullanım alanları, çevresel standartlar ve ekonomik şartlar gibi faktörlerin dikkate alınarak optimal şekilde uygulanması gerekmektedir (Caputo ve ark. 2005).

Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri (McKendry, 2002)

Pülverize kömür kazanlarına göre, dolaşımli akışkan yataklı kazanların avantajları arasında kireçtaşı kullanarak düşük maliyetle SO₂ yakalama, düşük yanma sıcaklıkları sayesinde düşük NO_x emisyonları ve yakıt esnekliği yer almaktadır. Cui ve arkadaşları (2021), S-CO₂ DAYK kazanının ölçek büyütme

özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, endüstriyel DAYK kazanlarından salınan CO, NO ve SO₂ emisyonlarının diğerlerine kıyasla daha düşük olduğunu, ancak N₂O emisyonlarının biraz arttığını belirtmişlerdir. Bravo ve diğerleri (2018), bir oks-DAYK kazanında biyokütlenin kömürle birlikte yakılmasını araştırmış ve oks-yakıt koşulları altında biyokütlenin doğrudan yakılmasının uygulanabilirliğini, birlikte yakma oranlarını ve sürdürülebilir biyokütle tedarikini ayrıntılı şekilde incelemişlerdir. Birlikte yakma, enerji santrallerinin operasyonel esnekliğini, ekonomik rekabet gücünü ve işletme prosedürlerini geliştirmiştir. Ryabov (2022), biyokütlenin özelliklerini ve buhar patlaması, torrefaksiyon, peletleme ve liç gibi biyokütlenin ön işleme yöntemlerini incelemiştir. Bu çalışmada, bir DAYK kazanında biyokütle ile kömürün oksijen destekli olarak birlikte yakılmasının, CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceği belirtilmiştir. Liu ve arkadaşları (2020), endüstriyel bir CFB kazanı ve laboratuvar ölçeğinde bir CFB reaktörü kullanarak, kireçtaşı ilavesinin NO emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kireçtaşı genellikle CFB'lerde emisyon seviyelerini karşılamak için SO₂ azaltımı için kullanılsa da, CaSO₄'ün NO'yu %99'a kadar azaltmak için güçlü bir katalizör olduğu belirtilmiştir.

Tavuk gübresi ve linyit kömürünün birlikte yakılmasıyla ilgili atık bertarafı, emisyonların düşürülmesi ve çevresel etkilerin azaltılması konularında birçok çalışma yapılmıştır. Topal ve diğerleri (2018), Thermoflex yazılımı ile bir trijenerasyon sisteminin simülasyonunu yaparak, sistemin termodinamik analizini ekserji, enerji ve parametrik analiz yöntemleriyle gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, kömür ve tavuk gübresiyle birlikte pirinç kabuğu ya da tavuk gübresiyle talaş gibi iki farklı kümes hayvanı atığının birlikte yakılması araştırılmıştır. Tavuk gübresi oranı %50'den %90'a çıktığında CO₂ emisyonlarının azaldığı bildirilmiştir. Atımtay ve Yurdakul (2020), 250 ve 300°C arasında torrefiye edilmiş ve ham kümes hayvanı altlığı örneklerinin aktivasyon enerjisini ve termal özelliklerini termo-gravimetrik analizör ile araştırmıştır. Ayrıca, düşük dereceli Türk linyitinin kümes hayvanı kumu ile birlikte yakılması üzerine bir inceleme yapılmış ve karışım oranının, kümes hayvanı atıklarının termal reaktivitesine etkisi değerlendirilmiştir. Yakıt karışımının

performansının linyite göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Yakıt karışımındaki torrefiye edilmiş kümes hayvanı atığı oranının artmasıyla birlikte, karışımın yakıt özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiş ve özellikler, linyitlere daha yakın bir hale gelmiştir. Yurdakul (2016), kümes hayvanı altlığının termal kinetiği ve yanma özelliklerini deneysel olarak incelemiş, ayrıca düşük kaliteli Türk linyiti ile kümes hayvanı altlığının izotermal olmayan koşullarda bir termogravimetrik analizörde birlikte yanmasını araştırmıştır. Yapılan analizlerde, aktivasyon enerjisinin 104,4 kJ/mol ile 130,1 kJ/mol arasında değiştiği ve karışımındaki kömür oranı arttıkça ortalama aktivasyon enerjisinin düştüğü bulunmuştur. Thien ve diğerleri (2012), laboratuvar ölçekli bir kazan brülöründe %5, 10, 15 ve 20 hava fazlalığı ile kömür ve kömür-biyokütle karışımının (%90:%10) yanma performansını deneysel olarak incelemiştir. Kömürle karşılaştırıldığında, kümes hayvanı altlığı biyokütlesi yüksek kül içeriğine, yüksek azota, yüksek sülfür içeriğine ve düşük ısıtma değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %10 biyokütle karışımının eklenmesine rağmen, yakıt karışımındaki azot içeriği %8'den %20'ye yükseltilmiş olmasına karşın NO emisyonlarında bir artış gözlemlenmemiştir. Karışımın yakıt kalitesinin bir miktar düşmesine rağmen, NO emisyonlarında bir artış ya da kazan performansında önemli bir düşüş görülmediği sonucuna varılmıştır.

2.1. Yakma

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesinde en eski yöntemlerden biri olan doğrudan yakma, binlerce yıldır kullanılmaktadır. Ancak basit yakma sistemleri kullanıldığında verim düşüktür. Son zamanlarda ise verimi artırmak için yeni yakma sistemleri geliştirilmektedir. Orman biyokütle atıklarının yakılmasıyla elde edilen enerji, ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Ancak bu atıkların enerji değeri kömür ve petrole göre daha düşüktür, bu yüzden enerji değeri yüksek diğer kaynaklarla karıştırılarak kullanılabilir (Leckner vd., 2004). Doğrudan biyokütle yakılması, CO₂ emisyonlarının yüksek olması nedeniyle sınırlı önerilir.

2.1.1. Kazık Brülörleri

Kazık brülörlerinde, biyokütle yakıtı, fırına yığınlar halinde yerleştirilir ve yanma işlemi, yığının altından ve üstünden beslenen hava akışları ile gerçekleştirilir. Bu teknoloji, yakıt çeşitliliği ve sade tasarım gibi avantajlara sahiptir. Ancak, bu sistemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır; bunlar arasında düşük kazan verimliliği, kirletici emisyonların yüksekliği ve yanma kontrolünün genellikle daha zayıf olması yer almaktadır (Van Den Broek vd., 1996).

2.1.2. Stoker Yakıtlı Kazanlar

Stokerli kazanlar grubunda, sabit eğimli ızgaralı, hareketli ızgaralı ve titreşimli ızgaralı kazan arasında ayırım yapılabilir. Bu tiplerin ortak özelliği, ızgaraya ince bir tabaka yakıt koyan ve onu ızgaraya daha eşit bir şekilde dağıtan bir yakıt besleme sistemidir (Van Den Broek ve diğerleri, 1996). Basit çalışma ilkesi şu şekilde, Otomatik sistem, basınca veya sıcaklığa bağlı olarak kendiliğinden devreye girer ve durur. Stokerli sistem, 0,5 mm ile 30 mm arasındaki tüm kömür çeşitlerini yakma kapasitesine sahiptir. Sistemin üzerindeki kömür taşıyıcı redüktör ve hava fanı, kazan termostatu veya presostatu ile bağlantılıdır. Bu sayede kazan belirlenen sıcaklığa ulaştığında sistem otomatik olarak durur; sıcaklık ayarlanan alt limite düştüğünde ise tekrar çalışmaya başlar.

2.1.3. Süspansiyonlu Kazanlar

Bu tip kazanlarda yakıt, kazana beslenirken yanan küçük parçacıklar halinde ateşlenir. Bu sistem, toz haline getirilmiş kömür yakma teknolojisi ile karşılaştırılabilir. Bu sistemin başlıca dezavantajı, yakıtın önemli bir ön işleme sürecinden geçmesi gerektiğidir. Ancak, en büyük avantajı, daha yüksek kazan verimliliği sağlamasıdır (Van Den Broek ve diğerleri, 1996).

2.1.4. Akışkan Yataklı Kazanlar (AYK)

Bu sistem, geleneksel yakma yöntemlerine bir alternatif olarak tasarlanmıştır. En temel haliyle, bir Akışkan Yataklı Yatak (FBC) sistemi, genellikle refrakter bir

astar ile kaplanmış, kumdan yapılmış bir yatak, destekleyici bir ızgara plakası ve hava enjeksiyon memeleri içeren dikey bir çelik silindirdir (Tchobanoglous ve diğerleri, 1993). Ticari ölçekli uygulamalarda, kabarcıklanan ve dolaşımdaki akışkan yataklar arasındaki farklar gözlemlenebilir. Akışkan yataklı sistemlerin temel özelliklerinden biri, yakıt türüne göre esnek olmalarıdır; bu, onları farklı yakıt türlerini bir arada yakmak için oldukça uygun hale getirir (Van Den Broek ve diğerleri, 1996).

2.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda kısmi oksidasyon yoluyla yanıcı gaz karışımlarına dönüştüğü bir teknolojidir. Bu işlem genellikle 800-900°C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Gazlaştırma sırasında elde edilen gaz, düşük kalorifik değere sahip olup (yaklaşık 4-6 MJ/Nm³), doğrudan yakılabilir ya da gaz motorları ve türbinleri için yakıt olarak kullanılabilir. Gazlaştırma, biyokütlenin normal yanma işlemine göre daha az oksijen kullanılarak gerçekleştirilir, böylece sentez gaz içinde H₂, CO ve CH₄ gibi yanıcı gazlar bulunur.

Gazlaştırma işleminde, genellikle hava kullanılsa da, bazı sistemlerde saf oksijen, oksijen+buhar veya hava+buhar kombinasyonları da tercih edilebilir. Saf oksijen veya buhar kullanımının amacı, sentez gazının içinde bulunan yüksek enerji değerine sahip H₂ miktarını artırmaktır. Bu yöntemler, biyokütle kaynaklarının verimli ve etkin şekilde enerjiye dönüşümünü sağlamak için geliştirilmektedir (Bozkurt, 2005).

Gazlaştırma işlemi sonucunda elde edilen sentez gazı, doğrudan yakıt olarak gaz türbinleri ve gazla çalışan motorlarda kullanılabilir. Bu işlem genellikle dört aşamada gerçekleşir: biyokütlenin kurutulması, piroliz, yanma ve indirgeme. Her aşamada farklı kimyasal ve termal reaksiyonlar meydana gelir. Kurutma aşamasında biyokütlenin içindeki nem uzaklaştırılır, bu işlem yakıtın ısısı atmosfer basıncında 150°C'ye kadar yükseltilerek gerçekleştirilir. Gazlaştırmada, biyokütlenin nem oranının %30'u aşmaması önemlidir; %35'ten fazla nem içeren biyokütle, verimliliği düşürebilir. Nem miktarı, sentez gazının

kalorifik değeri ve bileşenlerinin hacimsel miktarları üzerinde belirleyici bir faktördür.

Piroliz aşamasında ise kurutulmuş materyal, oksijensiz ortamda 300-500°C arasında ısınır. Bu süreçte H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O gibi hafif gazlar ile kömür ve katran oluşur. Yanma aşamasında biyokütlenin içindeki karbon ve hidrojen oksijenle reaksiyona girer, CO, CO₂ ve su buharı üretilir. Bu kısmi yanma işlemi ekzotermiktir ve oksidasyon sıcaklığı 800-1500°C arasında değişir. İndirgeme aşamasında ise piroliz ve yanma gazları, kor bölgesinden geçerken çeşitli temel reaksiyonlar gerçekleşir (Tuğ 2016).



2.3. Piroliz

Piroliz, biyokütlenin oksijen yokluğunda yaklaşık 500°C'ye ısıtılmasıyla sıvı (biyo-yag olarak adlandırılır), katı ve gaz fraksiyonlarına dönüştürülmesidir. Kömür, biyo-yag ve yakıt gazı, pirolizden elde edilebilecek enerji ürünleridir. Flaş piroliz(Hızlı (flaş) piroliz, biyokütle hammaddesinin (örneğin odun veya saman) oksijen bulunmayan bir ortamda hızlı bir şekilde ısıtılması sürecidir. Bu işlem genellikle 0,5 ila 3 saniye sürer ve sonrasında ürünler hızla soğutularak 15 ile 19 MJ/kg arasında bir ısıtma değerine sahip kahverengi sıvıya dönüştürülür.) kullanılıyorsa, ağırlıklı olarak biyo-yag üretmek için piroliz kullanılabilir, bu da biyokütlenin %80'e varan bir verimlilikle biyo-yaga dönüştürülmesini sağlar. Biyo-yag motorlarda ve türbinlerde kullanılabilir ve rafineriler için hammadde olarak kullanılması da düşünülmektedir. Yağın dönüştürme işlemi ve kullanımıyla ilgili olarak düşük termal kararlılığı ve aşındırıcılığı gibi sorunların çözülmesi gerekmektedir. Bazı uygulamalar için, oksijen içeriğini azaltarak ve hidrojenasyon ve yağın katalitik kraking yoluyla alkalileri uzaklaştırarak biyo-yagların yükseltilmesi gerekebilir (McKendry, 2002b).

Piroliz işlemi, torrefaksiyon, yavaş piroliz ve hızlı piroliz olmak üzere üç aşamada gerçekleşir.

Torrefaksiyon, oksijensiz ortamda yapılan hafif piroliz anlamına gelir ve biyokütle, gazlaştırma öncesi enerji yoğunluğunu artırmak için önemlidir.

Yavaş piroliz, uzun sürelerde gerçekleştirilen bir piroliz yöntemidir ve biyokütlenin daha değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Odun, turba, maden kömürü gibi organik maddeler, havasız ortamda ve sabit yatak reaktörlerinde, 300°C civarındaki sıcaklıklarda uzun süre ısıtılarak katı ve sıvı ürünlere dönüştürülürler.

Hızlı piroliz ise yüksek sıcaklıklarda kısa sürede gerçekleştirilen bir termokimyasal dönüşüm sürecidir. Bu yöntemin temel amacı biyokütle kullanılarak sıvı ürün elde etmektir. Hızlı ısıtma, reaktördeki gazın kısa sürede alınmasını sağlamak ve yoğunlaşabilen gazın hızlı bir şekilde soğutulması bu süreç için esastır.

2.4. Diğer İşlemler

Biyo-yag üreten diğer işlemler hidrotermal yükseltme (HTU) ve sıvılaştırma'dır. HTU, yüksek basınçta ıslak bir ortamda biyokütleyi kısmen oksijenli hidrokarbonlara dönüştürür: işlemin neredeyse pilot aşamada olduğuna inanılmaktadır. Sıvılaştırma, biyokütlenin düşük sıcaklıklarda ve yüksek hidrojen basınçlarında işlenerek stabil bir sıvı hidrokarbona dönüştürülmesi işlemidir (McKendry, 2002b). Ancak, piroliz işlemine göre reaktörler ve yakıt besleme sistemlerinin daha karmaşık ve pahalı olması nedeniyle sıvılaştırma teknolojilerine olan ilgi daha sınırlıdır (McKendry, 2002b).

3. BİYOKÜTLE BİYOKİMYASAL DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİ

Fermantasyon ve anaerobik çürütme (AD) olmak üzere iki ana işlem kullanılmaktadır (McKendry, 2002b).

3.1. Fermantasyon

Fermantasyon, şeker ve nişasta içeren mahsullerden (örneğin şeker kamışı, şeker pancarı, mısır, buğday) etanol üretmek için birçok ülkede ticari ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu süreçte biyokütle önce öğütülür ve nişasta, enzimler aracılığıyla şekerlere dönüştürülür; ardından bu şekerler etanole dönüşür. Etanol, damıtma işlemiyle saflaştırılır; bu adım, bir ton kuru mısırdan yaklaşık 450 litre etanol üretildiği için enerji açısından yoğun bir aşamadır. Fermantasyon sonrası oluşan katı atıklar, hayvan yemi olarak kullanılabilir ve şeker kamışı için, küspe kazanlar için yakıt olarak veya gazlaştırma işleminde kullanılabilir (Coombs, 1996).

Öte yandan, lignoselülozik biyokütlenin (odun ve otlar gibi) işlenmesi daha zordur, çünkü bu tür biyokütlelerdeki polisakkaritler daha uzun zincirlidir ve bu şekerlerin etanole dönüştürülebilmesi için asidik veya enzimatik hidroliz gereklidir. Bu tür hidroliz yöntemleri şu anda pilot öncesi aşamadadır (McKendry, 2002b).

3.2. Anaerobik Çürütme

Organik madde, biyogaz olarak bilinen, metan, karbon dioksit ve az miktarda hidrojen sülfür içeren gazlara dönüştürülür (EU, 1999). Bu dönüşüm, anaerobik ortamda bakteriler tarafından gerçekleştirilir ve biyokütlenin düşük kalorifik değerinin yaklaşık %20-40'ı kadar enerji içeren bir gaz elde edilir. Anaerobik çürütme (AD), ticari olarak etkinliği kanıtlanmış bir teknolojidir ve özellikle yüksek nem içeren organik atıkların (yaklaşık %80-90 nem oranı) işlenmesinde yaygın olarak kullanılır. Elde edilen biyogaz, gaz türbinlerinde doğrudan enerji üretimi için kullanılabilir ve karbon dioksit (CO₂) uzaklaştırılarak, doğal gaz kalitesinde daha yüksek kaliteli bir gaz elde edilebilir (McKendry, 2002b).

3.3. Mekanik Ekstraksiyon

Ekstraksiyon, kolza, pamuk ve yerfıstığı gibi biyokütle bitkilerinin tohumlarından yağ elde etmek için kullanılan bir mekanik dönüştürme yöntemidir. Bu işlem, yağın yanı sıra hayvan yemi olarak kullanılabilen katı bir atık olan "kek" de üretir. Bir ton kolza tohumu yağ üretmek için yaklaşık üç ton kolza tohumu gereklidir. Elde edilen kolza yağı, biyo-dizel üretimi için kullanılan kolza tohumu metil esteri (RME) yapmak amacıyla, alkol ile reaksiyona giren bir transesterifikasyon sürecine tabi tutulabilir (McKendry, 2002b).



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Yöntem

1. Sistem Tanıtımı
2. Ölçümler

Tavuk Gübresi ve Linyit

Tavuklar tükettikleri gıdaların tamamını sindirmeden, yaklaşık %35-40'ını dışarı atarlar. Bu nedenle, gübre olarak çıkan dışkı zengin bitki besin maddeleri içerir. Diğer kimyasal gübrelerle karşılaştırıldığında, farklı hava koşullarında (yağmur, soğuk, sıcak vb.) özelliklerini korur ve toprakta uzun süre kalma özelliğine sahiptir.

Linyit, yüksek kül ve nem içeriği nedeniyle düşük ısı değere sahip bir kömür türüdür, bu yüzden genellikle termik santrallerde yakıt olarak kullanılır. Bununla birlikte, yerkabuğunda bol miktarda bulunması nedeniyle yaygın bir enerji kaynağı olarak tercih edilir. Diğer yandan, taşkömürü, yüksek kalorifik değeriyle öne çıkan, daha verimli bir kömür türüdür.

Yöntem

Sistem Tanıtımı

Bu çalışmada yeni bir sirkülasyonlu akışkan yataklı kazan (DAYK) sistemi 350 kWh kapasiteli olarak tasarlanıp üretilmiştir. Orijinal DAYK sisteminin yanma odası kısmı kompakt bir şekilde tasarlanmıştır ve tek parça döküm refrakterden üretilmiştir. Daha sonra diğer Orijinal DAYK sisteminin parçaları üretilip monte edilmiştir. Fan, pompa, blover ilavesi yapılarak sistemin montajı tamamlanmıştır. Besleme sistemi, ölçüm sistemi ve kontrol sistemi ekipmanı, yanma ve emisyon parametreleri yakılarak araştırılmıştır. Orijinal DAYK sisteminde tavuk gübresi ve yerel linyit karışımları hazırlanarak kullanılmıştır.

4.1. Kullanılan Malzemeler

Farklı oranlarda tavuk gübresi ve yerel linyit yakıt olarak kullanılmıştır. Yakıtların karakterizasyonu incelenmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtların elementel analiz sonuçları, yaklaşık analiz içerikleri ve alt kalorifik değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Yakıt karışımlarının alt kalorifik değeri, bomba kalorimetresi aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçümler üç kez tekrarlanarak ortalaması alınmıştır.

Çizelge 4.1. Yakıtların element analizi

Yakıtlar	N(%)	C (%)	H (%)	S(%)	O(%)
Tavuk Gübresi	5,425	51,255	7,041	1,012	35,267
Linyit	1,867	66,759	5,787	4,422	21,165

Çizelge 4.2. Yakıt karışımlarının yaklaşık analiz sonuçları ve alt kalorifik değerleri

Karışımları	Nem (%)	Uçucu madde (%)	Sabit Karbon (%)	Kül (%)	Alt Kalorifik Değer (kJ/kg)
100 % L	14,33	31,40	17,90	36,37	12107 ± 716
75 % L + 25% TG	24,75	29,15	15,13	30,96	11474 ± 1792
50 % L + 50 % TG	35,17	26,90	12,36	25,56	11264 ± 736
25 % L + 75 % TG	45,59	24,65	12,06	18,02	11146 ± 1454
100 % TG	56,01	22,41	6,83	14,75	10983 ± 415

4.2. Materyal

Yatak malzemesi olarak kuvars kumu tercih edilmiştir. Yatak malzemesinin yoğunluğu 2330 kg/m^3 , kütle yoğunluğu ise 1650 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Başlangıçta kullanılan yatak malzemesinin miktarı 60 kg, yüksekliği 0,27 m ve ortalama parçacık çapı ise 0,344 mm'dir.

Kütle hava/yakıt oranı, $L_{\text{gerçek}}$ denklemi ile hesaplanmıştır. Yanma odasının boyutlarının dar olması ($0,23 \times 0,54 \text{ m}$), sekonder hava beslemesi yapıldığında kazan içindeki sıcaklığın hızla düştüğü ve kum sirkülasyonunun bozulduğu gözlemlenmiştir. Ancak, önceden yapılan deneylerde bu durum daha yüksek emisyonlara yol açmıştır. Bu sebeple deneylerde ikincil hava kaynağı kullanılmamıştır. Deneylerde akışkanlaştırma ve yanma için hava, rüzgar kutusu ve dağıtıcı plaka kullanılarak birincil hava olarak yanma odasına verilmiştir.

$$L_{\text{gerçek}} = 4,31 \lambda (2,664C + 7,937H + 0,998S - O) \quad (4.1)$$

Yukarıdaki denklemde, $L_{\text{gerçek}}$ hava/yakıt kütle oranını ifade ederken, λ fazlalık hava oranını temsil etmektedir. C, H, S ve O ise sırasıyla karbon, hidrojen, kükürt ve oksijenin kütle oranlarının yüzdesini vermiştir.

Literatürdeki çalışmalara göre yapılan deneylerde fazlalık hava oranı 1,2 ile 1,6 arasında seçilmiştir.

Emisyonlar, çalışma sırasında TESTO 350 model taşınabilir emisyon analiz cihazı ile ölçülmüştür. Deneylerden önce kazanın kararlı duruma ($800 \pm 50^\circ\text{C}$) ulaşması beklenmiştir. Her bir yakıt karışımı için de bu prosedür takip edilerek, Türk Standartlarında belirtildiği gibi 30 dakikalık ölçüm ile tekrarlı üç ölçüm gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel Hava Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, her karışım için yapılan yanma deneylerinde ölçümlerin alındığı süre toplamda en az 90 dakika olmuştur. Ancak sistemin çalışma şekline bağlı olarak kararlı durum koşullarında ölçülen değerler belirli sınırlar içerisinde dalgalandığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle emisyon ölçüm sonuçları ortalama değerler olduğundan standart sapmaları ile verilmiştir. Tezde verilen emisyonlar yine yönetmelikte belirtildiği üzere %6 O₂ değeri göz önüne alınarak düzeltilmiştir.

4.3. Orijinal DAYK'nın Tasarımı Ve Kompakt Yanma Odasının Üretimi

Bu çalışmada bir DAYK sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 4.1'de DAYK sisteminin fotoğrafı yer almaktadır. Şekil 4.2'de ise DAYK ve yanma odasının şematik görünümü sunulmuştur. Yanma odası üretimi için kalıp tasarlanmış ve beton, yüksek sıcaklık, erozyon ve mukavemete karşı dayanıklı olarak kalıba dökülüp, beton kuruduktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Betonun kurumması için dışarıda iki gün beklenmiş, ardından nemin uzaklaştırılması amacıyla sıcaklık 24 saat boyunca kademeli olarak 350°C 'ye yükseltilmiş ve fırında 350°C 'de 24 saat süreyle bırakılmıştır. Refrakter beton olarak, düşük çimentolu ve yüksek yapışma özelliğine sahip Remlocas 70 DR kullanılmıştır. Kalıbın bir tarafı, silika-bor izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır. Oda kalıp betonu, 12 cm kalınlığında refrakter beton ve 3 cm'lik izolasyon malzemesinden oluşmaktadır.

DAYK sistemlerinin en önemli bileşeni olan yanma odası, tek parça kompakt üretimle zaman, maliyet ve iş gücü kayıplarını azaltmaktadır. Yanma odasının bileşenleri şu şekildedir: birinci kademe hava (akışkan hava) besleme girişleri, kül alma girişi, biyokütle besleme girişi, linyit besleme girişi, ikinci kademe hava girişi, brülör girişi, brülör soğutma havası girişi, conta potasından dönüş girişi, termokupl girişleri ve kompakt refrakter döküm yanma odası şeklindedir. Bunlardan bazıları Şekil 4. 2b'de gösterilmektedir.

Ayrıca Deneylerde kullanılan sınır koşulları parametreleri Çizelge 4.3'de ve Yatak malzemesinin (katı madde) parçacık çapı dağılımı Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Deneylerde kullanılan sınır koşulları parametreleri

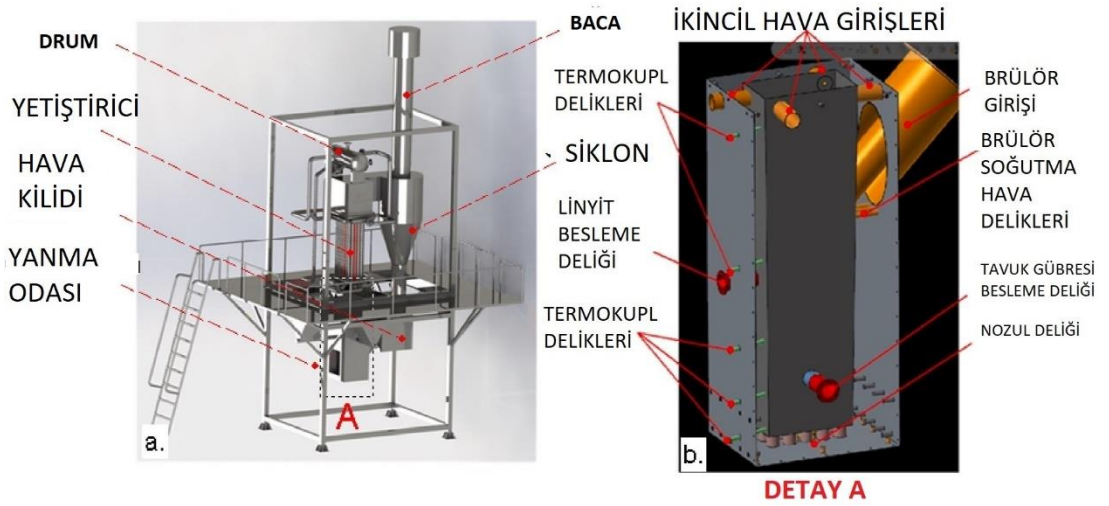
Yakıt Karışımı	Kütle Akışı Oranı (kg/sn)	İlk Hava Akış Hızı (kg/s)	Kireçtaşı Miktarı (g/s)	Fazla Hava Oranı	Hava Akış Hızı Mühürlü Kap (kg/s)	Yakıt Parçacığı Çapı (mm)	Yatak Malzemesi Başlangıç Miktarı (kg)	Yatak Malzemesi Parçacığı Ortalama (mm)
100 % L	0,039	0,207-0,259	14,12	1,2-1,6	0,01	0-6	60	0,344
75%L+ 25%TG	0,045	0,201-0,252	13,12	1,2-1,6	0,01	0-6	60	0,344
50%L+ 50%TG	0,049	0,194-0,242	10,81	1,2-1,6	0,01	0-6	60	0,344
25%L+ 75%TG	0,061	0,185-0,232	9,24	1,2-1,6	0,01	0-6	60	0,344
100 % TG	0,072	0,174-0,217	5,92	1,2-1,6	0,01	0-6	60	0,344

Çizelge 4.4. Yatak malzemesinin (katı madde) parçacık çapı dağılımı

Çap (µm)	Kütle dağılımı (%)
710-1000	0,5
500-710	3,5
250-500	74
125-250	22



Şekil 4.1. DAYK sisteminden bir görünüm



Şekil 4.2. DAYK'nın şematik görünümü ve yanma odasının ayrıntılı görünümü

Linyit ve tavuk gübresinin yanacak olması nedeniyle DAYK'da dizel yakıt brülörü kullanılmıştır. DAYK'lerde rejim sıcaklığına ulaşma sürecinde alev yönü ve brülörün konumunun kritik olduğu yapılan deneylerle belirlenmiştir. Brülörün yerleşimi nedeniyle, kazan içinde sıcak hava akışına doğrudan maruz kalmaktadır. DAYK'da rejim sıcaklığına ulaşıldıktan sonra brülör kapatılarak,

yanma işlemine katı yakıtla devam edilmiştir. Ancak brülör kapatıldıktan sonra sıcak havaya maruz kalırsa zarar görebileceği için, bu nedenle brülör soğutma havası manifoldu ısıdan kaynaklanan zararları önleyecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemde, brülör giriş noktası, conta-pot giriş noktası, termokupl giriş boruları, kalıp klipsleri, sekonder hava girişi ve izolasyon malzemesi yer almaktadır.

4.4. Deneysel Test Tesisi

Tasarım ve imalat detayları, 350 kWth kapasiteli DAYK'da 5 farklı yakıtın havayla birlikte yakılmasını içermektedir. Deney sisteminde farklı linyit ve tavuk gübresi (L/TG) karışımları kullanılarak, yanma odasındaki sıcaklıklar ve baca gazı emisyon seviyeleri ölçülmüştür. Bu süreçte, birincil hava fanı (PF), ikincil hava fanı (SF), blover (SPF), kül tutucu hava fanı (ATAF), brülör (B), yakıt besleme sistemi (FFS), acil kül tahliye borusu (EADB), besleme suyu pompası (FWP) ve buhar tahliye sistemi (VES) gibi DAYK'nın çeşitli bileşenleri yer almıştır. Sıcaklık ve emisyon ölçüm noktaları ise sırasıyla T ve E olarak belirtilmiştir. Yanma odası kalıp izolasyon malzemesinin montajına ait görüntü Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Yanma odası kalıp izolasyon malzemesinin montaj görüntüsü

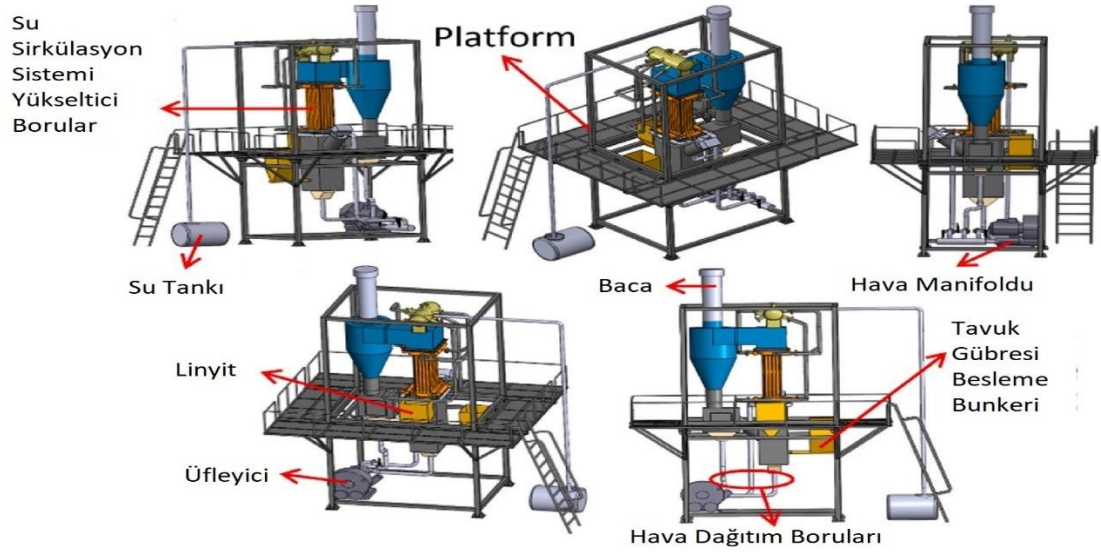
350 kWth kapasiteli DAYK sisteminin proses diyagramı ve ölçüm yerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Sistemde dışı 10 mm kalınlığında metal olan, yerden 30 mm, 530 mm, 980 mm ve 1740 mm yükseklikte yanma odasının alt kısmında yer alan K tipi termokupllar (200°C ile +1350°C arasında, $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetle) ile

Ayrıca yanma odasına yerden 0,8 m yükseklikte 2 kW motor gücünde 400 kg/saat'e kadar linyit ve 100 kg/saat'e kadar tavuk gübresi besleyebilen yakıt besleme sistemi monte edilmiştir. Ancak, yanma işlemine başlamadan önce kumun ısıtılması gerekmektedir. O₂ ve LPG tüplerinin oluşturduğu alev rüzgar kutusundaki havayı ısıtırken, brülör de yanma odasındaki kumun ısınmasına da destek olmaktadır. Sıvı yakıt brülörünün termal gücü 300 kW olup, dizel yakıtının akış hızı saatte 30 litre olarak belirlenmiştir. Brülörün yerden yüksekliği ise 1,8 metredir.

Kumun sıcaklığı 400°C'ye ulaştığında yakıt beslemesi yapılmıştır ve brülör kapatılmıştır. Rüzgar kutusundaki hava ısıtma sistemi, yatak malzemesinin sıcaklığını 800°C'ye kadar artıracak şekilde çalıştırılmış ve ardından durdurulmuştur. Doğal sirkülasyonlu su sirkülasyon sistemi için 1 kW motor gücüne sahip dalgıç pompa seçilmiştir.

Suyun maksimum pompalama kapasitesi, yerden 5,6 m yükseklikteki tambura 1 bar basınçta 400 l/saattir. Su sirkülasyon sisteminde 500 L kapasiteli tank ve 300 L kapasiteli tambur bulunmaktadır. Su sirkülasyon sistemindeki boruların çapı 60,30 mm olup, et kalınlığı 3,6 mm ve toplam ısı transfer yüzey alanı 3,6 m² olarak hesaplanmıştır.

Yatak malzemesi olarak kuvars kumu kullanılmıştır. Bu malzemenin yoğunluğu 2330 kg/m³, kütle yoğunluğu ise 1650 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Başlangıçta kullanılan yatak malzemesinin miktarı 60 kg, yüksekliği 0,27 m ve ortalama parçacık çapı 0,344 mm'dir. Kütle hava/yakıt oranı Lgerçek denklemi ($L_{gerçek} = 4,31 \lambda (2,664C + 7,937H + 0,998S - O)$) kullanılarak hesaplanmıştır. Yanma odasının dar iç kısmı (0,23 × 0,54 m) nedeniyle sekonder hava beslemesi yapıldığında, kazan içindeki sıcaklığın hızla düşmesi ve kum sirkülasyonunun bozulması gözlemlenmiştir. Ancak ön hazırlık aşamasında kullanıldığında daha yüksek emisyonlara neden olmuştur. Deneyler belirtilen nedenlerden dolayı ikincil hava beslemesi yapılmamıştır. Akışkanlaştırma ve yanma için kullanılan hava, yanma odasına birincil hava olarak beslenmiştir. Rüzgar kutusu ve dağıtım plakasının kullanımıyla yapılmıştır.



Şekil 4.5. DAYK sisteminin ayrıntılı montaj katı model resmi.

5. ELDE EDİLEN SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Yakıt karışımlarının yanmasından kaynaklanan baca gazındaki emisyonlar

Her bir yakıt karışımı için ölçülen emisyon değerleri, farklı hava fazlalık oranları ($\lambda = 1,2-1,6$) göz önünde bulundurularak incelenmiş ve aşağıda dört ana başlık altında değerlendirilmiştir. Türk Hava Kirliliği Kontrolüne göre Yönetmeliği, linyit ve biyokütle yakılmasından kaynaklı baca gazındaki emisyon değerleri hacimce %6 O₂'ye göre ölçülmelidir. Bu nedenle bu çalışmada hacimce %6 O₂ baz alınarak emisyon değerleri düzeltilerek verilmiştir.

5.1.1. Baca gazındaki CO emisyonları

Bu çalışmada, çeşitli yakıt karışımlarının yanma sürecinde, farklı hava fazlalık oranlarına bağlı olarak ölçülen CO emisyon değerleri sunulmuştur. Genel olarak, hava fazlalık oranı arttıkça CO emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek oksijen miktarı nedeniyle fazla hava oranının artması, kazanda daha verimli bir yanma sağlamış ve CO emisyonlarını düşürmüştür. Bununla birlikte, hava debisinin artırılması, yanma odasının soğumasına neden olabileceğinden, bu durum verimliliğin düşmesine ve CO emisyonlarının dalgalanmasına yol açabilir.

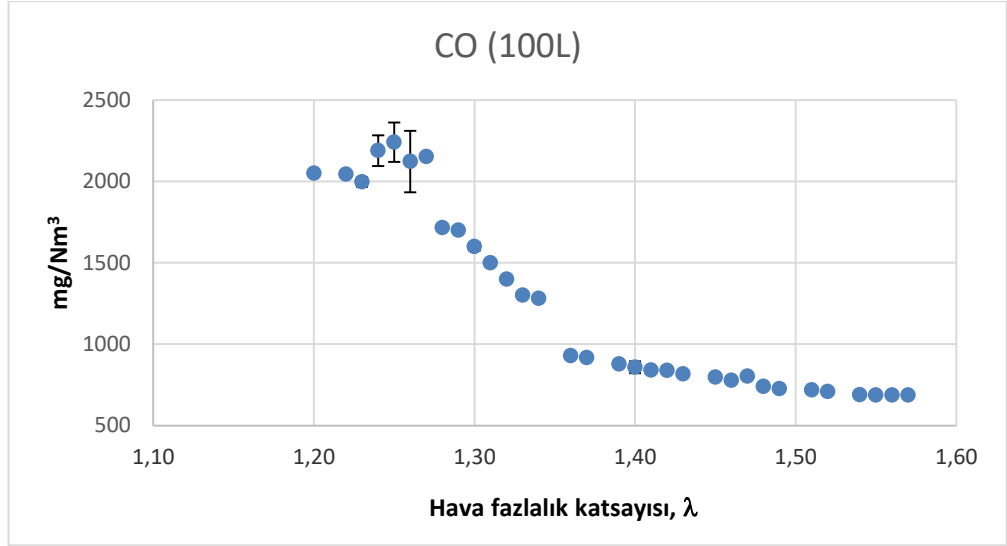
debisinin artırılması, yanma odasının soğumasına neden olabileceğinden, bu durum verimliliğin düşmesine ve CO emisyonlarının dalgalanmasına yol açabilir.

CO emisyonlarındaki dalgalanmaların (hızlı düşüşü durduran) meydana geldiği aşırı hava oranları farklı yakıt karışımlarına göre değişiklik göstermiştir (Şekil 5.1-Şekil 5.3). %100L, %75L-%25TG, %50L-%50TG, %25 L-%75TG ve %100TG karışımları için CO emisyonları sırası ile 2241 ± 121 ile 686 ± 76 mg/Nm³, $1900 \pm 5,7$ ile $599,79 \pm 9,39$ mg/Nm³, $1837 \pm 29,9$ ile $388,7 \pm 4,70$ mg/Nm³, 2200 ± 56 ile $626 \pm 1,30$ mg/Nm³ ve 2470 ± 212 ile $838 \pm 3,75$ mg/Nm³ arasında değişmiştir. Farklı karışımların CO emisyonları incelendiğinde, tavuk gübresi oranının artmasıyla birlikte emisyon seviyelerinin yükseldiği görülmüştür.

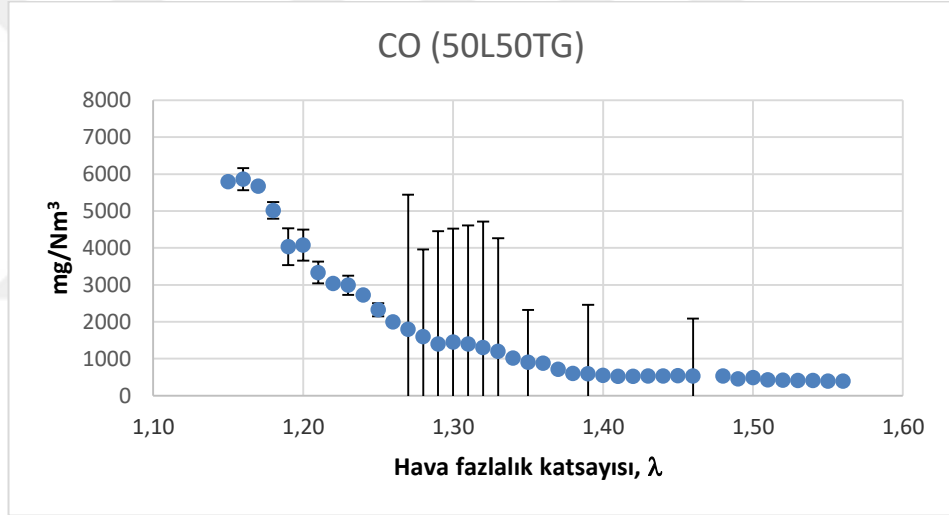
Tavuk gübresi oranı %25'ten %100'e yükseldiğinde, emisyonlar 862 ± 279 mg/Nm³'ten 1471 ± 525 mg/Nm³'e kadar çıkmıştır.

Varol vd. (2014) linyiti tek başına ve ağırlıkça %10, %30 ve %50 oranlarında linyit ve talaş karışımını dolaşımli akışkan yataklı bir yakıcıda yakmıştır. Çalışmada optimum hava fazlalık oranına ulaşıncaya kadar SO₂ ve CO emisyonları azalmış, bir noktadan sonra da emisyonlar artmaya başlamıştır. Fazla hava oranlarının artmasıyla birlikte NO_x emisyonlarında bir artış gözlemlenmiştir. Linyit ve talaş karışımının eklenmesiyle SO₂ emisyonları azalmış, CO emisyonları ise önce düşmüş, ardından artmıştır.

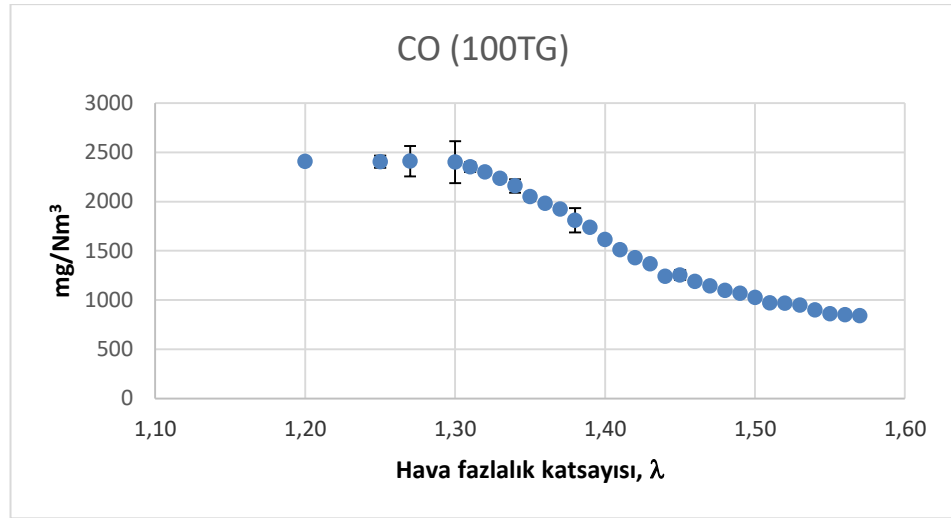
Çalışmada %100L, %75L-%25TG, %50L-%50TG, %25L-%75TG ve %100TG olmak üzere beş farklı yakıt karışımının uçucu madde içerikleri; sırasıyla %36,65, %42,35, %44,51, %48,29 ve %51'dir. Dolayısı ile deney sırasında yakıt karışımlarında tavuk gübresi oranı arttıkça kazandaki uçucu madde içeriği de artmıştır. Odun ve linyit, 700°C ile 900°C arasındaki yanma sıcaklıklarında, hızla CO, H₂ gibi uçucu bileşikler ve hidrokarbon buharları üretmektedir. Uçucu maddelerin buharlaşma hızı ise sıcaklık, oksijen konsantrasyonu ve yakıt türüne bağlı olarak değişir. Uçucu madde oksijen difüzyonu nedeniyle alev aldığından alevler katı yakıt parçacıklarını çevreler ve buharlaşma artar. Ancak, yetersiz oksijen konsantrasyonu nedeniyle uçucu maddeler, parçacıkların etrafında difüzyon alevi olarak yanmaz ve bunların bir kısmı odayı CO olarak terk eder. Bu durumda, yakıt karışımındaki yüksek biyokütle oranı ve düşük hava fazlalığı, çalışmada daha yüksek CO emisyonlarına yol açmıştır.



Şekil 5.1. %100 L yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyonlarına etkisi



Şekil 5.2. %50 L +% 50 TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyonlarına etkisi

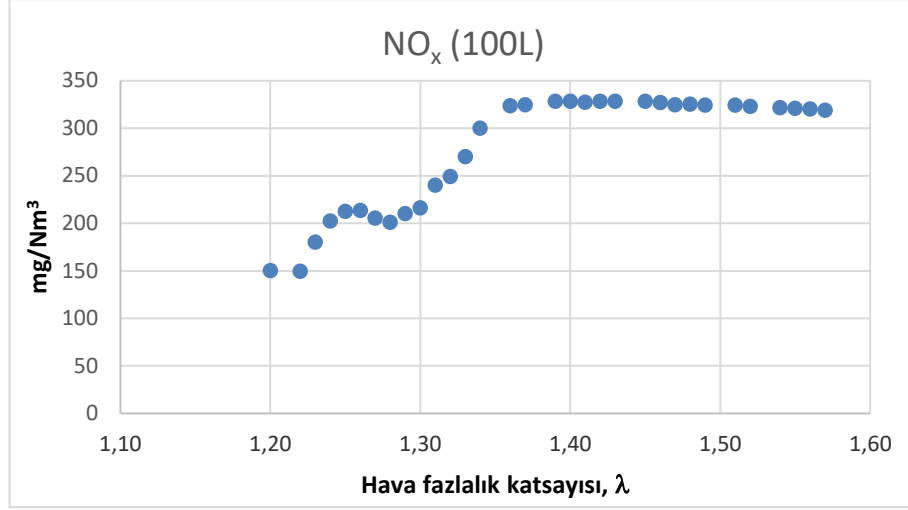


Şekil 5.3. %100 TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranının CO emisyonlarına etkisi

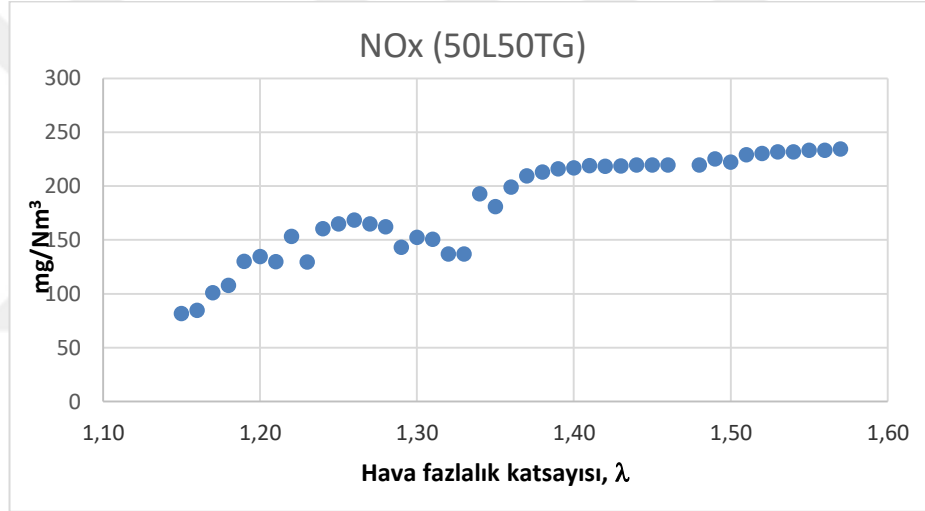
5.1.2. Baca gazındaki NO_x emisyonları

Deneylerde farklı yakıt karışımları için ortalama yatak sıcaklıkları 742°C ile 916°C arasında bulunmuştur. Akışkan yataklı yakma sistemlerinde, NO_x emisyonlarının başlıca kaynağı yakıttaki azottur. Çalışma sıcaklığı ve yakıt karışımlarındaki azotun, NO_x emisyonlarına yol açtığı kabul edilmektedir. Tavuk gübresi ve linyitin azot oranları sırasıyla %4,17 ve %1 olarak tespit edilmiştir.

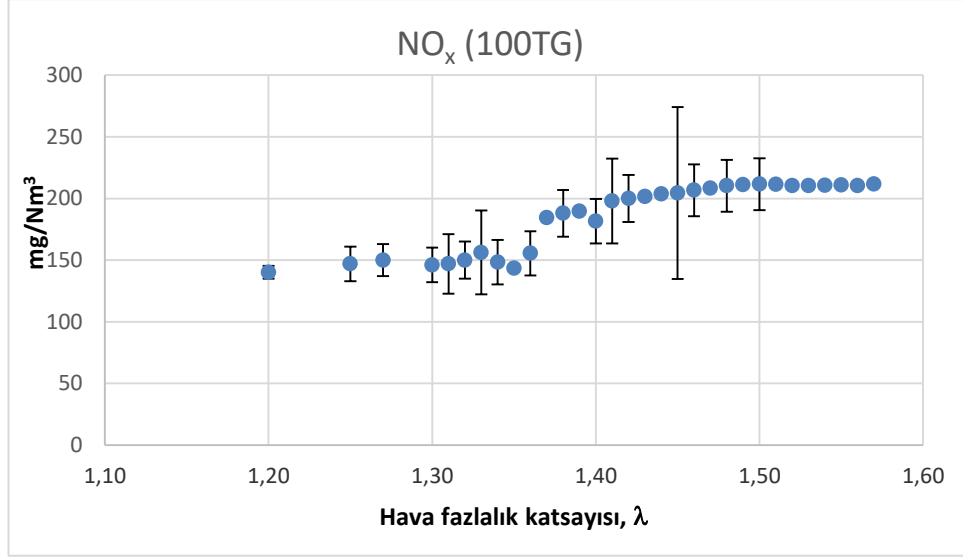
Literatürde artan fazla hava oranı ile daha yüksek (Topal ve ark., 2003, Gungor, 2010) veya daha düşük NO_x emisyonları (Li ve ark., 1998) ölçüldüğü bildirilmesine rağmen, bu çalışmada yakıt karışımındaki biyokütle içeriğinin artmasıyla NO_x emisyonları azalmıştır (Şekil 5.4.-Şekil 5.6.) (Topal ve ark., 2003; Li ve ark., 1998; Gungor, 2010) Dolayısıyla, NO_x emisyonları ile yakıt karışımlarındaki azot içeriği arasında sistematik bir ilişki olmadığı, yani yakıttaki azotun tamamen NO_x'e dönüşmediğinin bir göstergesi olarak değerlendirilebileceği ön görülmüştür (Engin, 2019). Literatürde de benzer sonuçlar gözlemlenmiştir (Zhu ve Lee, 2005; Lupiáñez ve ark., 2015; Engin, 2019).



Şekil 5.4. %100L yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO_x emisyonları



Şekil 5.5. %50L %50TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO_x emisyonları



Şekil 5.6. %100TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre NO_x emisyonları

Yakıt karışımlarında linyitin varlığı eksik yanma olasılığını arttırmaktadır. Bu çalışmada da benzer bir sonuç elde edilmiş ve artan biyokütle oranı ile birlikte daha yüksek CO emisyonları tespit edilmiştir. Bunun sonucunda, CO emisyonlarının arttığı durumlarda NO emisyonlarında bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle, hava fazlalık oranı 1,3'ün altında olduğunda, daha yüksek CO emisyonları ve belirgin şekilde daha düşük NO_x emisyonları kaydedilmiştir. Yüksek hava fazlalık oranı değerleri NO_x oluşum sürecinin gelişimini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir. Başka bir ifadeyle, fazla hava oranı arttıkça, kok yüzeylerinde NO'nun CO tarafından indirgenmesi işlemi zayıflamış ve bu da NO_x emisyonlarının yükselmesine yol açmıştır. Bunun aksine, düşük hava fazlalık oranı değerlerinde ortamda oksijen konsantrasyonu daha düşük olduğundan daha fazla CO üretimi gerçekleşmiştir. Benzer bulgular, önceki araştırmalarda da kaydedilmiştir. CO'nun varlığında NO'nun indirgenmesiyle ilgili öne sürülen bir hipoteze göre, bu durum iki ana faktörden kaynaklanmaktadır.

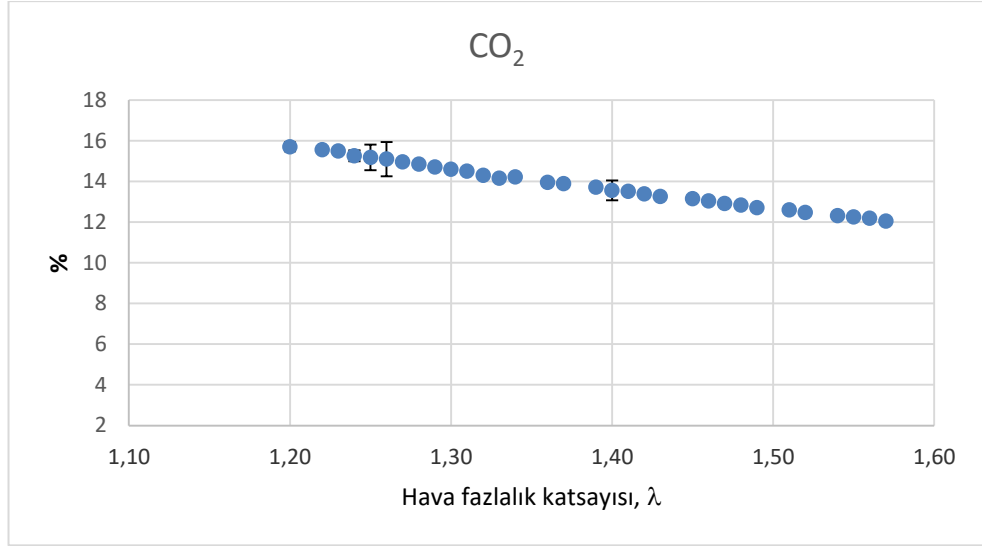
- Birinci sebep NO'nun CO ile katalitik reaksiyona girmesidir.
- İkinci neden ise CO'nun NO'dan kaynaklanan ve parçacık yüzeyinde kimyasal olarak adsorbe edilen oksijen ile reaksiyona girerek NO'nun azalmasına yol açan aktif bölgelerin oluşmasıdır. Her iki durumda da NO, N₂'ye indirgenir. Literatürde, %3 CO içeren bir atmosferde karbon ile NO

arasındaki reaksiyonun, CO içermeyen bir atmosfere kıyasla üç kat daha fazla olabileceği belirtilmektedir.

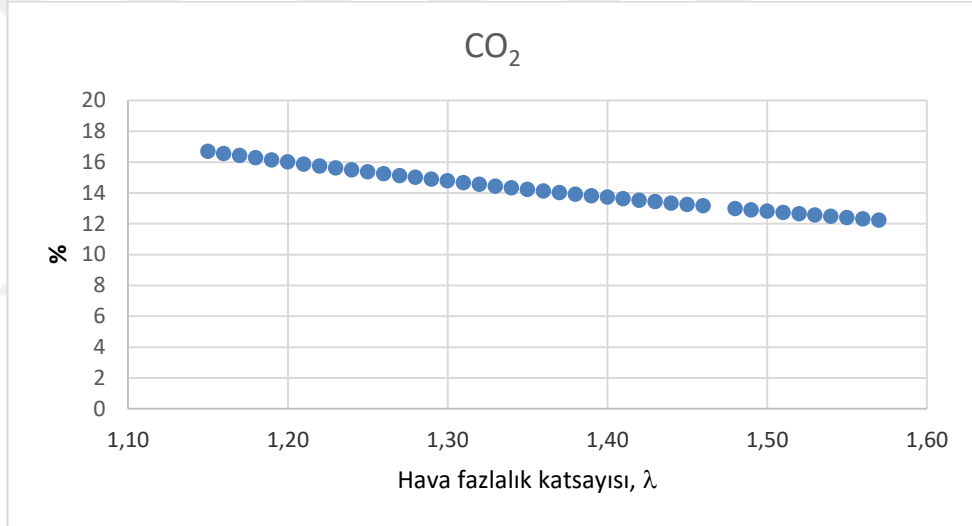
Engin (2019), 19 farklı yerli Türk linyitinin DAYK sisteminde yakılmasını incelemiş ve NO_x emisyonlarının yaklaşık 100 mg/Nm³ ile 700 mg/Nm³ arasında değiştiğini gözlemlemiştir. Roy ve Bhatta-charya (2014), linyitin 10 kWth akışkan yatakta hava ve oksidasyon koşulları altında yanması durumunda NO_x emisyonunu araştırmış ve 500 ile 600 mg/Nm³ arasında değiştiğini belirtmiştir. Varol ve ark. (2014), linyit, orman atıkları ve bu iki yakıtın karışımlarının dolaşımli akışkan yatakta yanmasını incelemişlerdir. Yaptıkları ölçümlerde, linyit yanarken baca gazlarındaki ortalama NO_x emisyonlarının 292 mg/Nm³ olduğunu, biyokütle ve linyit karışımının yanması durumunda ise bu değer 262-374 mg/Nm³ arasında değiştiğini bulmuşlardır. Bir modelleme çalışmasında, üç farklı düşük kaliteli linyitin DAYK sisteminde yanmasıyla ilgili yapılan hesaplamalar, NO_x emisyonlarının 100 ile 700 mg/Nm³ arasında değiştiğini göstermektedir. Çalışma, NO_x emisyonlarının hava fazlalık oranı ve linyitin tane boyutuna bağlı olarak değiştiğini, bu parametrelerin artışıyla emisyonların azaldığını ortaya koymuştur. Dolayısıyla, bu çalışmanın NO emisyon sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

5.1.3. Baca gazındaki CO₂ emisyonları

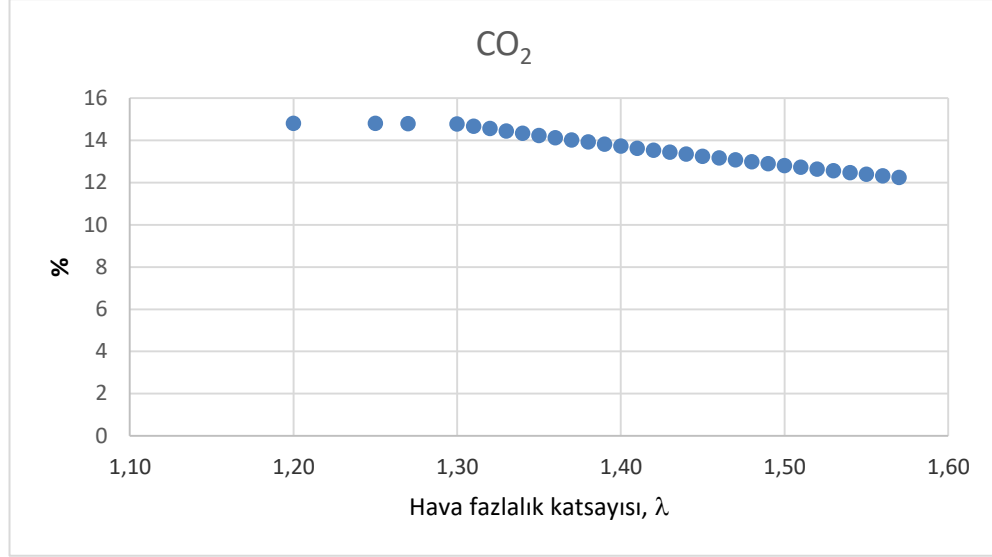
Yakıt karışımındaki tavuk gübresine göre ortalama CO₂ değerleri Şekil 5.7-Şekil 5.9'da verilmiştir. Ölçülen CO₂ emisyonlarının birbirine yakın olduğu ve %13,28 (%100 L için) ile %13,45 (%25L+%75TG) arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.7. %100L yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO₂ emisyonları



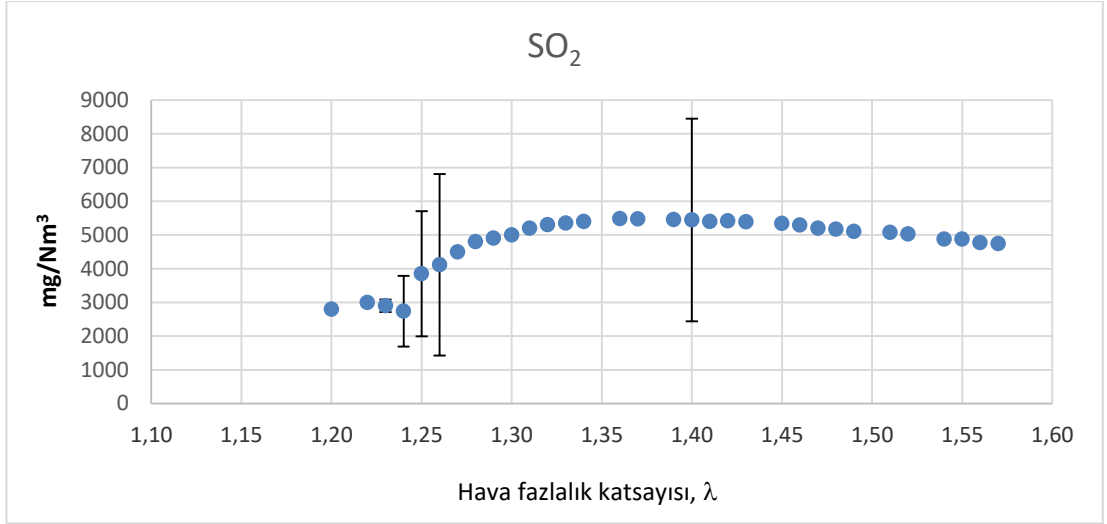
Şekil 5.8. %50L%50TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO₂ emisyonları



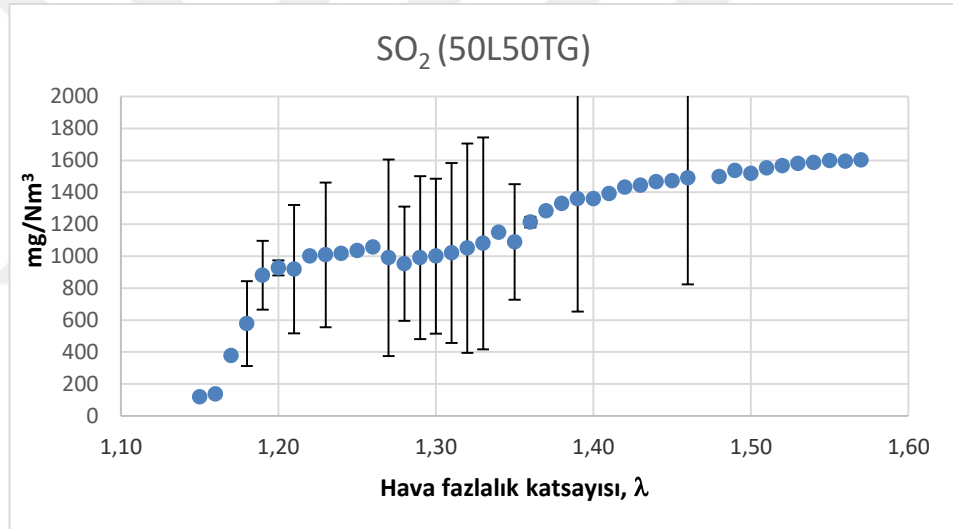
Şekil 5.9. %100TG yakıtın yanması durumunda hava fazlalık katsayısına oranlarına göre CO₂ emisyonları

5.1.4. Baca gazındaki SO₂ emisyonları

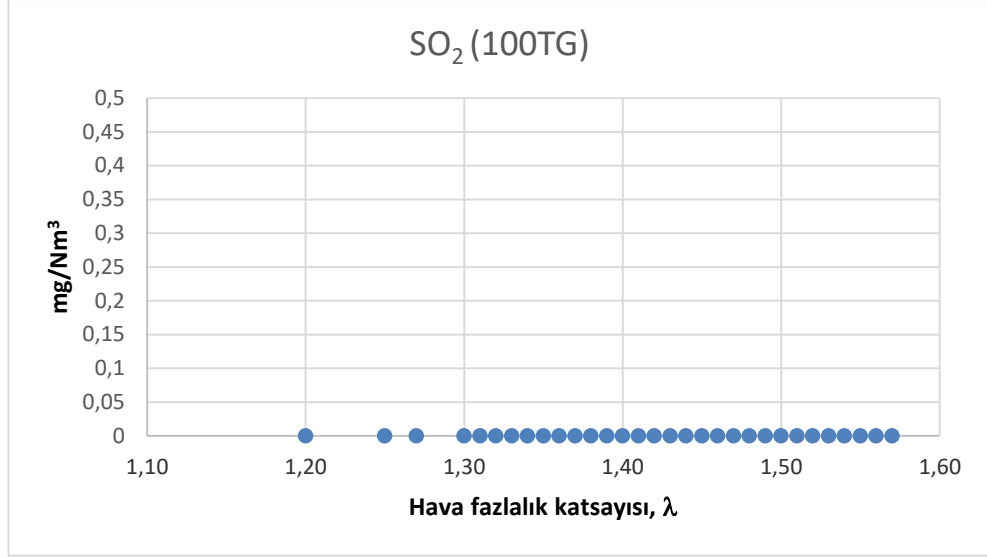
100L, 75L25TG, 50L50TG, 25L75TG ve 100TG için ortalama SO₂ emisyonları sırasıyla 4794, 3262, 1272, 863 ve 587 mg/Nm³'tür. SO₂ emisyonları 1,25 hava fazlalık oranı 1,25'e kadar hafifçe azalmış, 1,3'ten sonra hızla artmış ve daha yüksek fazla hava oranları için stabilize olmuştur (Şekil 5.10-Şekil 5.12). Fazla hava, kazan sıcaklığını etkileyerek dolaylı yoldan SO₂ emisyonlarını da etkileyebilir (Varol ve ark., 2014). Engin (2019), DAYK sisteminde 19 farklı linyit türünün yanmasını incelemiş ve SO₂ emisyonlarının 1100 ile 10000 mg/Nm³ arasında değiştiğini bulmuştur. Diğer yandan, Varol ve arkadaşları (2014), DAYK sisteminde çeşitli fazla hava oranlarında yerli linyit yakarak, kireçtaşı katkısı olmadan SO₂ emisyonlarının 3022 ile 3585 mg/Nm³ arasında değiştiğini raporlamıştır. Dolayısıyla bu çalışmadaki Kale linyitinin kireçtaşı ilavesiz SO₂ emisyonları literatürle uyumludur.



Şekil 5.10. %100L yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO₂ emisyon değerleri



Şekil 5.11. %50L%50TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO₂ emisyon değerleri



Şekil 5.12. %100TG yanması için hava fazlalık katsayısına oranına göre SO₂ emisyon değerleri

Çalışmada, yakıt karışımlarında linyit oranı %0, %25 ve %50 olduğunda SO₂ emisyonlarının 2000 mg/Nm³'ün altında kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yalnızca tavuk gübresi kullanıldığında SO₂ emisyonlarının sıfır olarak ölçüldüğü bulunmuştur. Bunun nedeni muhtemelen tavuk gübresindeki yanıcı kükürt içeriğinin düşük olması ve külündeki alkali oksit miktarının linyite kıyasla daha yüksek olmasıdır (Engin, 2019). Yakıttaki kükürtün bir kısmının SO₂'ye dönüşmesi ve yanma sırasında oluşan SO₂'nin bir kısmının kül tarafından adsorbe edilmesi, birçok çalışmada vurgulanan bir durumdur (Fleig ve ark., 2011; Belo ve ark., 2014). Akışkan yataklı yakma sistemlerinde ise SO₂'yi en etkili şekilde tutabilen başlıca oksitler CaO ve Fe₂O₃'tür (Engin, 2019). Dolayısıyla oluşan küllerin yanma sırasında sülfür dioksiti absorbladığı düşünülmektedir. Kükürt emisyonlarının ölçülemeyecek kadar düşük olmasının sebeplerinden biri, DAYK sisteminde yakıt karışımının yanması sırasında kazanda meydana gelen külün alkali bileşikler içermesidir. Bir diğer etken, tavuk gübresinin düşük sülfür içeriğine sahip olmasıdır. Bu durum, yanma sırasında yakıttaki tüm sülfürün SO₂'ye dönüşmesinin engellenmesine neden olmaktadır.

Deneylerde ölçülen kükürt dioksit emisyonlarını azaltmak amacıyla yakıt karışımlarına kireç taşı eklenmiş ve bu sayede SO₂ emisyonlarının %100 linyit (%100L) için yaklaşık 560 mg/Nm³ ile %100 tavuk gübresi (%100 TG) için 0

mg/Nm³ arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Kireçtaşı kullanıldığında, %100L, %75L-%25TG, %50L-%50TG ve %25L-%75TG yakıt karışımlarının yakılması sırasında oluşan SO₂ emisyonlarında kükürt giderme oranları sırasıyla yaklaşık %83,5, %83,3, %75,6 ve %76,3 oranında iyileştirilmiştir.

Çalışmada, farklı yakıt karışımları için hesaplanan ortalama yanma verimliliği değerleri de ortaya konmuştur. Tavuk gübresi (TG) oranı %0, %25 ve %50 olduğunda, yanma verimliliği sırasıyla %85,98±0,71, %86,93±2,06 ve %86,99±0,84 olarak ölçölmüştür. Ancak tavuk gübresi ağırlıkça %75 oranında karıştırıldığında verim artmış ve %91,34±2,17 olmuştur. Yakıt olarak tamamen tavuk gübresi (%100) kullanıldığında en yüksek ortalama verim değeri %94,64±0,72 olmuştur. Çalışmada, ölçölen emisyonlar ve yakıt oranları göz önüne alındığında, madde dengesi ile birlikte reaksiyon denge termodinamiği ve seğiciliğin de hem emisyon değerleri hem de verimlilik üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir.

5.2. Pratik Çıkarımlar ve Sınırlamalar

Büyükbaş, küçükbaş ve tavukçuluk işletmelerinde üretilen gübrelerin depolanma süresi genellikle 4-6 ay ile sınırlıdır. Tavuk gübresi, tarımda gübre olarak kullanılabilir, ancak çiftliklerde üretilen miktar, tarım sektörünün gübreye duyduğu ihtiyacın çok üzerindedir. Bu nedenle, gübrenin belirtilen limitleri aşmadan imha edilmesi, depolama sınırlarına uyulması, çevresel rahatsızlıkların engellenmesi, toprak, su ve hava kirliliğinin önlenmesi ve atık yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, atıkların etkili bir şekilde bertarafı için modöler bir yakma sistemi önerilmiştir. Çiftliklerde atık azaltılırken, tavuk gübresi ve linyitin birlikte yakılmasıyla termal enerji ihtiyacının karşılanabileceği ön görölmektedir. Gelecek çalışmalarda ayrıca sisteme fotovoltaik paneller eklenerek elektrik ihtiyacının karşılanabileceği de ön görölmektedir. Böylece tarım arazisi seğiminde iletim hatlarına yakınlığın dikkate alınmasına gerek kalmayacağı düşünölmektedir. Elektriğin üretildiği yerde tüketilmesi halinde, elektriğin iletim ve dağıtımında meydana gelen kayıplardan kaynaklanan emisyonların da ortadan kaldırılabileceği ön görölmektedir. Ayrıca, çiftliklerin atık yönetimi ve enerji ihtiyaçlarını

karşlamak için yakma sistemlerinin kurulumu, devlet politikaları aracılığıyla teşvik edilmelidir. Bu yaklaşım, hayvancılıkla ilgili karbon ayak izinin azaltılmasına da katkı sağlayabilir.

Bu çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır ve bu sınırlamalar, gelecekte yapılacak araştırmalarla aşılabılır.

İlk sınırlama, yanma kazanının kare şeklinde tasarlanmış olmasıdır. Önceki araştırmalar, küçük kapasiteli termokimyasal sistemler için silindirik kazanların daha verimli olacağını önermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada silindirik bir kazan kullanılsaydı, yanma odasında ikincil havanın daha homojen bir şekilde dağıtılacağı ve bu sayede daha yüksek yanma verimliliği ve daha düşük emisyonların elde edilebileceği öngörülmektedir.

Ancak çalışmada kazanın yanma odası tek parça olarak kompakt refrakterden döküldüğü için üretim süreci daha kolay hale getirilmiş ve üretim maliyetleri daha düşük tutulmuştur. Buna göre biyokütle yakan bu tasarım sayesinde gelişmekte olan bölgeler/ülkeler için uygun maliyetli, güvenilir ve sürdürülebilir bir yakma sistemine erişimin sağlanabileceği varsayılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci sınırlılığı, otomasyon sisteminin eksikliğidir. Geliştirilen sistemde, yanma kontrolünü sağlamak için bir oksijen sistemi ve buna bağlı bir otomasyon sistemi bulunmamaktadır. Bu nedenle, yanma kontrolü, besleme ve fan sistemlerinin sürücülerinin yardımıyla manuel olarak yapılmaktadır. Bu durum, mevcut sistemin zaman zaman beklenen verimlilikte çalışmamasına ve ölçülen emisyon değerlerinin (büyük standart sapmalarla) sınır değerlerin üzerinde olmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, gelecekteki termokimyasal sistem tasarımlarında, yanma kontrolünün sağlanması, standartlar ve emisyon değerleri açısından önemli bir rol oynamaktadır. Muhtemelen bu sorundan dolayı tasarlanan DAYK sistemi ile tüm yakıt karışımlarında CO emisyonlarının Endüstriyel Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde verilen sınır değerden (200 mg/Nm^3) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan tüm karışımlarda SO_2 değerleri sınır değerin (2000 mg/Nm^3) çok altında ölçülmüştür. Bu çalışmanın bir diğer sınırlaması, yönetmelikte nominal ısı gücü 500 kWth 'ın altında olan katı yakıt yakma tesisleri için NO_x emisyonlarıyla ilgili

belirlenmiş bir sınır değerin bulunmamasıdır. Ancak, bu çalışmada yapılan ölçümler, tüm yakıt karışımları için NO_x emisyonlarının 300 mg/Nm³'ün altında kaldığını göstermektedir.

Üçüncü sınırlama, deneylerin süresiyle ilgilidir. Bu çalışmada, her bir yakıt karışımı için ölçümler toplamda 90 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Malzeme hazırlığı ve taşınmasının uzun sürmesi nedeniyle, kazan daha uzun süre çalıştırılamamıştır. Bu nedenle, enerji verimliliğini artırmaya yönelik daha uzun ve daha stabil işletme koşullarında daha düşük emisyon değerlerinin elde edilmesi beklenmektedir.

Dördüncü sınırlama, kül tahliye sistemine bağlıdır. Tasarlanan sistemde kül, kazanın tabanından uzaklaştırılmaktadır; ancak tavuk gübresinin topaklanması nedeniyle kül giderme sisteminde zaman zaman aksaklıklar yaşanmakta ve bu durum işletme verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu sorunun, gelecekteki sistemlerde besleme sisteminin üst kısmına eklenen ilave kül giderme sistemleriyle çözülebileceği düşünülmektedir.

Son olarak, yanma için kullanılan hava sisteminin bir sınırlama oluşturduğunu söylemek mümkündür. Eğer oksijen-yakıt sistemi kullanılsaydı, CO emisyonlarının daha da azaltılabileceği ve gelecekte daha yüksek CO₂ emisyonlarının yakalanıp depolanabileceği öngörülmektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, tasarım sonucu üretilen dolaşımli akışkan yataklı bir kazanda (DAYK) tavuk gübresi ve linyit karışımları yakılmıştır. Kare şeklinde tasarlanmış, üretilmiş kazan ve CO, CO₂, NO_x ve SO₂ emisyonları açısından test edilmiştir. Araştırmadan elde edilen en önemli sonuçlar şu şekildedir:

- Tavuk gübresi oranı arttıkça, yatak sıcaklığında bir azalma gözlemlenmiş ve bunun sonucunda yanma verimi %85,98±0,71'den %94,64±0,72'ye yükselmiştir.
- Tavuk gübresi oranlarının artmasına ve hava fazlalık oranlarının azalmasına bağlı olarak CO emisyonları artış göstermiştir. %100 linyit (L) için CO emisyonları 726±76 ile 2241±121 mg/Nm³ arasında değişirken, %100 tavuk gübresi (TG) için bu değerler 838±3,75 ile 2450±212 mg/Nm³ arasında değişmiştir.
- Tavuk gübresinin hem kömür yüzdesi hem de azot içeriği linyite göre daha yüksek olmasına rağmen, yakıt karışımındaki biyokütle içeriğinin artmasıyla NO_x emisyonları azalmıştır. Aşırı hava oranı arttıkça tüm karışımlarda NO_x emisyonları da artmıştır. NO'nun CO ile indirgenme sürecinden dolayı NO_x emisyonları %100 L için 276,3 mg/Nm³ olarak ölçülürken, %100 TG için 177,5 ile 240 mg/Nm³ arasında ölçülmüştür. CO₂ emisyon değerleri benzer şekilde yakın olup, %13,10 ile %13,44 arasında değişiklik göstermektedir.
- Linyitin kükürt içeriği, tavuk gübresine kıyasla yaklaşık üç kat daha yüksek olmasına rağmen, tavuk gübresi oranı arttıkça SO₂ emisyonlarında bir azalma gözlemlenmiştir. %100 TG ve kireç ilavesiz TG karışımları için SO₂ emisyonları 0 ile 3260 mg/Nm³ arasında değişmiştir. %100 linyit kullanıldığında, SO₂ emisyonları 5200 mg/Nm³ olarak ölçülmüştür.
- Biyokütle oranı arttıkça, kükürt içeriği düşerken yanma verimi artmıştır. Düşük yoğunluklu biyokütlenin linyit ile karıştırılmasıyla yanma verimi arttırılmıştır.

- Yakıt karışımlarının hem ölçülen emisyon hem de verim değerlerinde maddelerin madde dengesinin yanı sıra reaksiyon dengesi termodinamiği ve seçiciliğin de etkili olacağı düşünülmüştür.

Geliştirilen yakma sistemi, atık bertarafını sağlamakla birlikte, aynı zamanda Endüstriyel Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde belirtilen emisyon sınır değerlerine ulaşarak emisyon azaltımı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bu şekilde tavuk gübresinin çevreye atılması sonucu sera gazlarının en önemlilerinden biri olan amonyak ve metan gibi gaz emisyonlarının da önemli ölçüde azaltılabileceği varsayılmaktadır. Bu DAYK sisteminin deneysel olarak incelenmesi, gelecekteki araştırmalara rehberlik edebilir. Gelecek çalışmalarda, mevcut sistemin enerji gereksinimlerinin fotovoltaiik panellerle karşılanması önerilmektedir. Böylece, şebekeden uzak çiftliklerin operasyonel enerji gereksinimleri daha ekonomik, yenilenebilir ve kaliteli bir şekilde karşılanabilir. Ayrıca, geliştirilmiş yanma sistemlerinde, yanma havası yerine oksiyakıt sistemlerinin kullanılmasıyla verimliliğin artırılabilirliği düşünülmektedir. Bu doğrultuda, gelecekte bu alanlarda daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir. Genel olarak, bu çalışma, DAYK sistemi ile atık azaltımı ve emisyonların düşürülmesine yönelik yatırımlar için örnek teşkil edebilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

- Abu-Qudais M., 1996. "Fluidized-bed combustion for energy production from olive cake", *Energy*, Vol.21, Issue3, pp. 173-178
- Armesto L., Bahillo A., Cabanillas A., Veijonen K., Otero J., Plumed A. And Salvador L., 2003. "Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed", *Fuel*, In Press, Corrected Proof
- Armesto L., Bahillo A., Cabanillas A., Veijonen K., J. Otero, 2002. "Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidized bed", Vol.23, pp.171-179
- Arvelakis S., Vourliotis P., Kakaras E. and Koukios E. G., 2001. "Effect of leaching on the ash behavior of wheat straw and olive residue during fluidized bed combustion", *Biomass and Bioenergy*, Vol.20, Issue6, pp. 459-470
- ASME, 1983. ASME MFC-2M "Measurement Uncertainty for fluid flow in Closed Conduits"
- ASTM, 1986. ASTM D 2795-86 "Standard test method for analysis of Coal and Coke ash"
- ASTM, 1987. ASTM E 711-87 "Standard test method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter"
- ASTM, 1987. ASTM E 775-87 "Standard test method for Total Sulfur in the analysis Sample of Refuse-Derived Fuel"
- ASTM, 1987. ASTM E 777-87 "Standard test method for Carbon and Hydrogen in the analysis Sample of Refuse-Derived Fuel"
- ASTM, 1987. ASTM E 778-87 "Standard test method for Nitrogen in the analysis Sample of Refuse-Derived Fuel"
- Atımtay A., 1980. "Combustion of volatile matter in fluidized beds" pp. 159-166 in *Fluidization*, J.R. Grace and J.M. Matsen, Eds., Plenum Press, New York
- Atımtay A., Yurdakul S., 2020. Combustion and Co-Combustion characteristics of torrefied poultry litter with lignite, *Renew Energy*, 148, pp. 1292-1301, 10.1016/j.renene.2019.10.068
- Bakker Robert R., Jenkins Bryan M. and Williams Robert B., 2002. "Fluidized Bed Combustion of Leached Rice Straw", *Energy & Fuels*, Vol.16(2), pp. 356-365.
- Baumbach G., 1996. "Air Quality Control", Springer-Verlag, New York.
- Belo L.P., Spörl R., Shah K.v., Elliott L.K., Stanger R.J., Maier J., et al. 2014. Sulfur capture by fly ash in air and oxy-fuel pulverized fuel combustion, *Energy Fuel*, 28, pp. 5472-5479, 10.1021/ef500855w

- Bhattacharya S.C., Salam P.Abdul, Sharma Mahen, 2000. "Emissions from biomass energy use in some selected Asian Countries", *Energy*, Vol.25, pp. 169-188
- Bravo J.A.G., Garcia, R., Cadena E., Flexible Co-combustion of high ratios of sustainable biomass with coal in oxy-CFB boiler for CO₂ capture, *J Power Energy Eng*, 6 (2018), pp. 12-22, 10.4236/jpee.2018.611002
- Chagger H.K., Kendall A., McDonald A., Pourkashanian M., Williams A., 1998. "Formation of dioxins and other semi-volatile organic compounds in biomass combustion", *Applied Energy*, Vol.60, pp. 101-114
- Cliffe K. R. and Patumsawad S., 2001. "Co-combustion of waste from olive oil production with coal in a fluidised bed", *Waste Management*, Vol.21, Issue1, pp. 49-53
- Coombs J., 1996. "Bioconversion Assessment Study", CPL Scientific Ltd, UK (Air-CT92-8007)
- Cui Y., W. Zhong, X. Liu, J. Xiang, Study on scale-up characteristics in supercritical CO₂ circulating fluidized bed boiler by 3D CFD simulation, *Powder Technol*, 394 (2021), pp. 103-119, 10.1016/j.powtec.2021.08.028
- Demirbaş A., 2003. "Sustainable co-firing of biomass with coal", *Energy Conversion and Management*, Vol.44, Issue9, pp. 1465-1479
- Engin, B. 2019. Investigation of air, oxygen-enriched air and oxy-combustion characteristics of lignites in circulating fluidized bed, PhD. İstanbul Technical University, Natural and Applied Science.
- EU, 1999. "Biomass Conversion Technologies", EUR 18029 EN ISBN 92-828-5368-3.
- Fleig D., Andersson K., Johnsson F., Leckner B. Conversion of sulfur during 2011. Pulverized oxy-coal combustion, *Energy Fuel*, 25 (2011), pp. 647-655, 10.1021/ef1013242
- General Energy Situation of Turkey, <http://www.enerji.gov.tr/Enerji.html>
- Gungor A., 2010. Simulation of emission performance and combustion efficiency in biomass fired circulating fluidized bed combustors, *Biomass Bioenergy*, 34, pp. 506-514
- Gürel B., Yurdakul S., Kurtuluş K., Önür E., Akman R., Varol M., Gürbüz H., 2022. "Tavuk Gübresinin Kale Linyiti ile 500 kWth'lık Dolaşım Akışkan Yatakta Yakılması Sırasında Oluşan Bazı Emisyonların Ön Araştırması" Unpublished Report.
- Hughes E., 2000. "Biomass cofiring: economics, policy and opportunities", *Biomass and Bioenergy*, Vol.19, Issue 6, pp 457-46

- IEA Clean Coal Combustion Database, <http://www.iea-coal.org.uk/CCTdatabase/fbc.htm>
- Jacobs Jörn P., 1999. "The future of fluidized-bed combustion", Chemical Engineering Science, Vol.54, Issue22, pp.5559-5563
- John H., Swanson Michael L., Weber Greg F. and Zygarlicke Christopher J., 2001. "Review of advances in combustion technology and biomass cofiring", Fuel Processing Technology, Vol.71, Issues1-3, pp. 7-38
- Kakaras E., Vourliotis P., Grammelis P. and Vamvuka D., 1999. "Fossil fuels combined combustion with biomass in a fluidised bed combustor", Mediterranean Combustion Symposium-99, Turkey
- Klass Donald L., 1998. "Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals", Academic Press, London.
- Korbitz W., 1998. "From the field to the fast lane-biodiesel", Renewable Energy World, Vol.1, No.3, pp.32-37.
- Kouprianov V.L and Permehart W., 2003. "Emissions from a conical FBC fired with a biomass fuel", Applied Energy, Vol.74, Issues 3-4, pp. 383-392
- Kunii D. and Levenspiel O., 1991. "Fluidization Engineering", 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Laursen K. and Grace J.R., 2002. "Some implications of co-combustion of biomass and coal in a fluidized bed boiler", Fuel Processing Technology, Vol.76, Issue 2, pp. 77-89
- Leckner B. and Lyngfelt A., 2002. "Optimization of emissions from fluidized bed combustion of coal, biofuel and waste", International Journal of Energy Research, Vol.26, pp.1191-1202
- Li, Y.H., Lu, G.Q., Rudolph, V., 1998. The kinetics of NO and N₂O reduction over coal chars in fluidised-bed combustion, Chem Eng Sci, 53 (1998), pp. 1-26
- Liu D. C., Mi T., Shen B. X., and Feng B., 2002. "Reducing N₂O Emission by Co-Combustion of Coal and Biomass", Energy & Fuels, Vol.16, pp.525-526
- Liu X., Luo Z., Yang X., Xie, G., Yu Y, Yu C., Effect of limestone addition on no emission during petroleum coke combustion in CFBB, Fuel, 270 (2020), 10.1016/j.fuel.2020.117475
- Lobert J.M., Scharffe D.H., Hao W.M., Kuhlbusch T.A., Seuwen R., Warnesk P. And Crutzen P.J., 1991. "Experimental evaluation of biomass burning emissions: Nitrogen and carbon containing compounds", In J. S Levine (ed.), Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, MIT Press, Cambridge, pp 41-46

- Lupiáñez C., Guedea I., Bolea I., Díez L.I., Romeo L.M. 2013. Experimental study of SO₂ and NO_x emissions in fluidized bed oxy-fuel combustion, *Fuel Process Technol*, 106 (2013), pp. 587-594, 10.1016/j.fuproc.2012.09.030
- Marcus Ö. And Anders N. 2000. "Bed agglomeration characteristics during fluidized bed combustion of biomass fuels", *Energy & Fuels*, Vol.14 pp. 169-178
- Mastral A.M., Callen M. S., and Garcia T., 2000. "Fluidized Bed Combustion (FBC) of Fossil and Nonfossil Fuels A Comparative Study", *Energy & Fuels*, Vol.14(2), pp. 275-281.
- McKendry P., 2002a. "Review paper: Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass", *Bioresource Technology*, Vol.83, pp. 37-46
- McKendry P., 2002b. "Review paper: Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies", *Bioresource Technology*, Vol.83, pp. 47-54
- Nuber F., 1967. "Waernetehnsche Berechnung der Feuerunds-und Dampfkessel-Anlagen"
- Obernberger I. and Narodoslowsky M., 1996. "From waste to raw material – therote from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.50, pp. 157-168.
- Obernberger I., Biedermann F., Widmann W. and Riedl R., 1997. "Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions", *Biomass and Bioenergy*, Vol.12, No.3, pp. 211-224.
- Obernberger Ingwald, 1998. "Decentralized biomass combustion: state of the art and future development", *Biomass and Bioenergy*, Vol.14, Issue1, pp. 33-56
- Patumsawad S. and Cliffe K. R., 2002. "Experimental study on fluidised bed combustion of high moisture municipal solid waste", *Energy Conversion and Management*, In Press, Uncorrected Proof
- Pope M., 2002. "Fluidized-bed combustion", AccessScience, McGraw Hill, <http://www.accessscience.com/>
- Ryabov G.A., Cofiring of coal and fossil fuels is a way to decarbonization of heat and electricity generation, *Therm Eng*, 69 (2022), pp. 405-417, 10.1134/S0040601522060052
- Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef, S., A review on biomass as a fuel for boilers, *Renew Sustain Energy Rev*, 15 (2011), pp. 2262-2289, 10.1016/j.rser.2011.02.015
- Scala Fabrizio, Salatino Piero, Chirone Riccardo, 2000. "Fluidized Bed Combustion of a Biomass Char (Robinia pseudoacacia)", *Energy & Fuels*, Vol.14(4), pp. 781-790.

- Shen, B. X. Mi T., Liu D. C., Feng B., Yao Q. and Winter Franz, 2002, "N₂O emission under fluidized bed combustion condition", Fuel Proccessing Technology, In Press, Uncorrected Proof Sondreal Everett A., Benson Steven A., Hurley John P., Mann Michael D., Pavlish
- Tchobanoglous George, Theisen Hilary, Vigil Samuel, 1993. "Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues", International Edition, McGraw Hill, Inc, New York
- Tillman D. A., 1991. "The combustion of solid fuels and wastes", Academic Press, Inc., San Diego.
- Tillman D. A., 2000. "Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences", Biomass and Bioenergy, Vol.19, Issue6, pp. 365-384
- Topal H., Taner T., Altinsoy Y. 2018. Amirabedin, Application of trigeneration with direct co-combustion of poultry waste and coal a case study in the poultry industry from Turkey, Therm Sci, 22, pp. 3073-3082, 10.2298/TSCI170210137T
- Topal, H., Atimtay, A.T., Durmaz, A. 2003. Olive cake combustion in a circulating fluidized bed, Fuel, 82 (2003), pp. 1049-1056, 10.1016/S0016-2361(02)00404-0
- Yurdakul S., 2016. Determination of co-combustion properties and thermal kinetics of poultry litter/coal blends using thermogravimetry, Renew Energy, 89, pp. 215-223, 10.1016/j.renene.2015.12.034
- Zhu S, Lee S.W. 2005. Co-combustion performance of poultry wastes and natural gas in the advanced Swirling Fluidized Bed Combustor (SFBC), Waste Manag, 25 (2005), pp. 511-518, 10.1016/j.wasman.2004.09.003