



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Çan Linyiti ile Kayın Ağacı Odununun Sabit Yatakta Birlikte Yakılması

 Melek YILGIN^{a,*},  Neslihan DURANAY^a,  Dursun PEHLİVAN^a

^a*Kimya mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE*

** Sorumlu yazarın e-posta adresi: myilgin@firat.edu.tr*

DOI: 10.29130/dubited.902758

Öz

Bu çalışmada, linyit ve belirli oranlarda kayın ağacı odunu tozu karışımlarından hazırlanan 13 mm çaplı peletlerin ön ısıtmalı dikey bir fırın sisteminde doğal konveksiyonla yukarı yükselen hava içindeki yanma davranışları incelenmiştir. Karışımların tutuşma sürelerinin sıcaklık arttıkça kayın ağacının tutuşma süresine yaklaştığı ve uçucu madde yanma süresi boyunca iki yakıtın belirli ölçüde etkileştiği görülmüştür. Yakıtlar arasındaki bu etkileşimden dolayı uçucu madde yanma sürelerinin yanma hızları ile uyumlu olmadığı, ancak iki yakıtın ve karışımlarının karbon yanma sürelerinin genellikle yanma hızları ile uyumlu olduğu gözlemlendi. Uçucu madde ve karbon yanma hızındaki değişimin fırın başlangıç sıcaklığı ve karışım içerisindeki yakıt oranlarına bağlı olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: *Odun, Linyit, Birlikte yanma, Sabit yatak*

Co-combustion of Çan Lignite and Beech Wood in Fixed Bed

ABSTRACT

In this study combustion behaviors of 13 mm diameter pellets prepared from blends of lignite and beech wood powders in specific proportions were investigated in air which was flowing upwards by natural convection through a vertical pre-heated furnace system. The results revealed that ignition times of the blends approached to those of wood with temperature and showed certain interactions of the two fuels during volatiles combustion period. Due to these interactions, volatiles combustion times did not comply with combustion rates. However, carbon combustion times of the two fuels and their blends generally complied with rates. It was observed that the change in volatile matter and carbon combustion rate depended on the furnace starting temperature and the fuel ratios in the mixture.

Keywords: *Wood, Lignite, Co-combustion, Fixed bed*

I. GİRİŞ

Biyokütle terimi hayvan gübresi, bitkilerden elde edilen materyaller (odunsu, otsu bitkiler ve tarımsal atıklar) ve algleri ifade etmektedir. Bitkiler tarafından absorbe edilen güneş enerjisi bitkilerin büyümesi için gerekli olan fotosentez işleminde kullanılır. Canlı organizmalarda depolanan bu enerji biyokütle enerjisi olarak adlandırılır [1,2] İlksel olarak güneş enerjisine dayandığı için yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Dünyadaki potansiyeli göz önüne alındığı zaman biyokütle dünyanın enerji ihtiyacının bir kısmını karşılamakta aktif rol oynayacak yakıt olarak karşımıza çıkmaktadır [3].

Biyokütle pek çok yönden çevre dostu olarak düşünülmektedir. İlk olarak biyokütle yanma gazı atmosferik CO₂ miktarında net bir artışa sebep olmaz. Çünkü biyokütlenin yanması sırasında oluşan CO₂ büyümesi sırasında absorbe ettiği CO₂'dir. Bu nedenle biyokütle enerjisi atmosferik CO₂ çevrimine yardımcı olur ve sera etkisine net bir katkısı bulunmaz [4,5]. Biyokütle atıklarının kömür ile birlikte yakılması bu atıkların depolandığı alanda salınan CH₄'ün azaltma yollarından biridir. Metanın küresel ısınmada CO₂'den 21 kat daha tehlikeli olduğu belirtilmektedir. Biyokütlenin pek çok türü çok az veya hiç kükürt içermediği için kömür ile birlikte yakılmaları net SO₂ emisyonunu azaltabilir. Yüksek kükürt içerikli kömürler ile birlikte yakıldığı zaman bu katkı net olarak görülebilir. Aynı zamanda biyokütlenin alkali külü yanma süresince SO₂'nin bir kısmının giderilmesine yardımcı olabilir [5, 6].

Peletleme, esas olarak biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırmak, yanma ve gazlaştırma dahil olmak üzere evsel ve endüstriyel enerji ile ilgili uygulamalarda biyokütle kullanımını kolaylaştırmak için tek tip şekil vermek için uygulanmaktadır [7]. Şu anda, ağırlıklı olarak oduna dayanan iyi gelişmiş bir peletleme teknolojisi ve lojistiği mevcuttur. Odun peletleri, birçok evsel ve endüstriyel uygulamada yüksek kaliteli yenilenebilir yakıt olarak kullanım alanı bulmuştur [8,9].

Biyokütle ile kömürün birlikte yanma davranışının incelendiği birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalar biyokütlenin düşük ranklı kömürlerin reaktivitesini artırdığını, yüksek ranklı kömürler üzerinde etkili olmadığını ve sinerjik etki yarattığını göstermektedir [10]. Karışım içerisindeki biyokütle miktarının yanmayı etkilediği [11], biyokütle oranındaki artış ile karışımın tutuşma sıcaklığının biyokütleye yaklaştığı ve ilk olarak karışımındaki biyokütlenin daha sonra kömürün yandığı görülmüştür [12]. Pelet haline getirilmiş biyokütle-linyit karışımlarının yanma davranışının incelendiği çalışmalar da bulunmaktadır [13,14].

Mevcut elektrik santrallerinde kömür ile katı atıkların birlikte yakılması çevresel faydaların yanında teknik ve ekonomik avantajlar sunan en ilginç seçeneklerden biridir. Ancak biyokütlelerin uçucu madde içeriği yönünden kömürden farklı olması nedeni ile diğer faktörlerle birlikte yakma sistemlerinde birtakım değişikliklerin göz önüne alınması gerekebilir. Bu nedenle bu yakıtların yanma süresince hem tek başına hem de birlikte yanma davranışının incelenmesi önemlidir. Çünkü bu yakıtlar arasındaki etkileşimler işlemin genel verimliliğini etkileyebilir [15].

Ülkemiz rezerv ve üretim miktarları açısından linyitte dünya ölçeğinde orta düzeyde, taşkömüründe ise alt düzeyde değerlendirilebilir. Toplam dünya linyit/alt bitümlü kömür rezervinin yaklaşık %3,2'si ülkemizde bulunmaktadır. Bununla birlikte linyitlerimizin büyük kısmının ısı değeri düşük olduğundan termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmıştır. Kömür rezervimizde yaklaşık 11 milyar tonun üzerinde rezerv artışı sağlanmış olup 2005 yılında 8,3 milyar ton olan linyit rezervlerimiz 19,3 milyar tona ulaşmıştır [16].

Türkiye'nin enerji gereksiniminin linyite dayalı olması ve linyitlerin yakılmasının genel olarak çevre üzerinde olumsuz etkileri nedeni ile bu linyitlerin biyokütle ile birlikte yakılması ile ilgili çalışmalar gereklidir. Linyit ve biyokütlenin birlikte yanma davranışının incelenmesi atık yönetimi ve enerji ekonomisi konuları arasında özel bir öneme sahiptir. Literatürde linyit-biyokütle karışımlarının yanma davranışının tutuşma süresi, uçucu madde yanma süresi, karbon yanma süresi, uçucu madde yanma

hızı, karbon yanma hızı yönünden ve karışımların pelet halinde incelendiği çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle çalışmada, çeşitli bileşimlerdeki Çan linyiti ve kayın ağacı odunu karışımlarından hazırlanan peletlerin sabit yatak yakma sisteminde yanma davranışı üzerine karışım oranı ve fırın başlangıç sıcaklığının etkisi incelendi.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

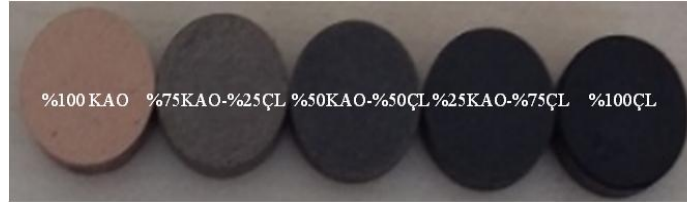
A. PELETLERİN HAZIRLANMASI VE YAKMA

Linyit ile biyokütlenin birlikte pelet halinde yanma davranışının incelendiği çalışmada Çan linyiti (ÇL) ve kayın ağacı odunu (KAO) kullanıldı.

A. 1. Peletlerin Hazırlanması ve Analizler

Örnek alma metoduna göre alınan linyit parçaları havanda dövülerek öğütüldü. Kereste doğrama atölyesinden temin edilen kayın ağacı odun talaşı (KAO) ise zaten toz halinde olduğundan öğütme işlemine tabi tutulmadı. Toz halindeki odun ve linyit örnekleri Retsch marka titreşimli elek sisteminde elenerek -100 mesh tane büyüklüğü çalışmada kullanılmak üzere alındı. Linyit ve odunun uçucu madde ve kül analizleri (kısa analiz) için yaklaşık 2g %25, %50 ve %75 KAO içerecek şekilde homojen linyit-odun tozu karışımları hazırlandı. Ham yakıtlar ile bunlardan hazırlanan karışımların kül ve uçucu madde miktarları ASTM standartlarına göre ham yakıtların (%100ÇL ve %100KAO) nem içeriği ise Mettler LJ16 nem tayin cihazında belirlendi.

Ham odun ve linyit tozundan %25, %50 ve %75 KAO içeren yaklaşık 1g karışımlar hazırlandı. Ham tozlar ve karışımlar pelet kalıbına yerleştirildikten sonra 30s süre ile hidrolik preste 5 ton basınç uygulanarak 13 mm çaplı yaklaşık 5-6 mm yüksekliğinde peletler hazırlandı (Şekil 1). Her bir deney parametresinin incelenmesi amacıyla bu şekilde her bir örnekten en az 2 adet pelet hazırlandı.

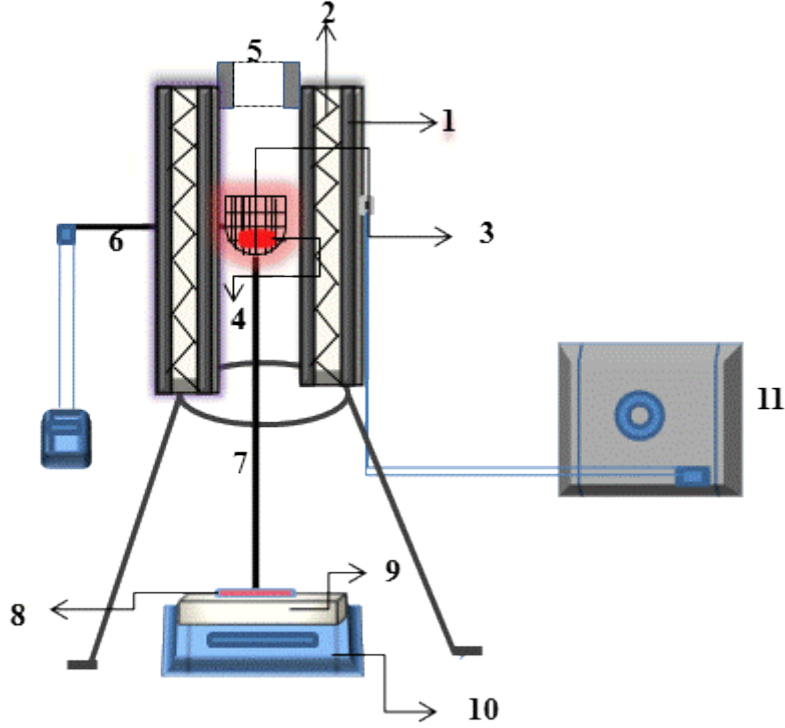


Şekil 1. Ham ve karışım peletleri.

A. 2. Yakma sistemi ve yakma deneyleri

Yakma deneyleri 105 mm çapında 115 mm yüksekliğinde iç oluklarından direnç telleri geçirilmiş silindirik kesitli refrakter tuğla bulunduran dikey bir kamarada yürütüldü.

Paslanmaz çelikten yapılmış 30 mm çaplı elek sepet 250 mm uzunluğundaki çelik çubuğun ucuna takılmış olarak bir destek üzerine sabitlendi. Sepet ve destek yanma sırasındaki kütle değişimlerinin kaydedilmesi amacı ile hassas terazi ($\pm 0,001$ g) üzerine yerleştirildi. Çalışma sıcaklığı, fırın içerisinden geçirilen ve elek sepet ile temas etmeyecek şekilde elek sepete yakın bir şekilde yerleştirilen termoçift (NiCr) ile takip edildi. Sabit yatak yakma sistemi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Sabit yatak yakma sistemi: 1. Refrakter tuğla; 2 Direnç teli; 3. Sepet; 4. Pelet; 5. Çelik kapak; 6. Termoçift; 7. Sepet çubuğu; 8. Ayna; 9. Destek; 10. Terazi; 11. Gerilim değiştirici.

Yakma deneylerinde ön ısıtılmış sabit yatak içindeki sepet içerisine ağırlığı bilinen pelet (KAO, ÇL veya KAO-ÇL) düşüldüğü anda kronometre çalıştırıldı. Sisteme yerleştirilmiş ayna yardımı ile alev görülme ve alev sönme zamanları belirlenerek bu değerler arasındaki farktan uçucu madde yanma süresi belirlendi. Uçucu madde ayrılma periyodunda ve karbon yanma periyodunda her 5 s 'de bir peletin kütleindeki değişim kamerayla kaydedildi. Ham yakıtlar ile bunlardan hazırlanan karışımların yanma davranışları 500, 600 ve 700 °C fırın başlangıç sıcaklıklarında yürütüldü.

Uçucu madde ve karbon yanma hızları yanma sırasında peletin kaydedilen kütle değişimi eğrilerinin ortalama eğimleri ve başlangıç miktarlarından (1) denklemi ile hesaplandı [17]. Burada W_0 örneğin uçucu madde veya sabit karbon miktarını temsil etmektedir. Ham ve karışımların yanma davranışı, her bir fırın başlangıç sıcaklığında en az iki defa yürütüldü.

$$R = \left(1/W_0\right) \left(dW/dt\right)_{ort} \quad (1)$$

III. DENEYSEL SONUÇLAR

KAO, ÇL ve bunlardan hazırlanan karışımların kısa ve elementel analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Linyit ile karşılaştırıldığında odunun uçucu madde içeriği yüksek nem, kül ve sabit karbon içeriği düşüktür. Karışımların kül ve uçucu madde içerikleri ham yakıtlar arasındadır ve karışım içerisindeki linyit veya odun oranı arttıkça ham yakıtlara yaklaşmaktadır. Tabloda parantez içerisindeki değerler, aşağıda verilen (2) ve (3) denklemlere göre hesaplanan beklenen değerleri göstermektedir. Beklenen değerler, ham linyit ve ham odunun deneysel olarak belirlenen uçucu madde ve kül içerikleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bütün karışımların deneysel olarak belirlenen uçucu madde içeriğinin beklenen değerlerden düşük olması KAO'dan uçucu maddelerin çıkışının linyitin uçucu madde çıkışı üzerine etkisi olduğunu göstermektedir. Biyokütle-linyit karışımlarının yanma davranışının incelendiği benzer çalışmalarda deneysel olarak belirlenen uçucu madde miktarlarının beklenen değerlerden yüksek veya düşük olduğu çalışmalar bulunmaktadır [17, 18].

$$\text{Karışımın beklenen uçucu madde miktarı (\%)} = x \cdot U_{\text{ÇL}} + y \cdot U_{\text{KAO}} \quad (2)$$

$$\text{Karışımın beklenen kül miktarı (\%)} = x \cdot K_{\text{ÇL}} + y \cdot K_{\text{KAO}} \quad (3)$$

(2) ve (3) denklemlerinde x, karışım içerisindeki linyitin oranını; y, karışım içerisindeki odunun oranını; $U_{\text{ÇL}}$, linyitin deneysel olarak belirlenen uçucu madde miktarını; U_{KAO} , odunun deneysel olarak belirlenen uçucu madde miktarını; $K_{\text{ÇL}}$, linyitin deneysel olarak belirlenen kül miktarını ve K_{KAO} , odunun deneysel olarak belirlenen kül miktarını göstermektedir.

Tablo 1. Linyit, odun ve karışımların kısa analiz sonuçları ile ham yakıtların elementsel analizi. (% , *:Farktan belirlendi ve +:nem dahil uçucu madde miktarını belirtmektedir.)

Örnek	% Nem	Uçucu madde miktarı ⁺	Kül Miktarı	Sabit karbon miktarı *	C	H	N	S	O*
%100KAO	3,7	83,7	0,8	15,5	46,5	6,8	0,3	-	46,4
%75KAO-	-	71,0 (75,8)	3,3	25,7					
%25ÇL			(2,5)						
%50KAO-	-	61,8 (67,8)	5,1	33,1					
%50ÇL			(4,3)						
%25KAO-	-	52,1 (59,9)	6,9	41,0					
%75ÇL			(6,0)						
%100ÇL	13,7	51,9	7,7	40,4	63,8	4,9	1,9	2,8	26,6

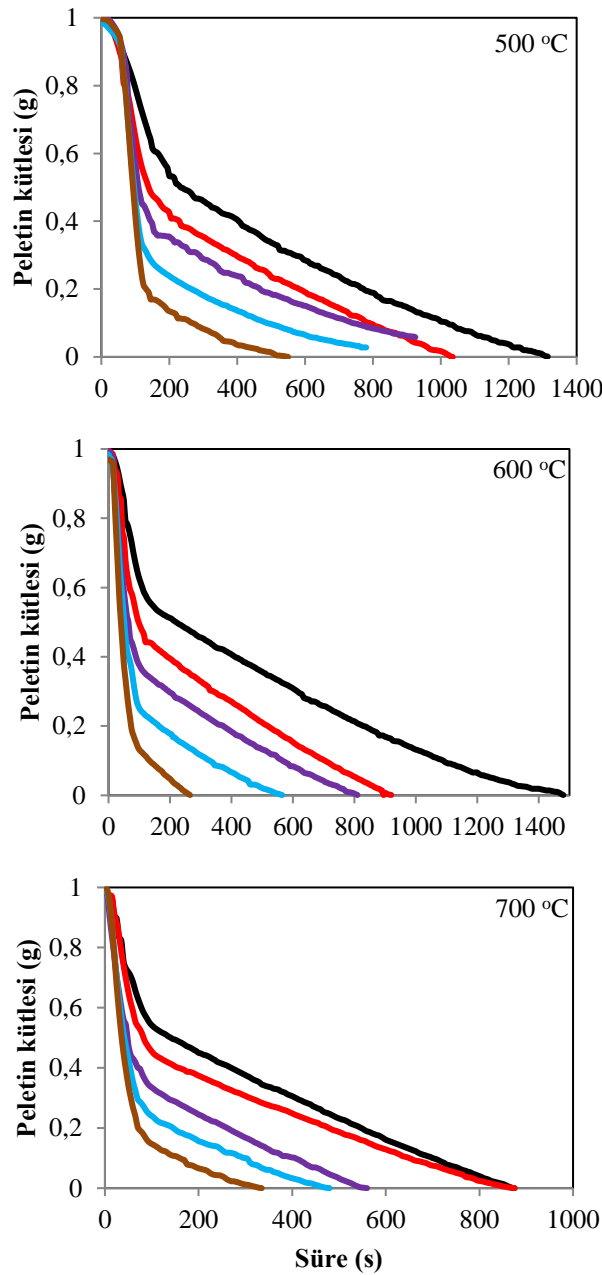
KAO, ÇL ve KAO-ÇL karışımlarının farklı fırın başlangıç sıcaklıklarında (500, 600 ve 700 °C) yanma süresince peletin zamanla kaydedilen kütle değişimleri Şekil 3'de görülmektedir. Tüm yanma eğrileri uçucu bileşenler ve karbon yanma süreleri ile ilişkili olarak kolayca ayırt edilebilir iki bölgeye sahiptir. KAO-ÇL karışım eğrileri her bir fırın başlangıç sıcaklığında ham örnekler arasında uzanmakta ve karışım içerisindeki KAO veya ÇL içeriğine göre ham örneklerle yaklaşmaktadır. Literatürde düşük ve yüksek ranklı kömürlerin birlikte yanma davranışının TGA'da incelendiği çalışmada benzer durum görülmüştür [19]. Bu durum özellikle %25KAO içeren karışımın yanma davranışının ham linyitte yakın olduğu 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında belirgindir. Diğer yakma sıcaklıklarında bu karışımın yanma eğrisinin ham linyitten yanma eğrisinden uzak olduğu görülmektedir.

Şekil 3' deki eğrilerin eğiminden ve yukarıda verilen hız denkleminde hesaplanan uçucu madde (R_v) ve karbon yanma hızları (R_c), tutuşma süresi, uçucu madde ve karbon yanma süreleri Tablo 2' de verilmiştir.

Fırın başlangıç sıcaklığının 500 °C olduğu yakma sıcaklığında yürütülen deneylerde ham linyit (%100 ÇL) ve %75 ÇL içeren karışımın yanması sırasında alev gözlenemediği için tutuşma süreleri belirlenemedi. Tutuşma süresi, herhangi bir yakıtın uçucu bozunma ürünlerindeki yanıcı bileşenlerin pelet etrafında yeterli konsantrasyona ulaştığı sıcaklıklarla ilgilidir [18]. Linyit, aromatik yapılar bulundurmasına karşın odun başlıca hemiselüloz, selüloz ve ligninden oluşmaktadır. Odunun yapısını oluşturan hemiselülozun 225-325 °C, selülozun 305-375 °C ve ligninin ise 250-500 °C sıcaklık aralığında parçalandığı [20], uçucu bileşenlerin biyokütleden 300 °C altında kömürden ise 450-500 °C'de salındığı belirtilmektedir [21]. Fırın başlangıç sıcaklığının linyitten parçalanma sıcaklığına yakın olması nedeniyle %100ÇL ve %75ÇL içeren karışımda pelet etrafında yeterli yanabilen uçucu madde konsantrasyonunun oluşmadığını göstermektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi linyitin uçucu madde içeriği biyokütleden oldukça düşüktür. Tutuşma süreleri üzerine uçucu maddenin etkisi rapor edilmiştir [22]. Ham yakıtlar ile karışımların tutuşma sürelerinin fırın başlangıç sıcaklığının yükselmesi ile belirgin olarak kısaldığı ve karışım içerisindeki biyokütleye yaklaştığı Tablo 2' de

görülmektedir. Bu durum, karışımı oluşturan yakıtların sıcaklık artışı ile parçalanma sıcaklıklarına çok çabuk ulaştığını ve biyokütlenin daha önce parçalandığını gösterir. Biyokütle-lyinyit karışımlarının yanma sırasında biyokütlenin önce yandığı belirtilmiştir [12].

Peletin sepet üzerine düşürülmesinden belirli bir süre sonra alevin görüldüğü an ile alevin gözden kaybolduğu an arasındaki farkı gösteren uçucu madde yanma süresi fırın başlangıç sıcaklıkları ile düzenli bir değişim sergilememektedir. Uçucu madde yanma süresi, 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında ham yakıtlar ile karışımlarda artış göstermiştir. Bu süreler 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında azalmıştır. Bu durum düşük fırın başlangıç sıcaklığında (500 °C) ham biyokütle ve % 50'ye kadar biyokütle içeren karışımlarda uçucu bileşenlerin peletten tamamen salınmadığını göstermektedir. Ham linyit ve %75ÇL içeren karışımda tutuşma süresinin belirlenememesi de bu durumu doğrulamaktadır. Fırın başlangıç sıcaklığının 600 °C olduğu durumda uçucu bileşenler taneden büyük oranda ayrılmış ve 100 birim sıcaklık artışı ile bu süre belirgin olarak kısalmıştır.



Şekil 3. Yanma süresince ÇL, KAO ve karışımların kütlesindeki değişimler (—:%100ÇL, —:%25KAO-%75ÇL-%, —:%50KAO-%50ÇL,, —:%75KAO-%25ÇL, —:%100KAO).

Şekil 3'de uçucu madde yanma eğrisinin eğiminden ve yukarıda verilen hız denklemi kullanılarak belirlenen uçucu madde yanma hızı ham yakıtlar ve karışımlarda fırın başlangıç sıcaklığındaki artış ve karışım içerisindeki odun oranı ile beklenildiği gibi artmıştır. Karışımların uçucu madde yanma hızı, 700 °C fırın başlangıç sıcaklığı dışında ham yakıtların uçucu madde yanma hızları arasındadır. Karışımların uçucu madde yanma hızlarının 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında ham yakıtlardan yüksek olması bu iki yakıtın uçucu madde yanma sırasında farklı davrandıklarını gösterebilir. Tablo 1'de karışımların beklenen değerlerinin deneysel değerlerden farklı olması da bunu doğrulamaktadır. Uçucu madde yanma süresi ile uçucu madde yanma hızları karşılaştırıldığında aralarında bir ilişki kurulamayacağı Tablo 2'den görülmektedir. Bu durum alev görülmeden önce de peletten uçucu madde ayrılmasından kaynaklanmaktadır [17]. Uçucu madde yanma eğrisine ait regresyon katsayıları uçucu madde yanma hızının doğrusal uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Linyit, biyokütle ve karışımların farklı fırın başlangıç sıcaklıklarındaki yanma sonuçları.

Sıcaklık (°C)	Örnek	Tutuşma süresi (s)	Uçucu madde yanma süresi (s)	$R_v \cdot 10^2$ (s^{-1})	R^2	Karbon yanma süresi (s)	$R_c \cdot 10^3$ (s^{-1})	R^2
500	%100KAO	63	67	0,85	0,94	404,5	2,66	0,98
	%75KAO-%25ÇL	67	62	0,88	0,91	631,5	1,52	0,96
	%50KAO-%50ÇL	80,5	56	0,85	0,91	812	1,30	0,98
	%25KAO-%75ÇL	-	-	0,78	0,98	159	1,30	0,99
	%100ÇL	-	-	0,51	0,98	144,5	1,20	0,98
600	%100KAO	11	80	1,30	0,98	311,5	5,21	0,99
	%75KAO-%25ÇL	16,5	76	1,23	0,97	568	1,99	0,99
	%50KAO-%50ÇL	17,5	73	1,24	0,97	754,5	1,56	0,99
	%25KAO-%75ÇL	21	69,5	1,18	0,97	1134,5	1,43	0,99
	%100ÇL	99	58,5	0,66	0,96	1267	1,11	0,99
700	%100KAO	7	74,5	1,35	0,96	278,5	3,99	0,99
	%75KAO-%25ÇL	6	68	1,56	0,97	475	2,50	0,99
	%50KAO-%50ÇL	8	69,5	1,38	0,96	655	2,20	0,99
	%25KAO-%75ÇL	11	65	1,45	0,98	1005	1,42	0,99
	%100ÇL	24,5	55,5	1,00	0,98	1061,5	1,87	0,99

Pelet akkorluğunun gözden kaybolduğu zaman ile alevin gözden kaybolduğu zaman arasındaki farkı gösteren karbon yanma süreleri ve Şekil 3' deki karbon yanma eğrilerinin eğiminden ve yukarıda verilen hız denklemi kullanılarak belirlenen karbon yanma hızları Tablo 2'de verilmiştir.

Ham odunun karbon yanma sürelerinin fırın başlangıç sıcaklığının yüksek olduğu 600 ve 700 °C'de linyitten düşük olması ve 500 °C fırın başlangıç sıcaklığında %25 ve %50ÇL içeren karışımların karbon yanma sürelerindeki artış linyitin düşük fırın başlangıç sıcaklığında tam olarak yanmadığını

göstermektedir. Yüksek fırın başlangıç sıcaklıklarında her iki ham yakıtın karbon yanma süreleri arasındaki fark Tablo 1'de görüldüğü gibi sabit karbon içerikleri arasındaki belirgin farktan kaynaklanmaktadır. Ham linyitin karbon yanma süresinin 600 ve 700 °C fırın başlangıç sıcaklıkları ile azalması ve ham biyokütleden yüksek olması yukarıda belirtildiği gibi yapısal farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Ham linyitin karbon yanma hızları genel olarak fırın başlangıç sıcaklığı ile düzenli bir değişim göstermemesine karşın 600 ve 700 °C'deki yakma sıcaklıkları karşılaştırıldığında artış söz konusudur. Bu durum sıcaklık artışı ile karbon yanma süresinin kısılmasından kaynaklanmaktadır.

Karışımların karbon yanma süreleri genel olarak fırın başlangıç sıcaklıklarının yükselmesi ile beklenildiği gibi kısalmıştır. Fırın başlangıç sıcaklığının 500 °C olduğu yakma işlemi hariç diğer fırın başlangıç sıcaklıklarında ham yakıtlar arasındadır. Düşük fırın başlangıç sıcaklığında %50 ile %75KAO ihtiva eden karışımların karbon yanma sürelerinin diğer fırın başlangıç sıcaklıklarından yüksek olması ve fırın başlangıç sıcaklığı ile azalması biyokütlenin karışım içerisinde belirli bir orana kadar linyitin reaktivitesini arttırdığını gösterir. Yakıtların karbon yanma hızlarındaki artışa bağlı olarak yanma süreleri azalmıştır. Bu durum karbon yanma süresi ile karbon yanma hızı arasında ilişki olduğunu göstermektedir. Ham yakıtlar ile karışımların karbon yanma süreleri, karışımdaki linyit oranı ile beklenildiği gibi artış göstermekte ve karbon yanma hızı da buna bağlı olarak azalmaktadır. Karbon yanma periyoduna ait regresyon katsayıları da karbon yanma periyodunun doğrusal uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

IV. SONUÇLAR

Çan linyiti ile kayın ağacı odunu karışımlarının pelet halinde sabit yatak yakma sisteminde doğal hava akışında yakılması ile yanma davranışının incelendiği çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Karışımların uçucu madde, sabit karbon ve kül içeriklerinin karışımı oluşturan ham yakıtlar arasında olduğu ve deneysel değerlerin beklenen değerlerden farklı olduğu görüldü.
- Ham odunun tutuşma süresinin linyitten düşük olduğu ve karışımların tutuşma sürelerinin karışım içerisindeki biyokütle oranındaki artış ile kısaldığı belirlendi.
- Biyokütlenin linyitin yanması üzerinde etkili olduğu düşük yakma sıcaklığında karışım içerisindeki biyokütlenin belirli bir orana kadar linyitin uçucu madde ve karbon yanma periyoduna katkıda bulunduğu görüldü.
- Uçucu madde yanma süresi ile uçucu madde yanma hızı arasında ilişki olmadığı ve fırın başlangıç sıcaklığının yüksek olduğu yakma sıcaklığında iki yakıtın biri birini etkilediği belirlendi.
- Karbon yanma süresinin karışımdaki odun veya linyit oranına bağlı olarak arttığı/azaldığı karbon yanma süresi ile karbon yanma hızı arasında ilişki kurulabileceği görüldü.
- Yakıtın uçucu madde miktarının ve fırın başlangıç sıcaklığının tutuşma süresi üzerinde etkili olduğu tespit edildi.
- Fırın başlangıç sıcaklığındaki artış ile uçucu madde ve karbon yanma periyodunun kısaldığı, uçucu madde yanma hızının arttığı ve karbon yanma hızında ise düzenli bir değişim olmadığı sonucuna varıldı.
- Karışımların karbon yanma hızındaki değişim, fırın başlangıç sıcaklığından ve karışım içerisindeki yakıtların oranına bağlı olduğu belirlendi.

V. KAYNAKLAR

- [1] R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain and S. Mekhilef, "A Review on Biomass as A Fuel for Boilers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2262-2289, 2011.
- [2] A.A.A. Abuelnuor, M.A. Wahid, S.E. Hosseini, A. Saat, K.M. Saqr, H. H. Sait and M. Osman, "Characteristics of Biomass in Flameless Combustion: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 363-370, 2014.
- [3] M. Varol, A.T. Atımtay, B. Bay and H. Olgun, "Investigation of Co-combustion characteristics of Low Quality Lignite coals and Biomass with Thermogravimetric Analysis," *Thermochimica Acta*, vol. 510, pp. 195-201, 2010.
- [4] J. L. Easterly and M. Burnham, "Overview of biomass and waste fuel resources for power production," *Biomass & Bioenergy*, vol. 10, pp.79-92, 1996.
- [5] K.R.G. Hein and J.M. Bemtgen, "EU Clean Coal Technology, Co-combustion of Coal and Biomass," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, pp. 159-69, 1998.
- [6] H. Spliethoff, K.R.G. Hein, "Effect of Co-combustion of Biomass on Emissions in Pulverized Fuel Furnaces," *Fuel Processing Technology*, vol. 54, pp. 189-205, 1998.
- [7] W.H. Chen, J. Peng and X.T. Bi, "A state-of-the-art Review of Biomass Torrefaction, Densification and Applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 847-866, 2015.
- [8] H. Li, X. Liu, R. Legros, X.T. Bi, C.J. Lim and S. Sokhansanj, "Pelletization of Torrefied Sawdust and Properties of Torrefied Pellets," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 680-685, 2012.
- [9] L. Kumar, A.A. Koukoulas, S. Mani and J. Satyavolu, "Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review," *Energy & Fuels*, vol. 31, pp. 37-54, 2017.
- [10] C. Moon, Y. Sung, S. Ahn, T. Kim, G. Choi and D. Kim, "Effect of Blending Ratio on Combustion Performance in Blends of Biomass and Coals of Different Ranks," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 47, pp. 232-240, 2013.
- [11] H. Haykiri-Acma and S. Yaman, "Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomass blends: A Turkish case study," *Waste Management*, vol. 28, pp. 2077-2084, 2008.
- [12] M. Varol, A.T. Atımtay, H. Olgun and H. Atakül, "Emission characteristics of Co-combustion of A Low Calorie and High Sulfur-lignite Coal and Woodchips in A Circulating Fluidized Bed Combustor: Part 1. Effect of Excess Air Ratio," *Fuel*, vol.117, pp.792-800, 2014.
- [13] M. Yılmaz, "Kangal Linyitinin Elma Kabuğu İle Birlikte Sabit Yatakta Yakılması," *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.19, no.3, pp. 389-396, 2007.
- [14] N. Duranay Deveci, M. Yılmaz and D. Pehlivan, "Co-combustion of Pellets from Soma Lignite and Waste Dusts of Furniture Works," *International Journal of Green Energy*, vol.4, pp.456-465, 2008.
- [15] D. Vamvuka, N. E. Chatib and S. Sfakiotakis, "Measurements of Ignition Point and Combustion Characteristics of Biomass Fuels and Their Blends with Lignite," *Proceedings of the European Combustion Meeting*, 2011.

- [16] Republic of Turkey Ministry of Energy and natural Resource [Online]. Available: <https://www.enerji.gov.tr/en-US/Mainpage>
- [17] M. Yilgin and D. Pehlivan, "Volatiles and Char Combustion Rates of Demineralised Lignite and Wood Blends," *Applied Energy*, vol. 86, pp.1179-1186, 2009.
- [18] M. Yilgin, S. Yildirim and D. Pehlivan. "Combustion of hazelnut shell-lignite blends in poly-particulate beds," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021.
- [19] F. Rubiera, Arenillas, B. Arias and J.J. Pis. "Modification of combustion behaviour and NO emissions by coal blending," *Fuel Processing Technology* , vol.78, pp.111 –117, 2002.
- [20] M. J. Prins, K.J. Ptasiński and F.J.J.G. Janssen. "Torrefaction of Wood Part 1. Weight Loss Kinetics," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* , vol.77, pp. 28-34, 2006.
- [21] G. Kulah, "Validation of a FBC model for co-firing of hazelnut shell with lignite against experimental data," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, pp. 646–655, 2010.
- [22] M. Valix, S. Katyal and W.H. Cheung. "Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse," *Bioresource Technology*, vol. 223, pp. 202–209, 2017.