



TİCARİ BİYOKÜTLE YAKMA SİSTEMLERİNDE KÜL KAYNAKLI PROBLEMLER ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Anıl BADEM^{*1}, Prof. Dr. Hayati OLGUN²

¹ Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, Enerji Teknolojisi, İzmir
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-9492-9819>

² Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1777-2010>

Anahtar Kelimeler

Öz

Biyokütle, katı biyoyakıtlar, yakıt kalitesi, eriyebilirlik, cürufanma, kirlenme, korozyon

Biyokütle enerji uygulamalarında kullanılan ticari teknolojilerin başında biyokütle yakma sistemleri gelmektedir. Orman kökenli biyokütlelerin ticari yakma sistemlerinde yakılması bilinen ve kanıtlamış bir teknoloji olmakla birlikte tarımsal atıklarının yakılması orman kökenli yakıtlara göre çok daha sorunlu olabilmektedir. Bu sorunlar; yakma sistemlerinin tasarımından, işletme koşullarına ve burada yakılacak biyokütlelerin türüne, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Bu sorunların başında, sistemin düzenli ve sürekli çalışmasını etkileyerek plansız duruşlara neden olan sinterleşme, aglomerasyon, cürufanma, korozyon gelmektedir. Bu çalışmada, bu sorunları önceden analiz etmek üzere literatürde yaygın olarak kullanılan kömür küllerinin indislerinin biyokütle külü üzerindeki uygulanabilirliği incelenmiştir. Açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle hammaddesi (saz kamışı, mısır sapı, çam kapağı, kavak kapağı, ağaç kökü) silolarından iki farklı zaman diliminde alınan numunelerde kül mineral içeriği, klor içeriği, kükürt içeriği ve kül ergime sıcaklığı analizleri yapılarak indis hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Böylece biyokütle yakıtlarından kaynaklı sorunların depolama koşullarına bağlı değişimleri de incelenmiş olacaktır. Yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda biyokütle külünün kömürden önemli ölçüde farklı olması ve biyokütle hammaddelerinin heterojen yapısı nedeniyle kömüre özgü literatürde verilen indisler arasında herhangi bir ilişki veya öngörü net olarak ortaya konulamamıştır. Elde edilen çelişkili sonuçlar, bu indislerin oluşturulması veya doğrulanması için gerçek koşullar altında daha fazla araştırma ve deneysel testlerin gerekliliğini göstermektedir. Biyokütle yakıtlarının heterojen yapısı ve fizikokimyasal karakterizasyonu dikkate alınarak gerçek yanma deneyimlerine dayalı daha çok deneysel sonuçların birlikte değerlendirilmesine ihtiyaç duyulacağı görüşüne varılmıştır.

* anilbadem@gmail.com
doi : 10.46399/muhendismakina.1388609

AN ASSESSMENT ON ASH-RELATED ISSUES IN COMMERCIAL BIOMASS COMBUSTION SYSTEMS

Keywords

Biomass, solid biofuels, fuel quality, fusibility, slagging, fouling, corrosion

Abstract

One of the prominent technologies in biomass energy applications is commercial biomass combustion systems. While burning forest-derived biomass is a well-established and proven technology, the combustion of agricultural residues poses more challenges compared to forest-derived fuels. These challenges vary depending on factors such as the design of the combustion system, operational conditions, and the type, physical, and chemical properties of the biomass to be burned. Sintering, agglomeration, slagging, and corrosion are among the major issues that affect the regular and continuous operation of the combustion system, leading to unplanned shutdowns. This study investigates the applicability of common coal ash indices, widely used in the literature to predict these problems, to biomass ash for pre-analysis. Five different biomass feedstocks (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in open silos were sampled at two different time periods. Analyses of ash mineral content, chlorine content, sulfur content, and ash fusion temperatures were conducted, and various indices were calculated. Thus, changes in the problems related to biomass fuels depending on storage conditions will also be examined. As a result of the analyses and calculations, no significant relationship or prediction could be demonstrated among the existing indices due to the considerable differences between biomass ash and coal ash, as well as the heterogeneous nature of biomass feedstocks. The contradictory results highlight the necessity for further research and experimental tests under real conditions to establish or verify these indices. It is concluded that a more comprehensive evaluation, taking into account the heterogeneous structure and physicochemical characterization of solid biomass fuels, will be required based on actual combustion experiences.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 22.11.2023

Kabul Tarihi : 02.05.2024

Research Article

Submission Date : 22.11.2023

Accepted Date : 02.05.2024

Extended Abstract

Introduction and Objectives

Population growth, urbanization, and modernization continuously increase the demand for energy. In our country, 58% of the electricity produced is met by burning fossil fuels [ETKB, 2023]. The use of fossil fuels in thermal power plants for energy production increases carbon dioxide emissions released into the atmosphere from flue gases, contributing to global climate change. To reduce dependence on fossil fuels and increase energy diversity, our country, along with many others, has shown great interest in renewable energy sources. Among these sources, biomass energy has become a significant alternative. Compared to fossil fuels, energy derived from biomass is carbon-neutral.

In this study, samples were taken from five different types of biomass (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in the open at two different times. The samples were analyzed for ash content, melting temperatures, and Cl, S contents in an accredited laboratory. Mathematical indices commonly used for coal in the literature to predict biomass ash slagging and fouling tendencies were employed to estimate biomass ash slagging and fouling tendencies. The ultimate goal is to determine whether these indices provide insights into slagging and fouling tendencies when applied to biomass ash components and melting temperatures.

Methodology and Analysis

In this study, samples were taken from five different biomass types (reed canary grass, corn stalk, pine, poplar, and tree root) stored in open-air silos at two different times (April 2020, April 2021). Standard procedures were applied for the sampling method. Subsequently, biomass samples were analyzed in an accredited laboratory for oxide-form ash content (SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , SO_3 , Na_2O , TiO_2 , Sd, and Cl), melting temperatures, IDT (Initial Deformation Temperature), ST (Softening Temperature), HT (Hemispherical Temperature), and FT (Fusion Temperature). The analysis values were classified based on the time period and product type in which the samples were analyzed. The obtained results were interpreted by comparing them with literature data to confirm the reliability of the analyses.

Results and Discussions

This study demonstrates that there is no general formula that can clearly correlate ash deposition and fouling tendencies of five different agricultural and forestry biomasses (corn stalk, reed canary grass, root, pine, poplar) analyzed by taking samples at different time intervals under open-air conditions. Coefficients traditionally used to predict coal ash deposits yield mixed results when applied to biomass fuels. As a result, research findings predicting the fouling and fouling tendencies of biomass fuels based on some of these indices need to be questioned. The creation of new indices should be based on realistic results obtained from actual combustion experiences, taking into account not only the influence of combustion technology and conditions but also the heterogeneity and physicochemical characterizations of solid biomass fuels. In conclusion, there is a need for further research based on real combustion data, considering the properties of the raw materials used to create and validate indices in the context of different combustion technologies and operating conditions.

1. Giriş

Nüfus artışı, şehirleşme ve modernleşme ile enerjiye olan talep sürekli artış göstermektedir. Ülkemizde üretilen elektriğin %58'i fosil yakıtların yakılmasından karşılanmaktadır (ETKB, 2023).

Fosil yakıtların enerji üretiminde ve taşıtlarda kullanımı, atmosferde hava kirliliğine neden olan bir durumdur (Behcet, R., & Yakın, A. 2020). Bu kirlilik, coğrafi sınırlara bağlı olmadığından, çevresel etkileri sadece belli bir ülkeyi değil, küresel düzeyde tüm dünya nüfusunu etkilemektedir. Fosil yakıtların kullanımıyla artan emisyonlar, küresel iklim değişikliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik ve küresel ısınma gibi evrensel endişeleri gündeme getirmektedir (Yakın, A., & Behcet, R. 2019). Fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve enerji çeşitliliğini artırmak için birçok ülke ile birlikte ülkemiz de yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük ilgi göstermektedir. Bu kaynaklar arasında biyokütle enerjisi önemli bir alternatif olmuştur. Fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde, biyokütleden elde edilen enerji karbon nötr bir kaynaktır. Biyokütle enerji proseslerinde ortaya çıkan CO₂, fotosentez yoluyla organik maddelerin büyümesi ve gelişmesi sırasında atmosferden alınan karbondioksit eşdeğer olduğundan biyokütle enerjisi karbon nötrdür. Bu yüzden biyokütle enerjisinin CO₂ salınımının azaltılmasında ve dolayısıyla küresel ısınma ile mücadelede çok önemli bir rolü vardır. Bunun yanı sıra kullanılabilirlik ve çok iyi bilinen dönüşüm teknolojileriyle biyokütle, enerji talebini ve enerji arz güvenliğini sağlamada önemli bir alternatif olmaktadır (Badem, A. & Olgun, H. 2023).

Biyokütle yakma, bilinen en yaygın biyokütle enerji dönüşümü yöntemidir. Biyokütle yakmada en çok akışkan yataklı kazan ve ızgaralı kazan kullanılmaktadır. Biyokütle yakma sistemlerine özgü problemler büyük ölçüde proses sonucu oluşan külün bileşiminden kaynaklanmaktadır. Ciddi işletme sorunlarına yol açması nedeniyle biyokütle külü kaynaklı problemlerin çözümü üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Garcia-Maraver, Mata-Schancez, Carpio & Perez-Jimenez, 2017). Cürufişma (slagging) ve kirlenme (fouling), ısı transfer yüzeylerinde kül birikimini ifade etmek için kullanılan terimlerdir. Daha açık bir ifade ile cürufişma, uçucu külün ısı radyasyonuna maruz kalan yüzeylerde birikmesi olayı, ısı geri kazanım bölümü yüzeylerinde toplanan tortular ise kirlenmeyi oluşturmaktadır [Munir, 2010]. Kül miktarı ve özellikleri, kullanılan biyokütlenin sadece miktarına bağlı değildir. Aynı zamanda kullanılan biyokütlenin cinsine (tarımsal, ormansal, hayvansal ve endüstriyel biyokütle) ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır (Tortosa Masia vd., 2007). Biyokütle türlerinin geniş çeşitliliği, kül bileşimini özellikle organik ve inorganik bileşenleri açısından oldukça değişken hale getirmektedir (Jenkins vd.,1998;Demirbas 2005;Obernberger vd.,1997). Yakma sistemlerinde kül kaynaklı problemlerin araştırılmasında ilgilenilen ana bileşenler olarak; si-

lisyum, potasyum, klor, kükürt, demir, fosfor, magnezyum, kalsiyum, titanyum, karbon, hidrojen ve oksijen başta gelmektedir (Baxter vd., 1998).

Yakma sistemi tasarımı ve sorunsuz işletilme koşullarının belirlenmesinde, kullanılacak yakıtların ve bu yakıtlara ait küllerin bileşimi önem arz etmektedir. Örneğin, biyokütle küllerinin düşük erime sıcaklıkları ve yüksek mineral oksit içerikleri yakma sisteminde ve ısı transfer ekipmanlarında erimiş kül birikintilerine neden olmaktadır (Werther vd., 2000; Bryers 1996; Pronobis 2005). Birçok biyokütle tesisi cüruf ve sinterlenmiş kül birikintilerinden dolayı ciddi ekonomik kayıplar yaşamaktadır. Tarımsal ve kentsel atıklar yakıldığında bu risk çok daha fazlayken, orman atıklarında risk oranı daha düşüktür. Orman atıklarının cüruf oluşturma eğilimleri kimyasal içerikleri nedeniyle düşük olmasına rağmen, yakıt ile gelen diğer kirlenici toprak malzemeleri nedeniyle yakma sistemlerinde sorun yaşanabilmektedir. Aşırı kül birikimi yanma dengesini bozar, ısı transferini geciktirir, yüksek sıcaklık korozyonuna ve kızdırıcı patlamalarına hatta mekanik arızalar nedeniyle plansız duruşlara sebep olabilir (Aho ve Silvennoinen, 2004; Szemmelveisz vd., 2009; Jensen ve Dam-Johansen 2004). Çok farklı özellikte biyokütle yakılmasından kaynaklanacak sinterleşme ve cüruf oluşumunun önceden tahmin edilmesi; işletme kaynaklı bakım ve onarım maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayacaktır. Yakma sistemlerinde yakıt alternatiflerinin değerlendirilmesi ve açıklanan etkilerin en aza indirilmesi için çeşitli metotlar ortaya konmuştur (Fernandez Llorente ve Carrasco García 2005). Bir kazanın cüruf oluşturma eğilimi, yalnızca yakıt özellikleri açısından tahmin edilemez (Miles vd. 1996). Külün erime noktası ile yakıt bileşimi arasında güçlü bir ilişki olduğu bilinmektedir. (Yu vd. 2014). Kömür külünün sinterleme ve cüruf eğilimi ile ilgili bilimsel yayınlara dayalı olarak risk tahmini için bir dizi yöntem geliştirilmiştir (García vd., 2015; Teixeira vd., 2012). Biyokütlenin ise kömürden önemli ölçüde farklılık gösterdiği bilinmektedir (Cuiping , Chuangzhi, & Haitao, 2004; Mohan vd., 2006; Nordin 1994; Wigley vd., 2007). Kömür için geliştirilen ampirik formüllerin biyokütle için de geçerliliği üzerine çok fazla bir çalışma yoktur. Biyokütle yakıtları kendi içerisinde çok çeşitlidir ve her bir türü farklı fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Farklı bölgelerden alınan aynı biyokütle türlerinin kül analiz sonuçlarında bile farklılıkların olduğu, elemental ve oksit formda kül içeriklerinin ve kül ergime sıcaklıklarının aynı olmadığı görülmektedir.

Biyokütle organik içerikli bir yakıt olduğu için özellikleri de havaya, iklime, yetiştirme startlarına ve toprak özelliklerine son derece bağlıdır. Bu heterojen yapısı nedeniyle katı biyokütlenin uygun bir şekilde depolanması ve efektif yakılması, fosil yakıtlarla mukayese edildiğinde çok daha zor ve sorunlu olabilmektedir. Bu çalışmada, açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle türünden (saz kamışı, mısır sapı, çam kapak, kavak kapak, ağaç kökü) 2 farklı zamanda numuneler alınarak akredite laboratuvarında kül içeriği, ergime sıcaklıkları ve Cl, S içerikleri analiz edilmiştir.

Biyokütle cüruf ve kirlenme eğilimlerinin tahmini için literatürde yaygın olarak kömür için kullanılan matematiksek indisler kullanılarak bir sonuca varılmaya çalışılmıştır. Nihai amaç, bu indislerin biyokütle kül bileşenleri ve erime sıcaklıkları üzerinde kullanıldığında cüruf ve kirlenme eğilimlerinde fikir verip veremeyeceğini belirlemektir. Çalışmanın bulguları, biyokütle yakıtlarının depolanması sırasında oluşan kuru madde kayıplarının mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına, biyokütle yakıtlarının depolanması ve işlenmesi için daha verimli ve sürdürülebilir yöntemlerin geliştirilmesine ve doğru yakıt reçeteleri hazırlanarak biyokütle enerjisinin daha yaygın ve etkin kullanımına katkıda bulunacaktır.

2. Materyal ve Metod

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1 Kullanılan Analiz Yöntemi ve Deneysel Veriler

Biyokütle hammaddelerinin kül minerali içeriği (Si, Ca, K, P, Al, Mg, Fe, Na ve Ti) "Standard Test Method for Major and Trace Elements in Coal and Coke Ash by X-Ray Fluorescence" olarak adlandırılan XRF ASTM 4326 standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu standart, yakıt külündeki ana ve iz elementlerin analizini yapmak için X-ışını floresans spektrometrisi (XRF) yöntemini tanımlamaktadır. XRF, bir numunenin X-ışınlarına maruz bırakılmasıyla çalışan bir analiz tekniğidir. Numunenin atomik yapısı X-ışınları tarafından etkilenir ve bu etkileşim sonucunda numunenin karakteristik floresans ışınları yayılır. XRF cihazı, bu floresans ışınlarını algılayarak numunedeki elementlerin tespitini ve miktarlarının belirlenmesini sağlar. Bu standart, kalite kontrol amaçlarıyla, çevresel analizlerde ve araştırmalarda kullanılan bir referans noktasıdır. XRF analizi, yanma ürünlerinin bileşimini ve kalitesini belirleme, emisyon kontrolü, enerji üretimi ve diğer uygulamalar için önemli bir araçtır. ASTM 4326, bu analizin standardizasyonunu sağlayarak sonuçların karşılaştırılabilir ve güvenilir olmasını temin eder.

Biyokütle hammaddelerinin kül ergime sıcaklıkları (IDT, ST, HT, FT) ASTM D1857 veya D1857M-18, "Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash" olarak adlandırılan bir ASTM standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu standart, kömür ve kok kömürü külünün erime özelliklerini değerlendirmek için oluşturulan bir yöntemdir. ASTM D1857, kömür veya kok kömürü külünün belirli sıcaklık aralığında erime davranışını belirlemek için kullanılan bir test yöntemi-dir. Bu test, numunenin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasını ve oluşan külün erime davranışını değerlendirir. Bu test yönetimi, yakıtın yanma sürecinde oluşan külünün davranışını anlamak ve değerlendirmek için önemlidir.

Külün erime özellikleri, yakıtın yanma verimliliği, kazan performansı ve yanma sonrası atıkların yönetimi açısından önemli bir faktördür. ASTM D1857, bu özel-

likleri belirlemek ve farklı yakıt türleri arasında karşılaştırma yapmak için standartlaştırılmış bir yöntem sağlar.

Biyokütle hammaddelerinde bulunan klor içeriği yüzdesi (Cl) (%), EPA 5050 İyon Kromatografisi ile belirlenmiştir. EPA 5050, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yayınlanan bir yöntemdir. Bu yöntem, biyokütle numunelerindeki çeşitli iyonları analiz etmek için kullanılır. İyon kromatografisi, bir numunedeki iyonların ayrıştırılması ve tespiti için kullanılan bir analiz tekniğidir. Biyokütle numunesi iyon kromatografisi cihazına verilir ve klor iyonları ayrıştırılır. Bu sayede klor miktarı tespit edilir ve yüzde olarak ifade edilir.

Biyokütle hammaddelerinin kuru yakıttaki kükürt yüzdesi (Sd) (%), ASTM D4239 standardı ile analiz edilmiştir. ASTM D4239 standardında yer alan "Standard Test Method for Sulphur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion" tarafından kuru yakıttaki kükürt yüzdesini ifade etmektedir. ASTM D4239, kuru yakıtlardaki kükürt içeriğini belirlemek için bir deney yöntemini tanımlar. Bu yöntem, yüksek sıcaklıkta tüp fırını yanma kullanılarak numunelerdeki kükürtün oksidasyonunu gerçekleştirir. Oluşan kükürt dioksit (SO₂) gazı, uygun bir dedektör aracılığıyla tespit edilir ve kükürt miktarı gaz analizi ile belirlenir.

Bu çalışmada, açık alanda depolanan 5 farklı biyokütle (saz kamışı, mısır sapı, çam kapağı, kavak kapağı ve ağaç kökü) açık hava silolarından 2 farklı zamanda (Nisan 2020, Nisan 2021) numuneler alınarak akredite laboratuvarında kül içeriği, ergime sıcaklıkları ve Cl, S içerikleri analiz edilmiştir. Numune alma yöntemi için standart prosedürler uygulanmıştır [Badem A., Olgun H., 2023]. Analiz değerleri, numunelerin analiz edildiği zaman dilimi ve ürün cinsine göre sınıflandırılarak Tablo 1'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, analizlerin güvenilirliğini teyit etmek adına literatürden alınan verilerle karşılaştırıldı.

Tablo 1'de, beş farklı biyokütlenin iki farklı zaman diliminde alınan örneklerinin oksit formdaki kül içerikleri görülmektedir. Bu tablo, her bir biyokütle için SiO₂, CaO, K₂O, P₂O₅, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃, SO₃, Na₂O, TiO₂, Sd ve Cl içeriklerini ayrıntılı bir şekilde listelemektedir. Her bir özellik, Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerindeki değerlerini içermektedir. Tablo 1'den de görüleceği üzere küllerin oksit bileşenleri yakıt tipine ve numune alma tarihine göre farklılıklar göstermektedir. Bu durum da uzun süreli depolamalarda kül kaynaklı problemlerde de bir farklılık olabileceğini göstermektedir.

Tablo 2'de ise, aynı biyokütle örneklerinin kül ergime sıcaklıkları bulunmaktadır. Bu sıcaklıklar IDT (İlk Deformasyon Sıcaklığı), ST (Yumuşama Sıcaklığı), HT (Yarıküre Sıcaklığı) ve FT (Erime Sıcaklığı) olarak dört farklı kritik noktada verilmiştir. Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Beş Farklı Biyokütlenin İki Farklı Zaman Dilinde Alınan Örneklerinde Oksit Formda Kül İçerikleri

İçerik (%)	Kök		Çam kapağı		Kavak kapağı		Mısır sapı		Saz kamışı	
	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21
Dönem										
SiO ₂	22,90	19,40	43,00	16	6,41	33,8	43,30	52,7	83,10	74,4
CaO	36,90	31,20	13,20	47,7	50,00	25,7	13,20	16,6	1,84	5,77
K ₂ O	7,64	7,53	16,20	3,9	9,92	6,46	15,90	5,58	2,89	2,24
P ₂ O ₅	4,06	3,00	0,93	1,55	5,41	3,36	0,92	0,737	0,62	0,908
Al ₂ O ₃	6,27	6,89	5,41	5,94	2,00	11,4	5,43	8,12	0,54	2,24
MgO	4,14	6,89	5,35	7,15	12,60	4,73	5,37	4,12	1,32	1,4
Fe ₂ O ₃	4,35	3,97	2,69	3,41	1,70	5,52	2,70	4,13	0,32	1,25
SO ₃	1,02	3,84	1,12	2,92	1,05	0,823	1,11	0,46	2,04	0,286
Na ₂ O	0,88	0,91	0,26	0,536	0,23	0,731	0,27	0,491	3,13	1,19
TiO ₂	0,55	0,49	0,33	0,434	0,17	0,696	0,33	0,48	0,03	0,141
Sd	0,08	0,08	0,08	0,12	0,09	0,11	0,09	0,13	0,12	0,14
Cl	0,02	0,01	0,02	0,013	0,02	0,0075	0,26	0,06	0,25	0,157

Tablo 2. Beş Farklı Biyokütlenin İki Farklı Zaman Dilinde Alınan Örneklerinde KÜİ Ergime Sıcaklıkları

°C	Kök		Çam kapağı		Kavak kapağı		Mısır sapı		Saz kamışı	
	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21	Nis.20	Nis.21
Dönem										
IDT	1245	1168	1391	1307	1487	1186	1169	1195	1281	1390
ST	1253	1200	1494	1319	1500	1209	1182	1207	1492	1458
HT	1261	1205	1496	1332	1500	1217	1235	1278	1500	1500
FT	1324	1215	>1500	1434	>1500	1271	1310	1361	>1500	>1500

IDT: İlk Deformasyon sıcaklığı (°C)

ST: Yumuşama sıcaklığı (°C)

HT: Yarıküre sıcaklığı (°C)

FT: Erime sıcaklığı (°C)

Tablo 3 ve Tablo 4'te ise beş farklı biyokütle türü olan kök, çam kapağı, kavak kapağı, mısır sapı ve saz kamışının oksit formda kül içerikleri (SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , SO_3 , Na_2O , TiO_2 , Sd ve Cl) ve kül ergime sıcaklıkları (IDT, ST, HT, FT) literatürden alınan veriler ile özetlenmiştir.

Tablo 3. Beş Farklı Biyokütlenin Oksit Formda Kül İçerikleri

İçerik (%)	Kök	Çam kapağı	Kavak kapağı	Mısır sapı	Saz kamışı
Referans	[Zevenhoven-Onderwater vd., 2000; Miles vd., 1996]	[Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014]	[Vassilev vd., 2014; Bryers, 1996]	[Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014]	[Vassilev vd., 2014; Moilanen, 2006]
SiO_2	20,62	68,18	1,86	49,95	84,92
CaO	47,55	7,89	77,31	14,73	3,31
K_2O	10,23	4,51	8,93	18,53	2,93
P_2O_5	5,05	1,56	2,48	2,42	3,88
Al_2O_3	2,99	7,04	0,62	5,06	1,32
MgO	7,2	2,43	2,36	4,49	1,42
Fe_2O_3	1,42	5,45	0,74	2,53	1,04
SO_3	2,91	1,19	0,74	1,84	1,04
Na_2O	1,6	1,2	4,84	0,16	0,09
TiO_2	0,4	0,55	0,12	0,29	0,05
Sd	0,1	0,09	0,1	0,08	0,15
Cl	0,03	0,06	-	0,64	0,06

Tablo 4. Beş Farklı Biyokütlenin Kül Ergime Sıcaklığı Değerleri

°C	Kök	Çam kapağı	Kavak kapağı	Mısır sapı	Saz Kamışı
Referans	(Wilén vd., 1996)	(Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014)	(Vassilev vd., 2014; Bryers, 1996)	(Tortosa Masia vd., 2007; Vassilev vd., 2014)	(Vassilev vd., 2014; Moilanen, 2006)
IDT	1175	1256	1329	1126	1256
ST	1205	-	-	-	-
HT	1230	1402	1447	1214	1402
FT	1250	1430	1458	1221	1430

Analiz sonuçları literatür verileriyle genel olarak uyumludur. SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 ve SO_3 gibi ana bileşenlerde benzer eğilimler görülürken, kök, çam kapağı ve kavak kapağındaki Na_2O değerleri öne çıkan farklılıklardır. Ayrıca, Cl içeriği özellikle mısır sapı ve saz kamışında önemli ölçüde değişmektedir. Açık havada depolama neticesinde yağışlar nedeniyle yıkama etkisi ile oluşan farklılıklar ve taşıma esnasında numunelerde oluşabilecek yabancı madde ve toprak kaynaklı olabilir. Kül ergime sıcaklıkları analizinde ise, genelde IDT, ST, HT ve FT değerleri benzerlik göstermektedir. Tablo 2'den de görüleceği üzere en düşük kül ergime sıcaklıkları mısır sapı için bulunmuştur. Kül ergime sıcaklığı, biyokütle yakıtlarının termal özelliklerini belirleyen kritik bir parametre olarak öne çıkar. Bu parametre, yakıtın yanması sırasında oluşan külün termal davranışını belirler ve dolayısıyla kazan performansını etkiler. Düşük kül ergime sıcaklığı, külün kazan içinde daha az yapışkan bir tabaka oluşturmasını sağlayarak temizlik işlemlerini kolaylaştırabilir. Ancak, bu durum aynı zamanda külün yapışmasına ve kazan performansını olumsuz etkileyebilecek sertleşmesine de neden olabilir. Yüksek kül ergime sıcaklığı ise külün daha stabil bir tabaka oluşturmasına yardımcı olabilir ve dolayısıyla kazan performansını artırabilir. Ancak, aşırı yüksek kül ergime sıcaklığı da külün yapışmasına ve temizlik işlemlerinin zorlaşmasına neden olabilir. Bu nedenle, kül ergime sıcaklığının yakıtın performansı, verimliliği ve bakım gereksinimleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bu durum, biyokütle yakıtlarının seçimi ve işlenmesi sürecinde dikkatle ele alınmalı ve kazan tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu veriler literatür verileri ile de oldukça uyumlu çıkmıştır. Elde edilen kül içeriği ve kül ergime sıcaklığı sonuçları, literatürdeki bulgularla genel bir uyumluluk göstermektedir. SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 ve SO_3 gibi ana bileşenlerin oranlarında ben-

zer eğilimler gözlemlenmiştir. Fakat kök, çam kapağı ve kavak kapağındaki Na_2O değerleri, literatürden farklılık göstermektedir. Ayrıca Cl içeriği, özellikle mısır sapı ve saz kamışında önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Bu farklılıklar, açık havada depolama sırasında yağışların neden olduğu yıkama etkisi ve taşıma esnasında numunelere bulaşan yabancı madde ve toprak kaynaklı olabilir. Kül ergime sıcaklığı analizlerinde de IDT, ST, HT ve FT değerleri literatürle benzerlik göstermektedir. Tablo 2'den de görülebileceği üzere en düşük kül ergime sıcaklıkları mısır sapı için bulunmuştur. Bu bulgu da literatürdeki verilerle uyumludur. Sonuç olarak, bu çalışma farklı biyokütle türlerinin kül içeriği ve ergime özellikleri arasındaki varyasyonları anlamak için değerli bir referans kaynağı sunmaktadır. Elde edilen veriler, biyokütleden enerji üretim süreçlerinin optimizasyonuna katkı sağlayabilir.

2.2 Cüruflaşma ve Kirlenme İndeksleri

Sıcak yüzeylerde kül birikmesi olayı cüruflaşma (slagging) ve kirlenme (fouling) olarak tanımlanmıştır. Cüruflaşma, kazanın fırın duvarlarında veya radyant ısıya maruz kalan konveksiyon yüzeylerinde erimiş veya kısmen erimiş birikintilerin oluşumu olarak tanımlanır.

Kirlenme (fouling) ise kızdırıcı ve ara ısıtıcılar gibi konveksiyon ısı yüzeylerinde birikinti oluşumu olarak tanımlanır. Cüruflanma, enerji üretimi sırasında veya diğer termal işlemlerde yanma sonucu oluşan cürufun yüzeylerde birikmesi veya yapışması olayıdır. Yanan yakıtın içerisinde bulunan mineral maddeler, yanma süreci sırasında çeşitli bileşikler halinde serbest kalır. Bu bileşikler, havada taşınarak yüzeylere çarparak veya akışkanlarla birleşerek birikintilere dönüşebilir. Cüruflaşma; kazanlar, fırınlar, bacalar, ısı eşanjörleri gibi ekipmanların iç yüzeylerinde birikime neden olurlar. Enerji transferini engelleyebilir, akışkanların akış direncini artırabilir ve ekipmanlarda hasara yol açabilirler. Kirlenme, endüstriyel süreçlerde akışkanların temas ettiği yüzeylerde biriken tortu, kir veya birikintilerin oluşumu anlamına gelir. Akışkanlar içinde bulunan katı partiküllerin, çökeltme, kristalleşme, kimyasal reaksiyonlar veya biyolojik etkileşimler sonucu yüzeylere yapışması ve birikmesiyle meydana gelir. Kirlenme, boru hatları, ısı eşanjörleri, reaktörler, soğutma sistemleri ve diğer ekipmanlarda akış direncini artırabilir, termal verimi düşürebilir ve işletme maliyetlerini artırabilirler. Her iki problem de endüstriyel süreçlerde önemli sorunlar oluşturur ve düzenli bakım ve temizlik gerektirirler. Cüruflanma ve kirlenme, ekipmanların performansını olumsuz etkiler, enerji verimliliğini azaltır ve işletme maliyetlerini artırır. Bu nedenle, düzenli temizlik, bakım ve uygun işletme yöntemleri ile bu sorunlar minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada dikkate alınan cüruflaşma ve kirlenme indeksleri, kül bileşimi ve/veya eriyebilirlik sıcaklıkları korelasyonlarına dayanmaktadır Literatürde daha çok kömür yakıtları için kullanılan bu endeksler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Silika İçeriği (SiO₂)

Yakıtta bulunan silika miktarının yüzdesel olarak ifadesidir. Silika, kül oluşumunda belirleyici bir faktör olup, yüksek silika içeriği cüruflaşma ve kirlenme riskini artırabilir. Biyokütle külünün silika içeriğinin cüruf oluşumunda etkili olduğu bilinmektedir. Bu neden ile biyokütle külünün silika içeriği cüruf göstergesi olarak kullanılmaktadır [Ohman vd., 2004]. Literatürde verilen bilgilerde kritik Si içeriğinin (SiO₂ olarak verilir) yakıt külündeki değişiminin cüruflaşma üzerindeki etkisi Tablo 5’de verilmiştir. Bu değer %20’nin altında olması durumunda cüruf oluşumunu en az olmaktadır [Gilbe vd., 2008].

Klor İçeriği (Cl)

Yakıtta bulunan klor miktarını yüzdesel olarak ifade eder. Klor, yüksek sıcaklıklarda agresif bir bileşik haline gelerek korozyon ve cüruflaşma reaksiyonlarını tetikleyebilir. Klor, potasyum ve silika arasındaki reaksiyonları kolaylaştırıcı bir rol oynayarak, tipik kazan çalışma sıcaklığı olan 800–900 °C’de erimiş cam benzeri tortu ve cürufaların oluşumuna neden olmaktadır. (Jenkins vd., 1996; Llorente vd., 2006). Kül içeriğinde yakıttaki klor içeriği için farklı aralıklar, biyokütle yakıtlarının cüruf eğilimi ile ilişkilendirilmiştir (Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005). Bu değer Tablo 5’den de görüldüğü gibi en düşük risk için %0.2’nin altı olarak verilmiştir.

Bazik/Asit Oranı (B/A)

Kül bileşenlerinin bazik ve asidik karakteristiklerinin oransal bir göstergesidir. Düşük B/A oranları asidik karakterli kül oluşumunu, yüksek oranlar ise bazik karakterli kül oluşumunu işaret edebilir. Küldeki bazik bileşikler (Fe₂O₃ + CaO + MgO + Na₂O + K₂O) kül erime sıcaklığını düşürür (Munir, 2010). Bu bileşenler, B grubu olarak sınıflandırılır çünkü P2O5 fraksiyonu, uçucu küldeki erime sıcaklığını düşürebilen düşük erime noktalı fazların gelişimini artırabilir. Bu nedenle, P₂O₅ içeriği de B grubuna dahil edilir. Asidik bileşenler, erime sıcaklığı daha yüksek olan (SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂) gibi bileşenlerdir, A grubu olarak adlandırılır. Bazik bileşiklerin asidik bileşiklere oranı Tablo 5’de verilen aralıklara göre kül biriktirisi davranışını tahmin etmek için bir indeks olarak kabul edilmiştir (Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005; Vamvuka ve Zografos, 2004). B/A’nın 0,5’den küçük olması istenir.

$$B/A = \frac{(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5)}{(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)} \quad (1)$$

Yatak Aglomerasyon İndeksi (BAI)

Yakıtın yanması sırasında yatağın içinde oluşabilecek aglomerasyon riskini belirlemek için kullanılır. Yüksek BAI değerleri, aglomerasyon ve tıkanma problemlerinin olasılığını artırabilir. Akışkan yataklarda biyokütlenin yanması sırasında en büyük sorun yatak aglomerasyonudur (Werther vd., 2000). Bu nedenle, akışkan

yataklı reaktörlerde kül bileşimini aglomerasyonlarla ilişkilendiren bir yatak aglomerasyonu indeksi geliştirilmiştir (Vamvuka ve Zografos, 2004). BAI'nin <0.15 olması yüksek risk olarak tanımlanmıştır.

$$BAI = (Fe_2O_3)/(Na_2O+K_2O) \quad (2)$$

Babcock endeksi (Rs)

Küldeki silika ve alümina oranlarının oranını belirler. Yüksek Rs değerleri, küldeki silika içeriğinin arttığını ve dolayısıyla cüruflaşma riskinin yüksek olduğunu gösterebilir. Rs indeksi B/A oranına ve küldeki kükürt oranına dayalıdır (Pronobis, 2005). Biyokütle yakıtlarında kükürt yüzdesi çok düşük olduğu için biyokütle yakıtları için ihmal edilebilir (Miles vd., 1996). Farklı risk aralıkları Tablo 5'de gösterilmiştir.

$$Rs = (B/A) \cdot S^d \quad (3)$$

Kül eriyebilirlik indeksi (AFI)

Külün belirli bir sıcaklıkta erime eğilimini ifade eder. Düşük AFI değerleri, külün yüksek erime direncine sahip olduğunu gösterir. Kül eriyebilirlik indeksi kül erime sıcaklığı değerlerinden IDT ve HT'ye dayanmaktadır (Gray ve Moore, 1974). İndeks, denklem (4) ile belirlenmiş ve aralık değerleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

$$AFI = (4 \cdot IDT + HT)/5 \quad (4)$$

Kirlenme indeksi (Fu)

Kazan yüzeylerinde oluşabilecek kirlenme riskini belirlemek için kullanılır. Yüksek Fu değerleri, kirlenme ve tıkanma riskinin arttığını gösterebilir. Kirlenme indeksi, B/A oranını ve alkali ($Na_2O + K_2O$) içeriğini dikkate almaktadır (Pronobis, 2005). Daha yüksek Fu değerleri, daha yüksek kirlenme eğilimlerine karşılık gelmektedir (Tablo 5).

$$Fu = (B/A) \cdot (Na_2O + K_2O) \quad (5)$$

Cüruf viskozite indeksi (Sr)

Cürufun akışkanlık özelliklerini belirler. Yüksek Sr değerleri, cüruflaşma eğiliminin arttığını ve bu durumun kazan performansını olumsuz etkileyebileceğini gösterebilir. Bu indeks, alkali bileşikler dışında, küldeki bazik bileşiklerin silis yüzdesini hesaplar. Yüksek Sr değerleri, yüksek viskoziteyi ve bu nedenle düşük cüruf oluşum eğilimini ifade eder (Pronobis, 2005).

$$Sr = \text{SiO}_2 \cdot 100 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}). \quad (6)$$

Yumuşama sıcaklığı (ST)

Külün termal deformasyon veya erimeye başladığı sıcaklık noktasını belirler. Düşük ST değerleri, külün düşük termal stabiliteye sahip olduğunu gösterebilir. Cüruf tahmini modelleri, biyokütle yakıtlarının yumuşama sıcaklığını Tablo 5'teki sınırlara göre değerlendirmektedir (Yu vd., 2014).

İlk deformasyon sıcaklığı (IDT)

Külün yapısındaki ilk deformasyonun başladığı sıcaklık noktasını belirler. IDT, külün termal stabilitesi ve dayanıklılığı hakkında bilgi sağlar. Biyokütle, yanma esnasında organik formda ayrışarak düşük erime sıcaklıklarına sahip bileşikler oluşturan potasyumu içermektedir (Miles vd., 1996). Bu nokta dikkate alındığında, IDT (sinterlemenin başladığı yer) ile K₂O içerikleri arasında bir ilişki bulunmuştur (Werther vd., 2000; Gupta vd., 1998). Bu korelasyona karşılık gelen, IDT değerlerine bağlı olarak sinterleme eğilimleri için farklı aralıklar Tablo 5'de özetlenmiştir (Ohman vd., 2004).

Tablo 5. Cürüflaşma ve Kirlenme İndisleri

İndeks	Aralık Değer	Cürüflaşma ve Kirlenme Eğilimi	Referans
SiO ₂ (%)	< 20	Düşük	(Ohman vd., 2004)
	20-25	Orta	
	> 25	Yüksek	
Cl (%)	< 0,2	Düşük	(Tortosa Masia vd., 2007; Pronobis, 2005)
	0,2-0,3	Orta	
	0,3-0,5	Yüksek	
	> 0,5	Çok Yüksek	
B/A	< 0,5	Düşük	(Munir, 2010)
	0,5 - 1	Orta	
	1 - 1,75	Yüksek	
	> 1,75	Çok Yüksek	
	< 0,15	Yüksek	
B Rs	A	I	(Garcia-Maraver vd., 2017)
	< 0,6	Düşük	
	0,6-2	Orta	
	2-2,6	Yüksek	
	> 2,6	Çok Yüksek	
AFI	> 1342	Düşük	(Dunnu, Maier & Scheffknecht, 2010)
	1232-1342	Orta	
	1052-1232	Yüksek	
	< 1052	Çok Yüksek	
Fu	< 0,6	Düşük	(Garcia-Maraver vd., 2017)
	0,6 - 40	Orta	
	> 40	Yüksek	
Sr	> 72	Düşük	(Pronobis, 2005)
	65-72	Orta	
	< 65	Yüksek	
	> 1390	Düşük	
ST (°C)	> 1100	Düşük	(Yu vd., 2014)
	1250 -1390	Orta	
	< 1250	Yüksek	
IDT (°C)	> 900	Düşük	(Ohman vd., 2004)
	900-1100	Orta	
	< 900	Yüksek	

3. Sonuçlar ve Tartışma

Tablo 1 ve 2’de verilen analiz sonuçlarına göre cüruflaşma ve kirlenme indeksleri, Tablo 5’de verilen aralık değerler üzerinden hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar beş farklı biyokütle için iki farklı zaman diliminde Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. Cüruflanma ve Kirlenme İndekslerinin Değerleri

Cüruflanma ve kirlenme indeks değerleri - NİSAN 2020										
Biyokütle Çeşidi	SiO ₂	Cl	B/A	BAI	Rs	AFI	Fu	Sr	ST	IDT
KÖK	22,9	0,022	1,95	0,51	0,16	1248,2	16,61	33,53	1253	1245
ÇAM KAPAK	43	0,015	0,79	0,16	0,06	1412	13,05	66,94	1494	1391
KAVAK KAPAK	6,41	0,02	9,31	0,17	0,84	1489,6	94,50	9,07	1500	1487
MISIR SAPI	43,3	0,264	0,78	0,17	0,07	1182,2	12,64	67,06	1182	1169
SAZ KA-MIŞI	83,1	0,249	0,12	0,05	0,01	1324,8	0,73	95,98	1492	1281

Cüruflanma ve kirlenme indeks değerleri - NİSAN 2021										
Biyokütle Çeşidi	SiO ₂	Cl	B/A	BAI	Rs	AFI	Fu	Sr	ST	IDT
KÖK	19,4	0,012	2,00	0,47	0,16	1175,4	16,87	31,57	1200	1168
ÇAM KAPAK	16	0,013	2,87	0,77	0,34	1312	12,74	21,55	1319	1307
KAVAK KAPAK	33,8	0,008	1,01	0,77	0,11	1192,2	7,29	48,46	1209	1186
MISIR SAPI	52,7	0,06	0,52	0,68	0,07	1211,6	3,14	67,96	1207	1195
SAZ KA-MIŞI	74,4	0,157	0,17	0,36	0,02	1412	0,57	89,83	1458	1390

Renklerin Lejantı

DÜŞÜK	ORTA	YÜKSEK	ÇOK YÜKSEK
-------	------	--------	------------

Genel olarak, farklı dönemlerde farklı biyokütle yakıtlarına uygulandığında mevcut indisler arasında bir ilişki olmadığı sonucuna varılabilir. Hatta sonuçlar kendi içerisinde çelişki barındırmaktadır. Örneğin, Nisan 2021 döneminde kök ve çam kapak analiz değerlerine indis hesaplamaları uygulandığında, kül birikin-

tileri üretme hususunda B/A indeksine göre çok yüksek, Sr indeksine göre ise yüksek risk eğilimine sahip olduğu öngörülmektedir. Fakat aynı dönemde kök ve çam kapak için hesaplanan SiO_2 , Cl, Rs, IDT indislerine göre düşük seviye cüruf ve kirlenme eğilimi, Fu indisine göre ise orta derece cüruf ve kirlenme eğilimi göstermektedir. Bu çelişkili tahminler Tablo 6'da gösterilen farklı dönemlerde alınan hemen hemen tüm biyokütelerde bulunmaktadır. Silolardan alınan farklı zaman dilimlerine ilişkin biyokütle numuneleri ayrı ayrı ve birlikte incelenmiştir. Fakat indis hesaplamaları arasında oluşan çelişkili sonuçlar nedeniyle herhangi bir korelasyon oluşturulamamıştır.

Silika İçeriği (SiO_2)

Silika içeriği için $\text{SiO}_2 > \%25$ değeri yüksek risk olarak tanımlanmıştır. En yüksek silika yüzdesi hem Nisan 2020 hem de Nisan 2021 değerlerinde bu kritik değer için çok üzerinde çıkmıştır. Biyokütle yakıtlarındaki yüksek silika seviyeleri, yakıtın depolama koşullarında toprak veya kumla karışımından kaynaklanma ihtimali mevcuttur. SiO_2 içeriğine ilişkin indis, mısır sapı ve saz kamışı biyokütelerinde kül birikintileri üretme eğilimi göstermiştir. Bu SiO_2 değerleri, bu tür biyokütelerdeki SiO_2 içeriğini bitkinin sağlığına veya sertliğine katkısıyla ilişkilendiren diğer çalışmalarda elde edilen verilerle uyumludur. Nisan 2020 döneminde alınan numunelerde kavak kapak SiO_2 içeriği bakımından 6,41 olarak hesaplanmıştır. Nisan 2021 döneminde yapılan analizlerde ise kavak kapak için bu değer 33,8'e yükseldiği, cüruf ve kirlenme risk eğiliminin Nisan 2020'de düşük seviyede iken, Nisan 2021'de yüksek risk grubunda olduğu Tablo 6'da görülmektedir. Bu durumun temel nedeni, biyokütelerin silika içeriğinin taşıma, yükleme, açık havada depolama vb. dış etmenler ile biyokütle yüzeyinde biriken topraktan kaynaklanan kirlenme nedeniyle artmasıdır.

Klor içeriği (Cl)

Tarımsal biyoküteler, mısır sapı ve saz kamışı Nisan 2020 döneminde orta seviyede bir kül biriktirme riski barındırırken, odunsu biyoküteler daha düşük risk eğilimi göstermiştir. Nisan 2021 döneminde alınan numunelerde ise tüm biyoküteler düşük risk grubu içerisinde yer almıştır. Tarımsal biyokütelerde klor yüzdesinin düşümüne açıkta depolama esnasında meydana gelen yağışların (yıkama etkisi nedeni ile) etki edebileceği öngörülmektedir.

Bazik asit bileşik oranı (B/A)

B/A oranı göz önüne alındığında, çalışmamızda yer alan biyokütlenin hemen hemen tümünün, daha düşük B/A değerleri sunduğu, bazı dönemlerde ise saz kamışı dışında, diğer yakıtların cüruflaşmaya neden olan orta, yüksek ila aşırı yüksek bir eğilim gösterdiği görülmüştür (Tablo 6). Dolayısıyla saz kamışının cüruf veya kirlenmeye neden olma şansı daha düşüktür. Bu sonuçlar, saz kamışının daha yüksek SiO_2 içeriğiyle ilişkilendirilebilir. Bu durum, asidik bileşiklerin artmasına ve dolayısıyla daha yüksek kül füzyon sıcaklığına işaret etmektedir (Niu

vd., 2014). Özetle, bu indeks için elde edilen bulgular, SiO₂ içeriğinin cüruf oluşumundan sorumlu ana bileşen olarak değerlendirilmesiyle çelişmektedir. Saz kamışı Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde en yüksek SiO₂ içeriğine sahipken, B/A indis hesaplamalarında en düşük cüruf ve kirlenme eğilimi göstermiştir.

Yatak aglomerasyon indeksi (BAI)

Bazı araştırmalar, 760°C–900 °C sıcaklıklardaki akışkan yataklı yakıcılardaki yatak aglomerasyonlarının, özellikle silikanın etkisi altında olduğunu vurgulamaktadır (Miles vd., 1996; Teixeira vd., 2012; Skrifvars vd., 1999). Bununla birlikte, BAI indeksi, kül biriktirme ve cüruf oluşumunu tahmin etmede bu unsuru dikkate almaz. Tablo 6'da BAI indeksine göre yapılan farklı dönemlerde alınan biyokütle numunelerinin risk parametreleri birbirleri ile çelişki göstermektedir.

Babcock indeksi (Rs)

Kükürt, alkali ve toprak alkali (K, Ca) içeren yakıtlarla birlikte yanıldığında sülfat oluşabilir, ancak bu elementler silikatlarla bağlandıklarında bu durum gerçekleşmez (Tortosa Masia vd., 2007). Bu nedenle SiO₂'nin eklenmesi, biyokütle kül füzyon sıcaklığını artıran önemli miktarda K ve Ca silikat oluşumuna neden olabilir. Tekrar belirtmek gerekirse, SiO₂'nin mevcudiyeti, 900 °C gibi tipik yanma sıcaklıklarında kararsız olan K₂SO₄ ve CaSO₄ gibi sülfür açısından zengin birikintilerin oluşumunu engellemeye yardımcı olabilir. (Garcia-Maraver vd., 2017). SiO₂'yi bir biyokütle yakıtının cüruf eğilimini azaltabilen bir bileşen olarak ele alan bu açıklama, B/A indeksini bir tahmin modeli olarak desteklemektedir. Ancak, B/A indeksi, S içeriği ile tamamlandığında ve Rs indeksi ile birleştirildiğinde, sonuçlar önemli ölçüde değişmektedir (Tablo 6). Bu indeksin sonuçlarına göre, çok düşük SiO₂ içeriğine sahip istisnai biyokütlenin, diğerlerine kıyasla daha yüksek cüruf oluşturma eğilimleri gösterdiği görülmektedir.

Kül eriyebilirlik indeksi (AFI)

AFI indeksi, kül bileşikleri arasındaki olası sinerjileri göz ardı ederek, yakıtların gerçek kül eritme davranışına yakın bir karşılık gelen, biyokütle için en umut verici indekslerden biri olarak kabul edilir. Ancak, daha önce yapılan çalışmalar, kül eriyebilirlik testi sırasında kullanılan çalışma koşullarının değişmesi durumunda farklı erime sıcaklıklarının elde edilebileceğini göstermiştir. Önceki çalışmalar, tarımsal biyokütlede olduğu gibi, yüksek silis içeriğine sahip biyokütle için özel sorunların ortaya çıkabileceğini göstermiştir (Garcia-Maraver vd., 2017). Tablo 6'da sonuçlar incelendiğinde mısır sapı biyokütlesinin her 2 dönemde de yüksek risk teşkil ettiği öngörülürken diğer biyokütlelerde çelişkili sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Kirlenme indeksi (Fu)

Klorun bulunmadığı veya düşük seviyede olduğu durumlarda, alkali, tortu oluşumunda kritik bir rol oynar. Potasyum ve sodyum, biyokütlede organik formda bulunur, ancak yanma sürecinde bu elementler buharlaşarak ayrışır, sonuç olarak

çok düşük erime sıcaklıklarına sahip ötektik bileşikleri oluştururlar. Bu durum, cüruflaşma ve kirlenme eğilimlerini artırır (Tortosa Masia vd., (2007); Miles vd., 1996)). B/A indeksinin Na_2O ve K_2O toplamı ile tamamlanmasının nedeni budur. Ancak bu indeks için Tablo 6'da elde edilen sonuçlar, genel olarak tarımsal biyokütlelerin odunsu biyokütlelere göre cüruf veya kirlenmeye daha duyarlı olduğunu gösteren önceki sonuçlar ve deneyimlerle tutarsızdır (Bryers, 1996).

Cüruf viskozite indeksi (Sr)

Sr indeksi, Denklem 6'da belirtildiği üzere, silikayı kül birikiminden en az sorumlu bileşenlerden biri olarak kabul eder. Tarımsal biyokütleler, odunsu biyokütlere nazaran daha düşük bir cüruf eğilimi gösterir. Tablo 6'da verilen sonuçlar, dikkate alınan diğer bazı indislerin ve deneysel sonuçların tamamen tersidir. Örneğin; Nisan 2021 döneminde SiO_2 içeriği en yüksek olan saz kamışı ve mısır sapı SiO_2 indisine göre yüksek cüruf ve kirlenme risk eğilimi gösterirken aynı dönemde aynı biyokütle türleri Sr indisine göre düşük ve orta seviye risk eğilimi göstermektedir.

Yumuşama sıcaklığı (ST)

Biyokütle küllerinin eriyebilirliğine özellikle yumuşama sıcaklığı (ST)'ye ilişkin çalışmalar literatürde azdır. Önceki çalışmalar, SiO_2 ilavesinin, ST'yi düşüren ve dolayısıyla biyokütle kül füzyon sıcaklığını düşüren önemli miktarda K-silikat oluşumuna yol açtığını belirtmektedir (Niu vd. 2014). Tablo 6'da biyokütlere ilişkin verilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise SiO_2 içeriği ile ST değeri arasında doğrudan bir ilişki çıkarılamaz.

İlk deformasyon sıcaklığı (IDT)

IDT, silikat erimesiyle indüklenen cüruf için bir değerlendirme indisi olarak hizmet edebilir, çünkü daha yüksek IDT, silikat erimesiyle indüklenen cüruf oluşumunun oluşma potansiyelini azaltır (Niu vd., 2014). Tablo 6'da gösterilen Nisan 2020 ve Nisan 2021 döneminde analiz edilen numune sonuçlardan anlaşılacağı üzere, saz kamışı ve mısır sapı gibi genellikle daha yüksek SiO_2 içeriğine sahip biyokütleler, daha düşük IDT değerlerine sahip olanlar olacaktır. Diğer taraftan farklı dönemlerde yapılan analiz sonuçları üzerinden yapılan değerlendirmede çelişkili sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Çelişkili sonuçlar, aynı biyokütle türlerinin farklı dönemlerdeki analizlerinde değişen değerlerin ortaya çıkmasıyla ilgilidir. Örneğin, Tablo 6'da gösterilen Nisan 2020 ve Nisan 2021 dönemlerinde analiz edilen numuneler arasında farklı SiO_2 içeriği ve cüruflaşma indeksi değerleri görülmektedir. Aynı biyokütlenin farklı dönemlerde farklı analiz sonuçlarına sahip olması, muhtemelen numune alımı sırasında yaşanan değişiklikler veya analiz yöntemlerindeki farklılıklardan kaynaklanabilir. Bu tür çelişkiler, analiz sürecindeki standartlaşma eksikliği veya dış etkenlerin etkisi gibi faktörlerden kaynaklanabilir ve sonuçların doğruluğunu etkileyebilir. Bu nedenle, benzer analizlerin farklı dönemlerde tekrarlanması ve sonuçların karşılaştırılması önemlidir.

ST ile IDT arasındaki sıcaklık farkları, biyokütle cürufunun hareketliliğini etkiler. Bu farkın daha geniş olması, daha yavaş bir kirlenme oranına işaret eder. (Vamvuka ve Zografos, 2004). Bu nedenle, erime sıcaklıkları arasındaki farklar dikkate alındığında cüruf davranışı hakkında daha fazla bilgi elde edilebilir. Tablo 6'dan da görülebileceği üzere, ST ve IDT arasındaki sıcaklık farkları genellikle 100°C'nin altındadır. Bu durum, çoğu biyokütle cürufunun hızla katılışp, hava akışı nedeniyle ısıtma yüzeylerinde kolayca bir cüruf tabakası oluşturabileceği anlamına gelmektedir.(Li vd., 2013).

Sonuçlar

Katı biyokütle yakıtlarının kullanımını kısıtlayan başlıca zorluklardan biri, kül yönetimidir. Kazanlarda hasarları azaltmak için yakıtların kalitesi analiz edilmektedir. Ancak temsili numunelerin toplanmasının zorluğu nedeniyle kalite kontrolü kritik bir öneme sahiptir. Örneğin 1 gram numune, 1000 tonluk bir yakıt dağılımını analiz etmek için kullanılabilir. Bu nedenle genellikle analiz değerlerinde oluşabilecek hataların %80'e kadar numune alımına, %15'i numune işlemeye %5'e kadar olan kısmı ise analize bağlı değişkenlik göstermektedir (Strömberg & Herstad Svard, 2012).

IDT şndeks değerleri açısından incelendiğinde tüm biyoküteller 1168-1390 değeri arasında (>1100) düşük risk eğilimi gösteren grupta yer almaktadır. Cl indeksi incelendiğinde Nisan 2020 döneminde mısır sapı ve saz kamışı 0,264 ve 0,249 değerle orta derecede bir risk eğilimi barındırırken, Nisan 2021 döneminde 0,06 ve 0,157 değer ile düşük risk grubunda yer almıştır. SiO₂ indeksi içeriği incelendiğinde ise saz kamışı 74,4 ile en yüksek, mısır sapı 52,7, kavak kapak ise 33,8 ile yüksek SiO₂ içeriği yüksek cüruf ve kirlenme eğilimi riski barındırmaktadır. Fakat SiO₂ içeriğinin her indekste risk parametresini artırıcı bir faktör olduğu söylenemez. Örneğin Nisan 2021 döneminde yüksek risk eğilimi gösteren ve SiO₂ içeriği yüksek saz kamışı, mısır sapı ve kavak kapak, Cl, B/A, BAI, Fu, Sr ve IDT indekslerinde düşük ve orta risk grubunda yer almaktadır.

Bu çalışma, açık hava koşullarında depolanan, farklı zaman dilimlerinde numuneler alınarak analiz edilen 5 farklı tarımsal ve ormansal biyokütlenin (mısır sapı, saz kamışı, kök, çam kapağı, kavak kapağı) cüruf oluşturma ve kirlenme eğilimlerini net bir şekilde ilişkilendirebilecek genel bir formülün olmadığını göstermektedir. Kömür külü birikintilerini tahmin etmek için geleneksel olarak kullanılan katsayılar, biyokütle yakıtlarına uygulandığında karışık sonuçlar verir. Sonuç olarak, bu indislerden bazılarını dayanarak biyokütle yakıtlarının cüruflaşma ve kirlenme eğilimlerini tahmin eden araştırma bulgularının sorgulanması gerekmektedir. Yeni indislerin oluşturulması, yalnızca yakma teknolojisi ve koşullarının etkisi değil, aynı zamanda katı biyokütle yakıtlarının heterojenliği ve fizikokimyasal karakterizasyonları da dikkate alınarak, gerçek yanma deneyimlerinden elde edilen gerçekçi sonuçlara dayanmalıdır. Sonuç olarak, farklı yakma

teknolojileri ve çalışma koşulları bağlamında indisler oluşturmak ve doğrulamak için kullanılan hammaddelerin özelliklerini de dikkate alarak, gerçek yanma verileri ile daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Kaynakça

- Aho, M., Silvennoinen, J. (2004). Preventing chlorine deposition on heat transfer surfaces with aluminum-silicon rich biomass residue and additive. *Fuel*, 83(9), 1299-1305. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.01.011>.
- Badem, A. & Olgun, H. (2023). Saha Koşullarında Depolanan Biyokütle Yakıtlarında Oluşan Kuru Madde Kayıplarının İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 64 (712), 549-575. doi: <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1241446>
- Baxter, L. L., Miles, T. R., Jenkins, B. M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R. W., et al. (1998). The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Processing Technology*, 54(1), 47-78. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00060-X).
- Behcet, R., & Yakın, A. (2020). Malatya İli Trafik Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Emisyon Envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2783-2790. doi: <https://doi.org/10.21597/jist.704308>
- Bryers, R. W. (1996). Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(1), 29-120. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(95\)00012-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7).
- Cuiping, L., Chuangzhi, W., & Haitao, H. (2004). Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Bioenergy*, 27(2), 119-130. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.002>.
- Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.02.002>.
- Dunnu, G., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2010). Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels. 17th International Symposium on Alcohol Fuels, 89, 1534-1540. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.008>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). Erişim tarihi: [16.10.2023]. Erişim Adresi: [<https://enerji.gov.tr>].
- Fernandez Llorente, M.J., & Carrasco García, J.E. (2005). Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. *Fuel*, 84(12), 1893-1900. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.04.010>.

- Garcia-Maraver, A., Mata-Schancez, J., Carpio, M., & Perez-Jimenez, J. A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.002>.
- García, R., Pizarro, C., Alvarez, A., & Lavín, A.G. (2015). Study of biomass combustion wastes. *Fuel*, 148 (15), 152-159. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.079>.
- Gilbe, C., Ohman, M., Lindström, E., Boström, D., Backman, R., & Samuelsson, R. (2008). Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets. *Energy & Fuels*, 22(4), 3536-3543. doi: <https://doi.org/10.1021/ef800087x>.
- Gray, R.J., & Moore, G.F. (1974). Burning the sub-bituminous coals of Montana and Wyoming in large utility boilers. ASME Paper, 74eWA/FUe1
- Gupta, S.K., Gupta, R.P., Bryant, G.W., & Wall, T.F. (1998). The effect of potassium on the fusibility of coal ashes with high silica and alumina levels. *Fuel*, 77(11), 1195-1201. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00016-7).
- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R. Jr., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54(1), 17-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3).
- Jenkins, B.M., Bakker, R.R., & Wei, J.B. (1996). On the properties of washed straw. *Biomass and Bioenergy*, 10(3-4), 177-200. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00058-5](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00058-5).
- Knudsen, J. N., Jensen, P. A., Dam-Johansen, K. (2004). Transformation and release to the gas phase of Cl, K, and S during combustion of annual biomass. *Energy & Fuels*, 18(5), 1385-1399. doi: <https://doi.org/10.1021/ef049944q>.
- Li, Q.H., Zhang, Y.G., Meng, A.H., Li, L., & Li, G.X. (2013). Study on ash fusion temperature using original and simulated biomass ashes. *Fuel Processing Technology*, 107, 107-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.08.012>.
- Llorente, M., Laplaza, J., Cuadrado, R., & Garcia, J. (2006). Ash behaviour of lignocellulosic biomass in bubbling fluidised bed combustion. *Fuel*, 85(9), 1157-1165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.019>.
- Miles, T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., & Oden, L.L. (1996). Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(3-4), 125-138. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00067-4).
- Mohan, D., Pittman, C.U., & Steele, P.H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(20), 848-889. doi: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>.

- Moilanen, A. (2006). Thermogravimetric Characterisations of Biomass and Waste for Gasification Processes. VTT Technical Research Centre of Finland. Publications No 607.
- Munir, S. (2010). Potential slagging and fouling problems associated with biomass-coal blends in coal-fired boilers. *Journal of the Pakistan Institute of Chemical Engineers*, 38(1), 1-11.
- Niu, Y., Zhu, Y., Tan, H., Wang, X., Hui, S., & Du, W. (2014). Experimental study on the coexistent dual slagging in biomass-fired furnaces: alkali- and silicate melt-induced slagging. *Proceedings of the Combustion Institute*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.120>.
- Nordin, A. (1994). Chemical elemental characteristics of biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 6(6), 339-347. doi: [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(94\)E0031-M](https://doi.org/10.1016/0961-9534(94)E0031-M).
- Obernberger, I., Biedermann, F., Widmann, W., & Riedl, R. (1997). Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. *Biomass and Bioenergy*, 12(3), 211-224. doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(96\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(96)00051-7).
- Ohman, M., Boman, C., Hedman, H., Nordin, A., & Boström, D. (2004). Slagging tendencies of wood pellet ash during combustion in residential pellet burners. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 585-596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.016>.
- Pronobis, M. (2005). Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 375-383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.003>.
- Skrifvars, B.-J., Ohman, M., Nordin, A., & Hupa, M. (1999). Predicting bed agglomeration tendencies for biomass fuels fired in FBC boilers: a comparison of three different prediction methods. *Energy & Fuels*, 13(2), 359-363. doi: <https://doi.org/10.1021/ef980045p>.
- Strömberg, B. ve Herstad Svard, S. (2012). Branslehandboken. Varmeforsk, Stockholm.
- Szemmelveisz, K., Szucs, I., Palotas, A. B., Winkler, L., & Eddings, E. G. (2009). Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass. *Fuel Processing Technology*, 90(7-8), 839-847. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.001>.
- Teixeira, P., Lopes, H., Gulyurtlu, I., Lapa, N., & Abelha, P. (2012). Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a flu-

- idized bed. *Biomass and Bioenergy*, 39(39), 192-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.010>.
- Tortosa Masia, A. A. A., Buhre, B. J. P. J. P., Gupta, R. P. P., & Wall, T. F. F. (2007). Characterising ash of biomass and waste, Impacts on Fuel Quality and Power Production. *Fuel Processing Technology*, 88(11-12), 1071-1081. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.011>.
- Vamvuka, D., & Zografos, D. (2004). Predicting the behavior of ash from agricultural wastes during combustion. In *East Meets West Heavy Oil Technology Symposium (Vol. 83, pp. 2051-2057)*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.012>.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., & Vassileva, C. G. (2014). An overview of the behaviour of biomass during combustion: part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel*, 117, 152-183. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.024>
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E.-U., Ogada, T., & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1), 1-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2).
- Wigley, F., Williamson, J., Malmgren, A., & Riley, G. (2007). Ash deposition at higher levels of coal replacement by biomass. *Fuel Processing Technology*, 88(7), 1148-1154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.015>.
- Wilén, C., Moilanen, A., & Kurkula, E. (1996). Biomass feedstock analyses. VTT Publications, 282, Espoo.
- Yakın, A., & Behçet, R. (2019). Van İli Trafik Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Emisyon Envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1567-1573. Doi: <https://doi.org/10.21597/jist.548606>
- Yu, L.Y., Wang, L.W., & Li, P.S. (2014). Study on prediction models of biomass ash softening temperature based on ash composition. *Journal of the Energy Institute*, 87(4), 215-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.03.011>.
- Zevenhoven-Onderwater, M., Blomquist, J.-P., Skrifvars, B.-J., Backman, R., & Hupa, M. (2000). The prediction of behaviour of ashes from five different solid fuels in fluidised bed combustion. *Fuel*, 79, 1353-1361. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00280-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00280-X).