

Torf – Linyit Kömürü Karışımlarının Yanma Kinetiği ve Sinerjik Etkilerinin İncelenmesi

Esra BAKKALOĞLU^{1*}, Selim CEYLAN², Yıldırım TOPCU³

Öz

Bu çalışmada Ladik Gölünden elde edilen torf ve Kütahya linyitinin birlikte yanma kinetiği ve sinerjik etkileri incelenmiştir. Torf, düşük kül içeriği, enerji değerine sahip olması aynı zamanda mevcut bulunduğu ekosistem üzerinde zamanla bir atık olması nedeniyle, linyit kömürü evlerde ve termik santrallerde yaygın olarak kullanılan, düşük ısı değere sahip bir kömür olduğundan çalışmada kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, 20:80, 40:60, 50:50 (20T:80K, 40T:60K, 50T:50K) oranlarında torf ve kömür karışımları oluşturulmuştur. Torf ve kömür ve karışımların kısmi ve elementel analizleri gerçekleştirilmiştir. Birlikte yanma deneyleri termogravimetrik analiz cihazı ile 10, 20, 30 °C/dk ısıtma hızlarında, dinamik hava atmosferinde (50 mL/dk) farklı oranlarda (0:100, 20:80, 40:60, 50:50, 100:0) torf-kömür karışımları oda sıcaklığından 1000 °C'ye kadar ısıtma gerçekleştirilmiştir. Dağılımlı Aktivasyon Enerji Modeli (DAEM) kullanılarak farklı ısıtma hızları için izodönüşümsel veriler elde edilmiştir. Torf, kömür 20T:80K, 40T:60K, 50T:50K karışımlarının aktivasyon enerjileri sırasıyla 96.82, 67.94, 36.22, 65.84, 51.16 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Tüm karışım oranlarında torf eklenmesiyle aktivasyon enerjisinin düştüğü görülmektedir. Karışımların yanma sonrasında sinerjik etkilerin belirlenebilmesi amacıyla uçucu madde kütle kayıpları incelenmiştir. Karışım oranları arasında sinerjik etkinin olduğu belirlenmiştir. 40T/60K karışımının uçucu madde miktarı diğer karışım oranlarına göre daha fazla çıkmıştır ve birlikte yanma işleminde daha az kül oluşturabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Torf, Kömür, Yanma, Sinerjik etki, Birlikte yanma, DAEM.

Investigation of Combustion Kinetics and Synergistic Effects Peat-Lignite coal Mixtures

Abstract

In this study, the combustion kinetics and synergistic effects of peat obtained from Ladik Lake and Kütahya lignite were examined. Peat was used in the study because it has low ash content, energy value, and at the same time, it becomes a waste on the ecosystem in which it exists over time. Lignite coal is a coal with low calorific value that is widely used in homes and thermal power plants. In experimental studies, peat and coal mixtures were created in the ratios of 20:80, 40:60, 50:50 (20T:80K, 40T:60K, 50T:50K). Proximate and elemental analyzes of peat, coal and mixtures were carried out. Co-combustion experiments were performed with a thermogravimetric analyzer at different rates (0:100, 20:80, 40:60, 50:50, 100:0) in a dynamic air atmosphere (50 mL/min) at heating rates of 10, 20, 30 °C/min. Peat-coal mixtures were heated from room temperature to 1000 °C. Isotransformational data were obtained for different heating rates using the Distributed Activation Energy Model (DAEM). The activation energies of peat, coal 20T:80K, 40T:60K, 50T:50K mixtures were calculated as 96.82, 67.94, 36.22, 65.84, 51.16 kJ/mol, respectively. It is seen that the activation energy decreases with the addition of peat in all mixture ratios. Volatile matter mass losses were examined in order to determine the synergistic effects of the mixtures after combustion. It was determined that there was a synergistic effect between the mixture ratios. The amount of volatile matter in the 40T/60K mixture is higher than the other mixture ratios and it can produce less ash in the combustion process.

Keywords: Peat, coal, combustion, synergistic effect, co-combustion, DAEM.

^{1,2,3}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye,
esra.bakkaloglu@omu.edu.tr selim.ceylan@omu.edu.tr ytopcu@omu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 21.03.2024

Kabul/Accepted: 16.09.2024

Yayın/Published: 15.12.2024

1. Giriş

Dünya nüfusunun ve endüstriyel faaliyetlerin hızla artmasıyla birlikte enerji kullanımı artmış ve fosil yakıtların kullanımı da hızla artmıştır. Petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtların gelecekte enerji ihtiyacını karşılayamayacağı düşünüldüğünde enerji temin problemlerinin artacağı öngörülmektedir. Bu durum yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır (Karayılmazlar, 2011). Dünya genelinde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de, biyokütle enerjisidir. Odun, tarımsal atıklar, orman ürünleri gibi kaynaklardan elde edilen biyokütle, klasik ve modern biyokütle olarak ikiye ayrılmaktadır. Klasik biyoküteller ısınma ve pişime amaçlı kullanılır. Modern biyoküteller, enerji tarımı olarak da bilinen enerji bitkileri, tarım ve orman atıklarından elektrik, yakıt ve ısı üretimi amaçlı kullanılmaktadır (Karayılmazlar vd., 2011; Akusta, 2019).

Yakma, biyokütlerdeki kimyasal enerjinin ısı veya elektrik enerjisine dönüştürülmesi için uygulanan ısıl işlemdir. Nem içeriği %50'den az olan biyokütlerde doğrudan yakma işlemi gerçekleştirilebilir. Nem içeriği %50'den fazla olan biyokütlerde ön kurutma işlemi gerekmektedir (Varol, 2007). Biyokütlerin yanması sonucunda elde edilen kimyasal enerjiden elektrik üretimi gerçekleştirilebilir. Bu enerji kazan, buhar türbini, jeneratör gibi donanımlarda kullanılabilir. Biyokütlerin yakılması ile birlikte elde edilen verim %20-40 arasında değişmekteyken, biyokütle-kömür karışımlarının yakıldığı (co-combustion) tesislerde daha yüksek verim elde edilmektedir. Endüstrideki yanma tesislerinde verimliliği artırmak amacıyla için biyokütle-kömür karışımlarının birlikte yakıldığı tesisler oldukça ilgi çekmektedir (Çepelioğullar, 2011).

Organik maddeler zamanla sıcaklık ve basıncın etkisiyle bir kömürleşme süreci geçirmektedir. Bu süreçte, ilk olarak henüz kömür olarak nitelendirilmeyen "Turba-(Torf)" adı verilen organik madde oluşur. Sürecin ilerlemesiyle, "Linyit", "Alt Bitümlü kömür" oluşur. Bu aşamaya kadar su ve su buharı, CO ve CO₂ ortamdan uzaklaşır. Daha sonra meydana gelen "Taşkömürü" aşamasında CH₄, O₂, "Antrasit" aşamasında H₂ uzaklaşır ve süreç tamamlanmış olur (Bozkurt, 2011).

Son yıllarda, kabuk odun talaşı gibi klasik biyokütlerin yanı sıra yeni biyoküteller ile birlikte enerji üretiminin yaygınlaşması beklenmektedir (Letho, 2007; Shao vd., 2012). Torf biyokütlesi, bitki parçalarının sıcaklık, basınç, nem gibi koşullar etkisiyle oluşan yanıcı bir fosildir (Kim vd., 2014). Torf, kömür ile karşılaştırıldığında karbon içeriği daha düşük bir biyokütledir (Bakkaloğlu vd., 2024). Termokimyasal işlemler uygulanabildiği gibi, termokimyasal bir yöntem olan piroliz işlemi uygulandığında elde edilen katı ürün adsorban ve gübre olarak ziraat alanında kullanılabilir (Lee, 2017).

Termik santrallerde kullanılan linyit kömürleri, yüksek nem, kül ve düşük ısıl değere sahiptir. Bu durum, özellikle termik santrallerde verimi düşürmekte ve yanmayı zorlaştırmakta ve kül

birikimini artırmaktadır (Yıldız, 2018). Torf, düşük kül içeriğine ve enerji değerine sahiptir. Düşük maliyete sahip olmakla birlikte, diğer biyokütle yakıtlarından farklı olarak torf arazileri yanma proseslerinin neden olduğu CO₂ salınımının bir kısmını bağlamaktadır. Torf, çevresel ve ekonomik fayda sağlamak amacıyla bazı hükümetlerce yakıt olarak kullanılmaktadır (Kim vd, 2014; Letho, 2007).

Yapılan çalışmalar, yakma sistemlerinde kömürün doğrudan yakılmasıyla yüksek kül oluşturması, biyokütlenin doğrudan yakılmasıyla oluşabilecek curüf gibi dezavantajlarından dolayı ve verimi artırmak amacıyla biyokütle- kömür karışımlarının kullanıldığını göstermektedir.. Literatürde, Kim ve arkadaşları ticari termik santral yakıtı ile Rusya Torfu karışımlarının yanma olasılığını incelemişlerdir. Shao ve arkadaşları (2011), Kanada torfu ve linyit kömürünün birlikte yakılması esnasında kül ve klor birikimini araştırmışlardır.

Bu çalışma ile Ladik Gölü'nden elde edilmiş olan torf ve Kütahya Linyit kömürünün birlikte yanma kinetiği incelenerek ekosistemde bulunan ve yakıt değeri bulunan torfun birlikte yanma kinetiği incelenmiştir. Gerçekleştiği ortam koşullarına göre birlikte yanma yöntemi kömür- biyokütle karışımlarıyla yüksek verimde termal dönüşüm gerçekleştirilebilmekte, yakma sistemlerinin verimi ve fosil yakıtların kullanımı ve çevresel etkileri azaltılabilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Örneklerin hazırlanması

Ladik Torf'u, Ladik Gölünden temin edilmiştir. Etüvde 110 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Çelik bıçaklı öğütücü yardımı ile (Waring, USA) öğütülmüştür. Kömür (Kütahya linyiti), havanlı öğütücü kullanılarak boyutu küçültülmüştür. Öğütülen örnekler elekten geçirilmiştir. Deneylerde ısı ve kütle transferi etkileri azaltmak amacıyla 125-250 µm boyut aralığındaki numuneler kullanılmıştır. Termal analiz için kullanılacak torf: kömür karışımları, 0:100, 20:80, 40:60, 50:50, 100:0 oranlarında hazırlanıp 20T/80K, 40T/60K ve 50T/50K şeklinde etiketlenerek muhafaza edilmiştir.

2.2. Örneklerin karakterizasyonu

Torf ve kömür örneklerinin elementel analizi ile %C, H, N ve S miktarları belirlenmiştir. (ASTM D5373-16). Numunelerin uçucu madde, nem ve kül tayinleri için TG-DTA analiz cihazı kullanılmıştır (Shimadzu DTG-60H). Uçucu madde tayini (ASTM D 3175-11), kül tayini (ASTM D 3174-11), nem tayini (ASTM 3302-12) standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Örneklerin sabit karbon oranı, uçucu madde ve kül oranı toplamlarının 100'den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Torf ve kömür örneklerinin bomba kalorimetresi ile ısı değerleri ölçülmüştür (CAL E2K). FTIR analizi ile yapıdaki fonksiyonel gruplar belirlenmiştir (Miracle Single-Reflection Diamond ATR Perkin Elmer marka Spectrum Two).

2.3. Termogravimetrik analiz

Biyokütle kömür karışımlarının termogravimetrik analizi, TGA cihazında gerçekleştirilmiştir. Analiz, oda sıcaklığından 1000°C'ye, 10, 20, 30 °C/dk ısıtma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Numunelere 20 °C/dk ısıtma hızında 110 °C'de 20 dk bekletilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 50 ml/dk akış hızında dinamik hava atmosferi kullanılmıştır.

2.4. Kinetik analiz

Kinetik analiz, ham maddelerin yanma reaksiyonlarının ayrışmasına dair mekanizma süreci tanımlayan matematiksel modelleri ifade eder. İzodönüşümsel metotlar olarak bilinen Kissenger-Akahira- Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO), Friedman, Vyazoskin, Staring metotları, reaksiyon hızının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tek adımlı reaksiyonlar için kinetik parametrelerin hesaplanabildiği bir metottur (Arenas, 2019). Biyokütle yapısındaki hemiselüloz, selüloz ve lignin bozunma işlemleri, birbirinden bağımsız ve paralel reaksiyonlarla gerçekleşmektedir. Dağılımlı Aktivasyon Enerji Modeli (DAEM), yapının bozunma sürecinde bağ yapılarındaki farklılıklarından kaynaklı olarak tersinmez birinci derece ya da n. derece reaksiyonların gerçekleştiğini ve bu esnada farklı aktivasyon enerjilerinin meydana geldiği varsayılmaktadır (Arenas, 2019; Bakkaloglu, 2021). Biyokütlenin, hemiselüloz, selüloz ve lignin içeriğinden dolayı bu çalışmada Dağılımlı Aktivasyon Enerji Modeli uygulanmıştır. Termal bozunma eşitliğinin sade hali aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$1 - V/V^* = \int_0^{\infty} \exp(-k_0 \int_0^t e^{-E/RT} dt) f(E) dE \quad (1)$$

Eşitliğe, $(1 - \Delta V/\Delta V^*) = \varphi(E, T) \sim 0.58$ gibi bir yaklaşım uygulandığında, eşitliğin en son hali; (Işıtan 2015; Tezer 2017).

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{k_0 R}{E}\right) + 0.6075 - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$ 'ye karşı $1/T$ grafiğinin eğimi m olarak ifade edilirse, aktivasyon enerjisi (E) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E = -m \cdot R \quad (3)$$

2.5. Sinerjik Etki

Sinerjik etki, aktivasyon enerjisi ve kütle değişimi açısından incelenebilmektedir. Maddeler arasında sinerjik etki olmadığı düşünüldüğünde, termal bozunma kinetiğine ait aktivasyon enerjisi ($E_{Hesaplanan}$) eşitlik 4' te verildiği gibi yaklaşık olarak tahmin edilebilir (Celaya, 2015).

$$E_{Hesaplanan} = Y_{Torf} E_{Torf} + Y_{Kömür} E_{Kömür} \quad (4)$$

Kütle değişimi açısından, hesaplanan kütle ile deneysel kütle hesaplaması karşılaştırıldığında maddeler arasındaki sinerjik etki incelenebilir (Zhiqiang, 2014). Eşitlik (5) ve (6)'da, verilen T(K)'ye karşı $\Delta W (W_{deneysel} - W_{Hesaplanan})$ grafiği çizilirse, sinerjik etkileşim incelenebilir.

$$W_{Hesaplanan} = Y_{Torf} W_{Torf} + Y_{Kömür} W_{Kömür} \quad (5)$$

$$\Delta W = (W_{deneysel} - W_{Hesaplanan}) \quad (6)$$

3. Bulgular ve Tartışma

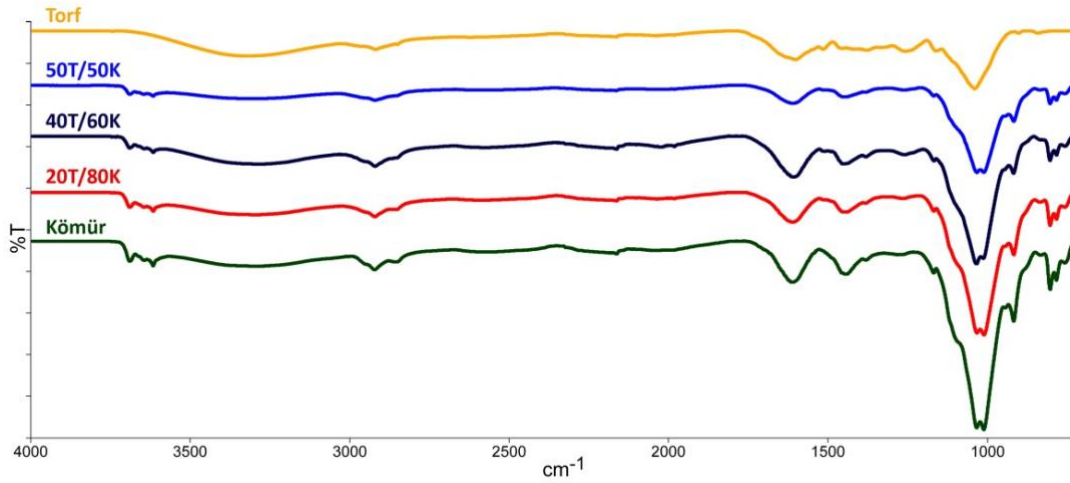
Torf ve kömür örneklerinin kısmi ve elementel analiz sonuçları, Tablo 1'de verilmiştir. Torf ve kömürün yapısındaki bileşim oranları birbirinden farklıdır. Yapılan analizlere göre linyit kömürünün uçucu madde içeriği % 33,48 iken, torf' un uçucu madde içeriği % 67,26'dır. Torf biyokütlesinin uçucu madde içeriği linyit kömürüne göre yüksektir. Torf biyokütlesinin kül miktarı %1,3 olarak bulunmuştur. Literatürdeki diğer torf örneklerine Ladik torf'unun kül içeriği azdır (Shao, 2012; Kim, 2014). İki örneğin ısı değeri birbirine yakındır.

Tablo 1. Torf ve Kömürün kısmi ve elementel analizi

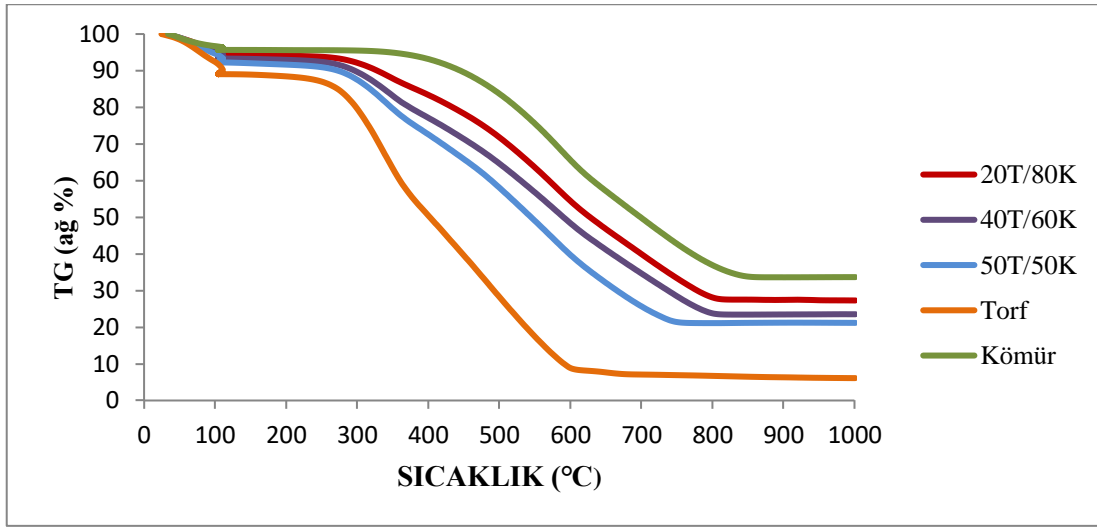
| Yaklaşık Analiz (ağ.%) | Ham Örnekler | |
|--------------------------------|--------------|-------|
| | Torf | Kömür |
| Nem | 10,97 | 3,84 |
| Uçucu madde | 67,26 | 33,48 |
| Kül | 1,30 | 29,81 |
| Sabit karbon* | 20,47 | 32,87 |
| Elementel Analiz (ağ.%) | | |
| C | 46,58 | 42,24 |
| H | 5,29 | 3,05 |
| N | 1,96 | 2,28 |
| S | 0,30 | 0,32 |
| Isıl değer (MJ/kg) | 20,73 | 22,18 |

*%SK=100-(%Nem+%U.M+%Kül)

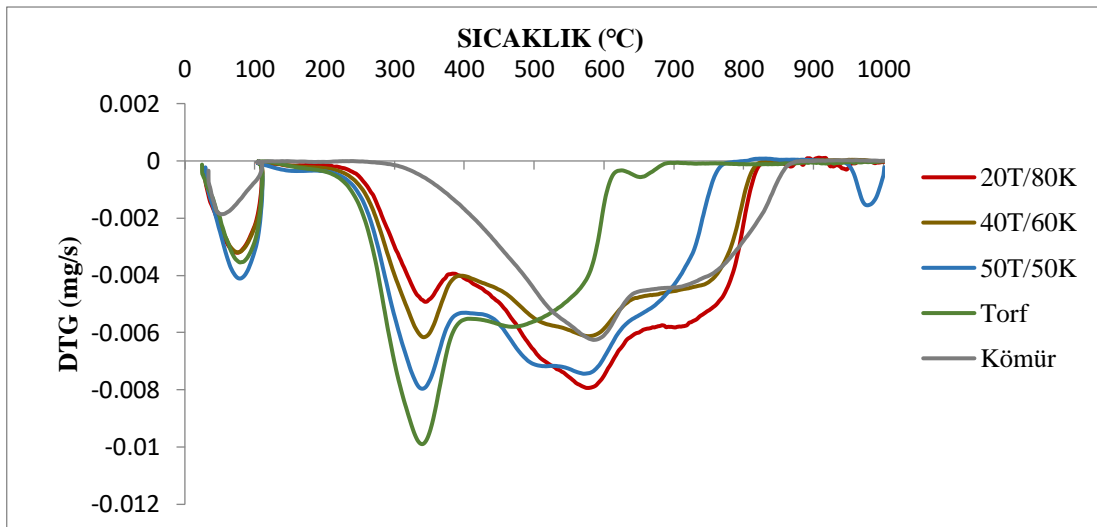
Şekil 1.'de torf ve kömür karışımlarının FT-IR spektrumları verilmiştir. Spektrumlara göre; Torf, kömür ve karışımlarda 3100-3750 cm^{-1} arasında -OH gerilim piki görülmüştür. Bu durum yapılarıdaki nem içeriğinden kaynaklanmaktadır. Karışımlarda ve kömür numunesinde bu pik görülmemiştir. 1598-1607 cm^{-1} pikleri yapıdaki aromatik C=C titreşimini ifade etmektedir. Torf, 40T/60K ve 50T/50K numunelerindeki 1028-1037 pikleri numunelerin kül içerdiğini göstermektedir. 1440-1450 cm^{-1} pikleri kömür ve 20T/80K karışımlarında, C-H eğilme titreşimine karşılık gelmektedir. Ayrıca, kömür ve karışımlarda da 680-860 cm^{-1} C-H eğilme titreşimi görülmektedir.

**Şekil 1.** Torf kömür ve karışımların FT-IR spektrumları

Şekil 2.'de Torf, kömür ve karışımlarına ait 20 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında TG ve DTG eğrileri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. 20°C/dk Torf, kömür ve karışımlara ait yanma TG (a) ve DTG (b) eğrileri

Şekil 2.'de Torf biyokütlesinin yanmaya başlama sıcaklığının, linyit kömürüne göre daha düşük olduğu görülmektedir. Linyit kömürüne torf eklenmesiyle termal bozunmaya başlama sıcaklıklarında azalma görülmüştür. Kömürün bozunmaya başlama sıcaklığı 242,02°C iken, torf ilavesiyle 20T/80K, 40T/60K ve 50T/50K biyokütle/kömür karışımları için bozunmaya başlama sıcaklıkları sırasıyla 219,97°C, 196,39°C ve 190,42°C'ye düşmüştür. Torf biyokütlesinde diğer örneklerle göre ağırlık kaybının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum torfun yapısında fazla miktarda uçucu madde ve nem içermesinden kaynaklanmaktadır. Torf kömür karışımları içerisinde, torf oranı arttıkça ağırlık kaybının artmıştır. Karışım oranlarının artmasıyla yanmanın düşük sıcaklıkta sonuçlandığı görülmüştür. Tablo 2.'de örneklerle ait, başlangıç T(s), maksimum Tmax, sıcaklık ve sonlanma T(s) sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 2. Yanma işleminde 20°C/dk örneklerin bozunmasına ait T_b , T_{max} , T_s ve DTG_{max} değerleri

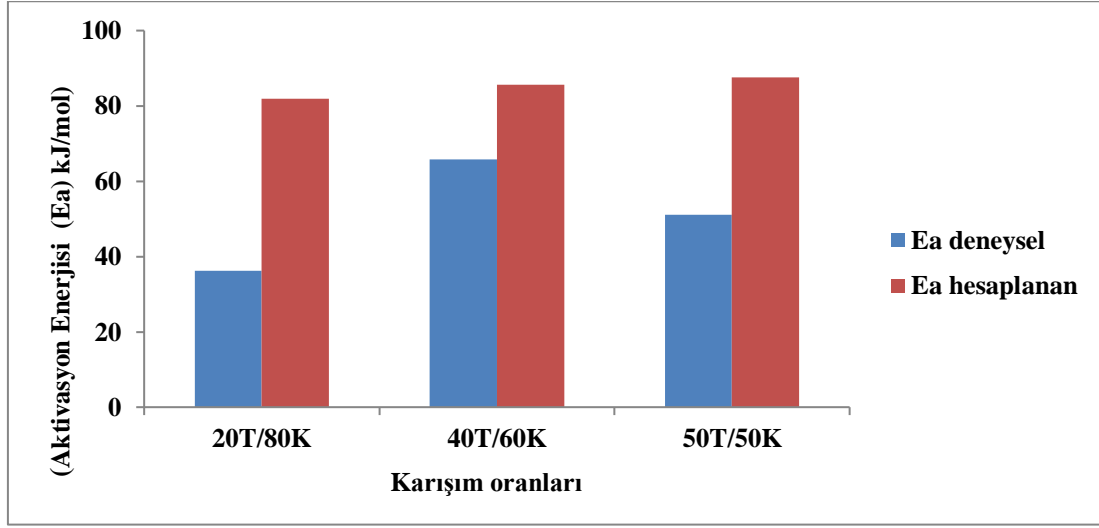
| | T_b (°C) | T_{max} | T_s | DTG_{max} (mg.saniye ⁻¹) |
|---------|------------|-----------|--------|--|
| Torf | 202,83 | 329,97 | 673,36 | -0.009 |
| 20T/80K | 219,97 | 363,49 | 843,97 | -0.005 |
| 40T/60K | 196,39 | 330,17 | 811,68 | -0.006 |
| 50T/50K | 190,42 | 329,3 | 761,08 | -0.007 |
| Kömür | 242,02 | 571,48 | 855,57 | -0.006 |

Çalışmada, torf, kömür ve farklı oranlardaki karışımlara 10, 20, 30 °C/dk ısıtma hızlarında dinamik hava atmosferinde yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. TGA verileri kullanılarak DAEM uygulanmıştır. 0,2-0,8 dönüşüm aralıklarında, aktivasyon enerjileri ve korelasyon katsayıları (R^2) hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjileri ve korelasyon katsayıları Tablo 3’de gösterilmiştir. Aktivasyon enerjisi, bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşebilmesi için gerekli olan minimum enerji miktarıdır (Saleh, 2022). Aktivasyon enerjisinin düşük olması, yanma reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli olan enerjinin düşük olduğunu ifade etmektedir. Karışımlara torf biyokütlesinin eklenmesi ile aktivasyon enerjisi bariyeri düşmüştür. Bu durum biyokütlenin uçucu madde miktarının fazla olmasından ve karışımlara eklendiğinde uçucu madde içeriğinin artmasından kaynaklanmaktadır (Kim, 2014).

Tablo 3. Yanma işlemine ilişkin aktivasyon enerjileri

| x | Torf | | Kömür | | 20T/80K | | 40T/60K | | 50T/50K | |
|------|--------|----------------|-------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| | Ea* | R ² | Ea | R ² | Ea | R ² | Ea | R ² | Ea | R ² |
| 0,2 | 137,72 | 0,99 | 84,81 | 0,99 | 51,06 | 0,95 | 140,25 | 0,92 | 98,08 | 0,99 |
| 0,3 | 131,59 | 0,99 | 80,87 | 0,95 | 45,73 | 0,98 | 92,09 | 0,94 | 69,08 | 0,99 |
| 0,4 | 117,23 | 0,98 | 75,50 | 0,95 | 42,09 | 0,99 | 64,59 | 0,97 | 54,55 | 0,99 |
| 0,5 | 95,42 | 0,93 | 73,18 | 0,95 | 37,84 | 0,99 | 53,04 | 0,98 | 43,96 | 0,99 |
| 0,6 | 77,83 | 0,94 | 63,77 | 0,95 | 30,78 | 0,98 | 45,10 | 0,99 | 37,68 | 0,99 |
| 0,7 | 64,59 | 0,93 | 52,19 | 0,94 | 25,03 | 0,98 | 36,21 | 0,99 | 30,51 | 0,97 |
| 0,8 | 53,39 | 0,93 | 45,30 | 0,93 | 21,02 | 0,99 | 29,58 | 0,99 | 24,24 | 0,94 |
| Ort. | 96,82 | | 67,94 | | 36,22 | | 65,84 | | 51,16 | |

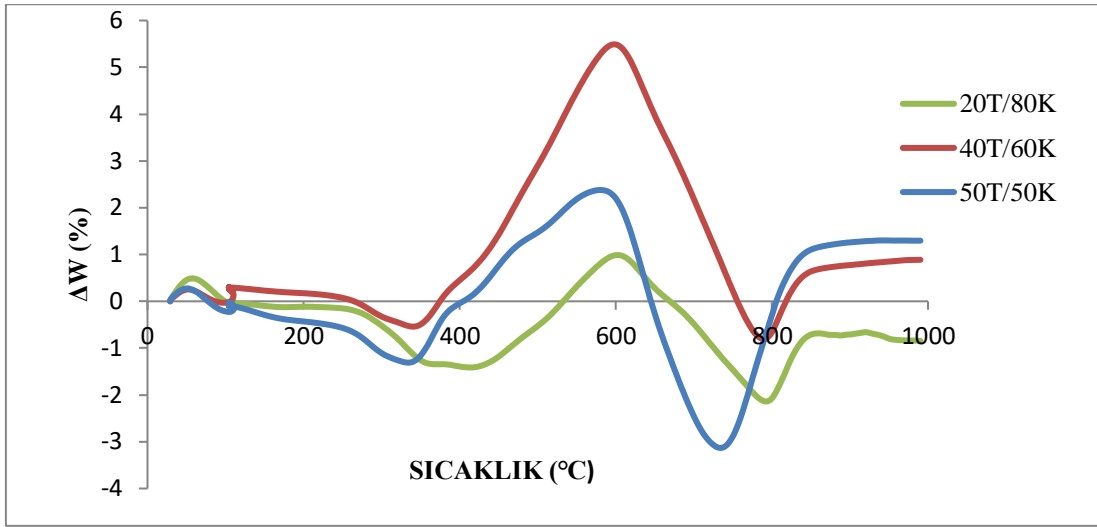
Maddeler arasındaki sinerjik etki aktivasyon enerjisi ve kütle kaybı açısından incelenmiştir. 3 farklı karışım oranı için deneysel aktivasyon ve Eşitlik 5. kullanılarak hesaplanan aktivasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Karışımlar arasındaki aktivasyon enerjileri incelendiğinde, sinerjik bir etkileşimin olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Yanma işlemine ilişkin aktivasyon enerjisi/ karışım oranları grafiği

Kütle kayıpları açısından sinerjik etkilerin belirlenmesi amacıyla TGA ile belirlenen deneysel kütle kayıplarından, Eşitlik 5. kullanılarak hesaplanan kütle kayıpları çıkarılarak ΔW değerleri bulunmuştur. Şekil 4'de gösterildiği gibi üç farklı ısıtma hızını kullanarak T'ye karşı ΔW grafikleri çizilmiştir.

Grafikte, karışımlar için sinerjik etkinin olduğu görülmektedir. Üç farklı karışım için benzer eğilimlerde ve sinerjik etkilerin farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Literatürde, sinerjik etkilerin incelenmesi açısından benzer çalışmalar bulunmaktadır. Depci ve arkadaşları (2018), sinerjik etki farklılıklarının maddelerin yapısındaki uçucu madde, biyokütlenin içeriğindeki selülozik yapı ve lignin içeriğinden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Şekil 4.de 40T/60K karışım oranında uçucu madde kaybının, 20T/80K ve 50T/50K karışım oranlarına göre fazla olduğu görülmektedir. Uçucu madde kaybının fazla olması, maddelerin yanma işlemi sonucunda kül birikiminin az olmasına neden olduğu literatürde belirtilmiştir (Kim, 2014). 40T/60K karışımının birlikte yanma işleminde, kül miktarının 20T/80K ve 50T/50K karışımlarına göre daha az olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Birlikte yanma işleminde uçucu madde sıcaklık grafiği

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Ladik gölünden temin edilen torf, Kütahya linyit kömürü ve üç farklı torf biyokütle karışımının yanma kinetiği, üç farklı ısıtma hızı kullanılarak Dağılımlı Aktivasyon Enerji modeli (DAEM) ile incelenmiştir.

Örneklerinin elementel analiz sonuçlarına göre; Torf biyokütlesinin nem ve uçucu madde yüzdeleri kömüre göre yüksektir. Torf'un kül miktarı yüzdesi ise kömürle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Torf ve kömür örneğinin üst ısıl değerleri ise sırasıyla 20,73 MJ/kg, 22,18 MJ/kg'dır. Torf numunesinin ısıl değeri, literatürde verilen farklı torf numunelerinin ısıl değerleri arasında bir değerde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Torf, kömür ve karışımlara yapılan FT-IR analizinde, -OH gerilmesine ait titreşim piki torf numunesinde baskın bir şekilde görülmektedir. Tüm ham örneklerde aromatik C=C titreşimi ve torf haricindeki diğer numunelerde C-H eğilmesine karşılık gelen pikler analiz sonucunda belirlenmiştir. Yakma işlemi için, DAEM kullanılarak korelasyon katsayıları ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjileri torf, 96,82 kJ/mol, kömür 67,94 kJ/mol, 20T/80K için 36,22 kJ/mol, 40T/60K için 65,84 ve 50T/50K karışımı için 51,16 kJ/mol olarak bulunmuştur. Torf biyokütlesinin eklenmesi, tüm karışım oranlarında aktivasyon enerjisi bariyerini düşürdüğü gözlenmiştir. Bu durum yakma sistemlerinde yakma işlemini kolaylaştırıcı bir unsur olabilir. Deneysel ve hesaplanan aktivasyon enerjileri arasındaki ilişki aktivasyon enerjileri arasında bir sinerjik etkileşim olduğunu göstermektedir.

Yanma işlemi için termogravimetrik analiz verileri incelendiğinde; Termogramda, torf miktarının artmasıyla birlikte ağırlık kaybının arttığı gözlenmiştir. DTG eğrisine bakıldığında, karışım oranlarının artması ile genel olarak yanma işlemi daha düşük sıcaklıkta sonlanmıştır. Yanma

işleminde, ΔW -sıcaklık grafiği farklı karışım oranlarında uçucu madde kütle kaybını göstermektedir. 40T/60K karışım oranında diğer karışım oranlarına göre daha fazla kütle kaybı gözlenmiştir. Literatürdeki edinilen bilgiye göre yanma işleminde, uçucu madde kaybının fazla olması, kül birikimini azaltabildiği sonucuna ulaşılabilir. Buna göre 40T/60K karışımında kül birikimi daha az olduğu söylenebilir.

Genel olarak bakıldığında; biyokütle kömür karışımlarının kullanılması, ekosistemde atık miktarının azaltılmasında, fosil yakıtların olumsuz etkilerinin azaltılmasında ayrıca yakma işlemlerinde çevresel olumsuz etkilerin azaltılması, yakma sistemlerin iyileştirilmesi adına avantaj sağlayabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Semboller ve Kısaltmalar

| | |
|----------------|--|
| A | Ekspansiyonel faktör, 1/s |
| Ea | Aktivasyon enerjisi, kJ/mol |
| Epeat | Aktivasyon enerjisi torf, kJ /mol |
| Ecoal | Aktivasyon enerjisi linyite, kJ /mol |
| Eacalculate | Hesaplanmış aktivasyon enerjisi |
| Eaexperimental | DeneySEL aktivasyon enerjisi |
| $f(a)$ | Reaksiyon modeli |
| k | Hız sabiti |
| R | İdeal gaz sabiti 8.314 J/(mol.K), |
| T | Sıcaklık, °C |
| R ² | Açıklanan varyans/ determinasyon katsayısı |
| S | Sülfür içeriği |
| H | Hidrojen içeriği |

| | |
|-------------------|---|
| N | Azot içeriği |
| O | Oksijen içeriği |
| C | Karbon içeriği |
| Y _{peat} | Mol kesri- torf |
| Y _{coal} | Mol kesri linyit kömür |
| W _{peat} | Kütle kesri fraction-torf |
| W _{coal} | Kütle kesri-peat |
| ΔW | Kütle kaybı (%) |
| T _b | Başlangıç sıcaklığı |
| T _{max} | Maksimum sıcaklık |
| T _s | Son sıcaklık |
| T:K | TorfKömür |
| FC | Sabit karbon |
| MC | Nem içeriği |
| VM | Uçucu madde |
| DAEM | Dağılımlı Aktivasyon Enerji Modeli |
| ASTM | Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu |
| TGA | Termogravimetrik Analiz |
| DTG | Diferansiyel Termal Termogravimetri |
| β | Isıtma Hızı (C/min) |
| α | Dönüşüm |

Kaynaklar

- Akusta, E. (2019). Yenilenebilir Enerji, Büyüme ve Çevre İlişkisi: Türkiye Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, 193, Kırklareli.
- Arenas, C. N. Navarro, M. V. Martinez, J. D. 2019. Pyrolysis Kinetics of Biomass Wastes Using Isoconversional Methods and the Distributed Activation Energy Model. *Bioresource Technology*, volume 288, 121487.
- Bakkaloglu, E. (2021). Ladik Gölünden Elde Edilen Torf'un ve Kömür Karışımlarının Piroliz ve Yanma Davranışlarının Kinetik Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 75s, Samsun
- Bakkaloğlu, E., Ceylan, S., & Topcu, Y., (2024). Thermokinetics and synergistic effect analysis of peat-lignite coal co-pyrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol.46, no.1, 3124-3135.
- Bozkurt, A. P. (2011). Atık Lastik- Kömür Karışımlarının Piroliz ve Kritik Üstü Ekstraksiyonlarla Değerli Ürünler Dönüştürülmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, 218, Ankara.
- Celaya, A. M. Lade, A. T. Goldfarb, J. L. (2015). Co-combustion of Brewer's Spent Grains and Illinois No.6 Coal: Impact of Blend Ratio on Pyrolysis and Oxidation Behavior. *Fuel Processing Technology*, 129, 39-51.
- Çepelioğullar, Ö. (2011). Farklı biyokütle-plastik atık karışımlarının termogravimetrik analiz yöntemiyle birlikte pirolizi ve elde edilen ürünlerin karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 154, Ankara.
- Depci, T. Karta, M. Karaca, H. (2018). Co-liquefaction Process Olive Bagasse and Peat with Lignite and The Effect of Biomasses on The Products and Oil Yield. *Energy*, volume 156, 750-757.

- Işıtan, S. (2016). Endüstriyel biyokütle atıklarının pirolizi ve ürünlerin karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 111, Samsun.
- Jiang, L., Z. Zhou, H. Xiang, Y. Yang, H. Tian, and J. Wang. (2022). "Characteristics and Synergistic Effects of Co-Pyrolysis of Microalgae with Polypropylene." *Fuel* 314 (April): 122765. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122765>.
- Karayılmazlar, S. Saraçoğlu, N. Çabuk, Y. Kurt, R. (2013). Biyokütlenin Türkiye’de Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, cilt 13, 19, 63-75.
- Kim, J. Lee, H. Park, H. Kim, H. Kim, C. (2014). Combustion Possibility of Low Rank Russian Peat as a Blended Fuel of Pulverized Coal Fired Power Plant, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 1752-1760.
- Lee, J. Yang, X. Song, H. Ok, Y. Kwon, E. 2017. Effects of Carbon dioxide on Pyrolysis of Peat. *Energy*, 120, 929-936.
- Letho, J. (2007). Determination of Kinetic Parameters for Finnish Milled Peat Using Drop Tube Reactor and Optical Measurement Techniques. *Fuel*, 86, 1656-1663.
- Saleh, T. A. (2021). Kinetic models and thermodynamics of adsorption processes: Classification. *Interface Science and Technology*, 34, 65-97. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849876-7.00003-8>
- Shao, Y. Xu, C. Zhu, J. Preto, F. Wang, J. Tourigny, G. Badour, C. Li, H. (2012). Ash and Chlorine Deposition during Co-combustion of Lignite and a Chlorine-rich Canadian Peat in a Fluidized Bed- Effects of Blending Ratio, Moisture Content, *Fuel*, 95, 25-34.
- Tezer, O. (2017). Makrofit Yapılı Göl Bitkilerinden *Polygonum amphibium*’un Hidrotermal Karbonizasyon Yöntemiyle Biyoyakıtlara Dönüştürülebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 99s, Samsun.
- Varol, A. E. (2007). Farklı biyokütlelere değişik ısı işlemler uygulanması ve elde edilen ürün özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 199s, Eskişehir.
- Wang, B., Z. Yao, M. Reinmöller, N. Kishore, F. Tesfaye, and R. Luque. (2023). "Pyrolysis Behavior, Kinetics, and Thermodynamics of Waste Pharmaceutical Blisters under CO2 Atmosphere." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 170 (March): 105883. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105883>.
- Yan, J. Liu, M. Feng, Z. Bai, Z. Shui, H. Li, Z. Lei, Z. Wang, Z. Ren, S. Kang, S. Yan, H. (2020). Study on the Pyrolysis Kinetics of Low- Medium Rank Coals with DAEM Model. *Fuel*, volume 261, 116359.
- Yıldız, Z. (2018). Deniz Makroalg-Kömür Karışımlarının Akışkan Yatak Reaktörde Hızlı Pirolizi ve Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 77s, Samsun.
- Zhiqiang, W. Wang, S. Zhao, J. Chen, L. Meng, H. (2014). Synergistic effect on Thermal Behavior Dring Co-pyrolysis of Lignocellulosic Biomass Model Components Blend With Bituminous Coal. *Bioresource Technology*, 169,220-228.