

Biyokütle, arıtma çamuru ve linyit içeren yakıt karışımlarının yanma karakteristiklerinin, kinetiklerinin ve yanma indekslerinin termogravimetrik olarak incelenmesi

Thermogravimetric investigation of combustion characteristics, kinetics and combustion index of fuel blends with biomass, sewage sludge and lignite

Sena Erkent^{1*}, Mehmet Eren Yaman¹, Karani Kurtulus², Sema Yurdakul¹, Barış Gürel³

¹Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

senaaerkent7@gmail.com, erenyaman7@gmail.com, semayurdakul@sdu.edu.tr

²Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

karanikurtulus@sdu.edu.tr

³Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

barisgurel@sdu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 30.04.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.09.2025

doi: 10.65206/pajes.00694

Kabul Tarihi/Accepted: 03.10.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, gül posası (G), evsel arıtma çamuru (Ç) ve yerli Kale Linyiti (L) kullanılarak hazırlanan farklı oranlardaki yakıt karışımlarının termogravimetrik analizleri (TGA) yapılarak; yanma karakteristikleri, yanma indeksleri ve aktivasyon enerjileri incelenmiştir. Bu çalışmada üç farklı yakıt karışımı (%15Ç+%15G+%70L; %25Ç+%25G+%50L; %40Ç+%40G+%20L) hazırlanmıştır. Yakıt karışımlarının termal bozunmaları genel olarak dört bölgede gerçekleşmiştir. Bu çalışmada alev alma sıcaklıklarının karışımdaki çamur oranı arttıkça yükseldiği, son yanma sıcaklıklarında ise genel bir değişim olmadığı görülmektedir. Karışımların maksimum kütle kaybı hızları çamur oranı arttıkça artmış ve daha stabil bir yanma sağlamıştır. Yanma indeksleri açısından, linyite arıtma çamuru eklenmesinin yakıtın yanma karakteristiğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada hazırlanan yakıt karışımlarının aktivasyon enerjileri ise %15Ç+%15G+%70L için 86.68 kJ/mol, %25Ç+%25G+%50L için 107.20 kJ/mol, %40Ç+%40G+%20L için 114.07 kJ/mol ve %100 çamur için 160.05 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla biyokütle ve linyitin arıtma çamurları ile termokimyasal kullanımının çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, Kinetik, TGA, Yanma Karakteristikleri

Abstract

In this study, the combustion characteristics, combustion index and activation energies were investigated by thermogravimetric analysis (TGA) of different proportions of fuel blends prepared using rose pulp (R), domestic sewage sludge (S) and local Kale Lignite (L). In this study, three different fuel blends (15%S+15%R+70%L; 25%S+25%R+50%L; 40%S+40%R+20%L) were prepared. Thermal degradation of the fuel blends occurred mainly in four regions. In this study, it was observed that the ignition temperatures increased with increasing sludge content in the blends, while there was no general change in the burnout combustion temperatures. The maximum mass loss rates (DTG_{max}) of the blends increased with increasing sludge content and provided a more stable combustion. In terms of combustion index, it was observed that the addition of sewage sludge to lignite improved the combustion characteristics of the fuel. The activation energies of the fuel blends prepared in this study were calculated as 86.68 kJ/mole for 15%S+15%R+70%L, 107.20 kJ/mole for 25%S+25%R+50%L, 114.07 kJ/mole for 40%S+40%R+20%L and 160.05 kJ/mole for 100% sludge. Therefore, it is seen that the thermochemical utilization of biomass and lignite with sewage sludge has a significant environmental and economic potential.

Keywords: Biomass, Combustion Characteristics, Kinetic, TGA

1 Giriş

Dünyadaki ve Türkiye'deki mevcut enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak, fosil yakıtların yanması ile açığa çıkan karbondioksit (CO₂), nitrooksit (N₂O) vb. emisyonlar iklim değişikliğini hızlandırmaktadır [1], [2]. Türkiye'nin yıllık enerji ihtiyacının 1.320 TWh olduğu öngörülmektedir [3]. Bu ihtiyacın yaklaşık %67'si ithalat yoluyla karşılanmaktadır [4]. Türkiye'de yaklaşık olarak 20.04 milyar ton linyit rezervi olduğu öngörülmektedir [5]. Ancak bu rezervlerin sadece %1'i 4000 kcal/kg üzerinde bir ısı değere sahiptir. Yerli linyitlerin, yüksek kül, nem ve kükürt içeriklerinden dolayı direkt yakacak olarak kullanımları oldukça sınırlıdır. Linyit kaynaklarının yanı sıra, Türkiye'nin büyük bir biyokütle enerjisi potansiyeline de sahiptir ve Türkiye'nin biyokütle enerji potansiyelinin toplam ekonomik enerji eşdeğeri 3.9 MTEP/yıldır. Biyokütle, biyoyakıt üretimi için

hammadde olarak kullanılan biyolojik kökenli (bitkiler ve hayvanlar) organik, fosil olmayan malzemedir. Atık su arıtma tesislerinden çıkan çamur, AB mevzuatına göre biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılabilir [6]. Ülkemizde 2022 yılında atık su arıtma tesislerinden kaynaklanan atık arıtma çamuru miktarının 348 bin ton kuru madde bazında olduğu bildirilmektedir [7]. Dolayısıyla, ülkemizde önemli miktarda atık arıtma çamurunun oluştuğu ve bu atık çamurların ise çoğunlukla deponi sahalarına gönderilerek bertaraf edildiği ve ısı değerinden faydalanılmadığı görülmektedir. Türkiye, dünya gül yağı, gül koncreti ve gül absolütünün %65'inden fazlasını üretmektedir. Türkiye'de gül çiçeği üretim alanının neredeyse tamamı ise Isparta ilinde yer almaktadır [8]. Bu faaliyetin bir sonucu olarak, önemli miktarda gül yağı damıtma atığı Isparta'da üretilmektedir. Atık gül posaları, yağ gül miktarının 2 katı kadar atık oluşturmaktadır [9]. Yıllık yaklaşık 17.114 ton gül üretildiği varsayıldığında, gül yağı işleme tesislerinden

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kaynaklanan atık miktarının yaklaşık 35.000 tona ulaşacağı ön görülmektedir [8],[10]. Oluşan gül yağı işleme atıkları ise kontrolsüz bir şekilde çevreye bırakılmakta ve yer üstü ve yer altı suları için kirlilik sorunu oluşturmaktadır. Oysaki, biyokütlenin yerli linyitler ile karıştırılarak termokimyasal sistemlerde kullanılması ile olumlu bir sinerjik etki yaratılabilmekte ve işletme parametrelerini iyileştirerek proseslerin performansını arttırılabilmektedir. Aynı zamanda, biyokütlelerin yakılması sonucu daha düşük konsantrasyonlarda sera gazı emisyonları açığa çıkmaktadır [11],[12]. Dolayısıyla, bu tür atıkların termokimyasal sistemlerde kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan oldukça önem arz etmektedir [13], [14], [15].

Haykırı-Açma ve Yaman [16], biyokütle (fındık kabuğu) ve Elbistan Linyiti karışımlarının aktivasyon enerjilerini, 60.4 kJ/mol ile 84.3 kJ/mol arasında bulmuşlardır. Literatürde yer alan çalışmalarda yerli linyitin aktivasyon enerjisinin biyokütleye kıyasla daha düşük olduğu bildirilmiştir [17], [18]. Yerli linyitlerin aktivasyon enerjileri 93.8 kJ/mol (Soma Linyiti), 47.2 kJ/mol (Seyitömer Linyiti), 29.0 kJ/mol (Elbistan Linyiti) ve 124.8 kJ/mol (Tunçbilek Linyiti) olarak hesaplanmıştır [19]. Yerli linyitlerin aktivasyon enerjilerindeki farklılık yakıt türü ile linyitlerin kimyasal bileşimlerinden kaynaklanmaktadır [19], [20]. Yurdakul vd., [21], tavuk gübresi ve yerli linyiti ağırlıkça 5 farklı oranda (%100 TG, %25L + %75 TG, %50L + %50 TG, %75L + %25 TG ve %100L) hazırladıkları yakıt karışımlarının aktivasyon enerjilerini sırasıyla; 112.10 kJ/mol; 127.88 kJ/mol; 91.03 kJ/mol; 71.43 kJ/mol ve 62.62 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Arman vd., [22], yaptıkları diğer bir çalışmada ise ham biyokütle (gül posası, kızılçam talaşı) ve Elbistan Linyiti numunelerini ağırlıkça farklı oranlarda karıştırmış ve ham numunelerin aktivasyon enerjilerini 91- 187 kJ/mol aralığında hesaplamışlardır. Diğer taraftan, arıtma çamurları içerdikleri çeşitli aktif maddelerden dolayı geniş bir aktivasyon enerjisi aralığına sahiptir [23]. Literatürde yapılan çalışmalarda evsel arıtma çamurunun aktivasyon enerjileri 191.72 kJ/mol [24], 46-232 kJ/mol [25], 366.58 kJ/mol [26], 419.6 kJ/mol [27] ve 15-49 kJ/mol [28] olarak hesaplanmıştır. Literatürde, torefiyeye arıtma çamurlarının aktivasyon enerjisi ise yaklaşık 70-151 kJ/mol aralığında verilmiştir [29]. Diğer taraftan, endüstriyel arıtma çamurlarının aktivasyon enerjisi 49-326 kJ/mol olarak verilmiştir. Torefiyeye veya HTC edildiklerinde ise aktivasyon enerjilerinin artarak sırası ile 177-689 kJ/mol ve 161-486 kJ/mol'e ulaştığı bulunmuştur [30]. Dolayısıyla literatürde halen arıtma çamuru ve gül yağı işleme atıklarından kaynaklanan gül posasının yanma karakteristiklerinin ve kinetiklerinin incelendiği çalışmaların oldukça sınırlı olduğu anlaşılmaktadır.

Termogravimetrik analiz (TGA), numune kütlesindeki değişikliklerin zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü bir tekniktir. Elde edilen termogramlar kullanılarak, yakıt karışımlarının termal ve oksidatif kararlılık, ayrışma kinetiği, nem içeriği, uçucu bileşenler, birden fazla bileşenin varlığı ve reaktif veya aşındırıcı ortamların etkileri de dahil olmak üzere çok çeşitli malzeme özellikleri ve davranışları hakkında değerli bilgiler edinebilmektedir [31]. Biyokütlenin termokimyasal sistemlerdeki yanma ve piroliz reaksiyonu özelliklerinin ve kinetik parametrelerin incelenmesi hem biyokütle termokimyasal dönüşüm teknolojilerinin hem de piroliz, gazlaştırma ve yanma ekipmanlarının tasarımı için değerli veriler sağlayacaktır [32]. Bu çalışmada, gül posası, evsel arıtma tesis çamuru ve yerli Kale Linyiti olmak üzere üç farklı yakıt ağırlıkça farklı oranda karıştırılmış ve bu

karışımların termogravimetrik analizleri gerçekleştirilerek, bu yakıt karışımlarının yanma karakteristikleri, yanma indeksleri ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.

2 Materyal ve Metod

2.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan evsel arıtma çamurları (Ç), Isparta Evsel Atıksu Arıtma Tesisinden temin edilmiştir. Gül posası (G) numuneleri ise Isparta'da gül yağı işleyen bir tesisten, yerli linyit (L) ise Denizli Kale'den temin edilmiştir. Temin edilen arıtma çamurları ve gül posası ilk olarak oda sıcaklığında ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) kurutulmuştur. Ardından $75 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 3 saat boyunca etüvde bekletilerek nemi giderilmiştir. Malzemeler ağırlıkça farklı oranlarda birbiri ile karıştırılmış ve %15 evsel arıtma çamuru (Ç) + %15 gül posası (G) + %70 Kale Linyiti (L); %25Ç + %25G + %50L ve %40Ç + %40G + %20L olmak üzere üç farklı yakıt karışımı hazırlanmıştır. Karışımındaki yüzdelik olarak verilen değerler kullanılan malzemelerin karışımındaki ağırlıkça oranını göstermektedir.

2.2 Malzemelerin Yaklaşık ve Elemental Analizleri

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yaklaşık ve elemental analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloda yer alan biyokütlenin sabit karbon, uçucu madde miktarı, kül miktarı, nem miktarı değerlerinin hesaplanması için ilgili ASTM Standartları kullanılmıştır. Bu çalışmadaki biyokütle numunelerinin nem miktarı için ASTM D-871-82, uçucu madde miktarı için ASTM E-872-82 ve kül miktarı için ASTM E-1755-01 standartları kullanılmıştır. Linyit için ise ASTM D3172-13 standardı kullanılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malzemelerin yaklaşık ve elemental analiz (kuru bazda) sonuçları.

Table 1. Proximate and elemental analysis results (on dry base) of the materials used in the study.

Parametreler	Arıtma çamuru*	Gül Posası**	Linyit**
Nem % (geldiği gibi)	68.90	6.20	14.33
Uçucu madde, % (kuru bazda)	25.21	77.6	41.43
Kül, % (kuru bazda)	71.90	10.84	40.67
Sabit karbon, % (kuru bazda)	2.89	11.56	17.90
C, %	29.13	45.58	66.76
H, %	3.59	6.02	5.79
N, %	3.57	4.14	1.87
S, %	1.04	0.29	4.42
Üst ısı değeri (HHV) (kcal/kg)**	4110	3924	5611
*geldiği gibi	** kurutulmuş numune		

Arıtma çamurları yüksek oranda nem içermektedirler [33], [34]. Nem içeriğinin yüksek olması yakıtların yanma verimini azaltmaktadır [35]. Bu çalışmada ham arıtma çamurunun nem içeriğinin %68.9 ile nispeten yüksek olduğu görülmüştür. Yakıt karışımlarının yüksek oranda kül içermesi de yanma verimini düşürmektedir [33]. Arıtma çamurlarının inorganik madde içerikleri, yüksek kül miktarı ve düşük sabit karbon içeriğine neden olabilmektedir [37], [38]. Bu çalışmada da arıtma çamurunun yüksek kül (%71.90) ve düşük sabit karbon içeriğine (%2.89) sahip olduğu görülmüştür. Yakıt karışımlarının HHV değerinin, nem, C ve O içeriği ile ilgili olduğu bildirilmektedir [29]. Bu çalışmada arıtma çamurunun düşük C (%29.13) içerdiği görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda arıtma çamurunun HHV değerinin 770.27-4714.82 kcal/kg aralığında olduğu bildirilmektedir [33], [38],

[39], [40], [41]. Bu çalışmadaki HHV değerinin ise 4110 kcal/kg ile literatürde verilen aralıktaki yer aldığı görülmektedir. Eysel arıtma çamurlarıyla yapılan çalışmalarda; H, S ve N içeriklerinin sırasıyla, %3.18-9.72; %0.54-2.69 ve %1.21-8.95 olduğu bildirilmektedir [38], [39], [40], [36]. Bu çalışmada ise H içeriği %3.59; S içeriği %1.04 ve N içeriği ise %3.57 olarak literatür ile benzer olarak bulunmuştur.

Literatürde yapılan çalışmada gül posasının nem içeriğinin %2.41 uçucu madde içeriğinin %66.49, kül içeriğinin %27.55 ve sabit karbon içeriğinin %3,55 olarak hesaplandığı; elementel analizlerinde ise C içeriğinin %49.63; N içeriğinin %2.89; S içeriğinin %0.39 ve HHV'sinin de 2701.35 kcal/kg olduğunu bildirmişlerdir [45]. Başka bir çalışmada ise gül posasının nem içeriğinin %7,83, uçucu madde içeriğinin %71.23 kül içeriğinin %9.16, HHV'sinin 3921.85 kcal/kg olduğunu bildirmiştir [46]. Wilk vd., [47], pancar küspesi nemini %2.14; uçucu maddesini %81.24, külünü %0.97; sabit karbonunu %15.65 ve elementel analizlerinde de C içeriğini %43.4; H içeriğini %5.91; N içeriğini %1.50; S içeriğini de %0.11 olarak bulmuşlardır. Pehlivan vd., [48], kiraz sapı ile yapılan çalışmada nem içeriğini %6.42, uçucu madde içeriğini %81, kül içeriğini %1,86, sabit karbon içeriğini %19.70 ve elementel analizlerini ise C %50.80; H %6.79; N %2.67; O %39.66 olarak bulmuşlardır. Gül posası odunsu biyokütle grubunda yer almaktadır. Odunsu biyoküteller ise selüloz ve hemiselüloz içermelerinden dolayı genel olarak yüksek uçucu madde ve düşük kül miktarları içermektedir [48].

Linyitler içerdikleri nem oranlarına göre gruplandırılmaktadır. Nem oranı %20'nin altında olan linyitler sert, %40'ın üzerindeki yumuşak linyit olarak sınıflandırılır. Nem oranı %18'in altında olan linyitler ise kurutulmadan direkt yakılırlar [49]. Kale Linyitinin nem içeriği literatürde yaklaşık olarak %17 verilmektedir. Yapılan analizde ise oda sıcaklığında kurutulan Kale linyitinin nem oranının %14.33 olduğu, dolayısıyla literatürle benzerlik gösterdiği ve doğrudan yakılabildiği anlaşılmaktadır. Literatürde Kale Linyitinin kül miktarı %29.72 ve %37.58 olarak bulunmuştur [50], [51]. Ülkemizdeki yerli linyitlerin kül içerikleri oldukça yüksektir [52]. TKİ kül sınıflandırmasına göre %40.77 kül miktarı ile Kale Linyiti yüksek kül içeren sınıfta yer almaktadır [53]. Bir yakıtın ısı değeri, tamamen yanması sonucu oluşan ısı ile hesaplanmaktadır. Yerli linyitlerin yaklaşık %75'inin ısı değeri 2500 kcal/kg'dan düşüktür. %17'si 2500-3000 kcal/kg arasında ve yaklaşık %8'i 3000 kcal/kg üzerindedir [54]. Kale linyitinin HHV değerini Varol ve Atımtay [51], 933.178 kcal/kg; Kurt ve Deniz [50], ise 4280 kcal/kg bulmuşlardır. Bu çalışmada ise yerli linyitlerin HHV'si 5611 kcal/kg olarak bulunmuştur.

2.3 Arıtma Çamurlarının Yanma Kinetiklerinin ve Karakteristiklerinin Hesaplanması

Kurutulan numuneler 300-800 µm aralığına elenerek desikatörde saklanmıştır. Numunelerin TG analizleri Kastamonu Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı'nda bulunan Hitachi Marka STA7300 model Termogravimetrik Analiz ve Diferansiyel Termal Analiz Sistemi (TGA-DTA) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TG analizleri için her bir yakıt karışımından yaklaşık 4.00±0.15 g kullanılmıştır. Deneyler, 30-950°C sıcaklık aralığında, 40 ml/dk kuru hava atmosferinde ve 4 farklı ısıtma hızında (10°C/dk; 20°C/dk; 30°C/dk; 40°C/dk) gerçekleştirilmiştir [21], [56], [57]]. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, TG-DTG grafikleri elde edilmiş ve numunelerin çeşitli yanma karakteristikleri hesaplanmıştır. DTG_{max}, maksimum yanma hızını vermektedir. Kesişme yöntemi kullanılarak (T_i) alev alma sıcaklığı ve (T_s) son yanma sıcaklığı elde edilen termogramlara teğetler çizilerek hesaplanmıştır.

Yanma sırasında oluşan pik değerler ve onlara ait DTG_{max} değerleri ise direkt grafikten okunmaktadır [58], [59], [60], [61], [62]. Bu çalışmada kullanılan yakıt karışımlarının yanma karakteristikleri Tablo 3'te verilmiştir. Çalışmada yanma karakteristiklerinin yorumlanması için literatürde en sık kullanılan 4 farklı yanma indeksi (alev alma; son yanma, yanıcılık ve kapsamlı yanma indeksleri) hesaplanmıştır. Alev Alma İndeksi: Yakıt karışımlarının alev alma indekslerinin yüksekliği düşük sıcaklıklarda dahi kolaylıkla yanabileceğini gösteren bir parametredir [63].

$$D_i = \frac{(DTG_{max})}{(T_i * T_{max})} \quad (1)$$

burada; D_i: Alev alma indeksini (% wt/dk*°C²); DTG_{max}: Maksimum yanma hızını (%wt/dk); T_i: Alev alma sıcaklığını (°C); T_{max}: Maksimum pik sıcaklığını (°C) ifade etmektedir. Son Yanma İndeksi, yakıt karışımlarının tamamen yanabilme kapasitesini gösteren bir parametredir [63].

$$D_b = \frac{(DTG_{max})}{(\Delta t_{1/2} * t_f)} \quad (2)$$

burada; D_b: Son yanma indeksini (%wt/dk³); Δt_{1/2}: DTG/DTG_{max}'in 0.5 oranında bozunmasını gerçekleştirdiği süreyi (dk); t_f: son yanma zamanını (dk) ifade etmektedir. Yanıcılık İndeksi: Yanıcılık indeksi ne kadar yüksekse yakıt karışımları o kadar iyi yanma özelliği göstermektedir [63].

$$C = \frac{(DTG_{max})}{(T_i)^2} \quad (3)$$

burada; C: Yanıcılık indeksini (% wt/dk*°C²); DTG_{max}: Maksimum yanma hızını (% wt); T_i: Alev alma sıcaklığını (°C) ifade eder. Kapsamlı Yanma İndeksi (S) (%wt/dk²*°C³), yakıt karışımlarının yanma ve alev alma kapasitelerini göstermektedir [63].

$$S = \frac{(DTG_{max} * DTG_{ort})}{((T_i)^2 * T_f)} \quad (4)$$

burada; S: Kapsamlı yanma indeksini; DTG_{max}: Maksimum yanma hızını (% wt/dk); DTG_{ort}: Maksimum yanma hızlarının ortalamasını (%/dk); T_i: Alev alma sıcaklığı (°C); T_f: Son yanma sıcaklığını (°C) göstermektedir.

Termal kinetik hesaplamalarda Flynn-Wall-Ozawa (FWO) yöntemi kullanılmış ve bu yöntem aracılığıyla örneklerin aktivasyon enerjileri (E_a, kJ/mol) belirlenmiştir [56]. Bu yöntem, temel hız denkleminde dayanmaktadır ve sabit sıcaklık (T) altında reaktan dönüşüm derecesi (α) ile hız sabiti (k)'nin fonksiyonu şeklinde ifade edilmektedir:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k f(\alpha) \quad (5)$$

Reaktan dönüşüm oranı ise şu eşitlik yardımıyla tanımlanmaktadır:

$$\alpha = \frac{(m_0 - m_t)}{(m_0 - m_\infty)} \quad (6)$$

Burada m₀ (g) başlangıçtaki kütle, m_t (g) belirli bir t anındaki kütle, m_∞ (g) ise reaksiyon sonunda kalan kütle temsil etmektedir. Hız sabiti genellikle Arrhenius eşitliği ile ifade edilir:

$$k = A e^{(-E_a/RT)} \quad (7)$$

Bu denklemde A (dak⁻¹) Arrhenius sabitini, E_a (kJ/mol) aktivasyon enerjisini, T (K) mutlak sıcaklığı ve R (8.314 J/mol/K) gaz sabitini göstermektedir. Denklem (5) ile Arrhenius eşitliği birleştirildiğinde:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A f(\alpha) e^{(-E_a/RT)} \quad (8)$$

İzotermal olmayan TGA analizlerinde, doğrusal ısıtma hızı $\beta = dT/dt$ kabul edilirse eşitlik şu şekilde yazılır:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{-E_a/RT} f(\alpha) \quad (9)$$

Bu türetilmiş ifadeler, TGA deneylerinden elde edilen kinetik parametrelerin belirlenmesinde temel alınır. Modelden bağımsız izokonversiyon yöntemleri, biyokütle numunelerinin aktivasyon enerjilerinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [59]. FWO yaklaşımı, sıcaklık integralinin çözümünde Doyle yaklaşımını esas alır ve daha yüksek bir doğruluk sağlamaktadır. Bu yöntemde aktivasyon enerjisi, farklı ısıtma hızlarına karşılık gelen sabit dönüşüm derecelerindeki sıcaklıklar üzerinden aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\log \beta = \log \left(\frac{A E_a}{R g(\alpha)} \right) - 2.315 - 0.4567 \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (10)$$

Belirli bir dönüşüm oranı için $\log \beta$ değerlerinin $1/T$ 'ye karşı grafiği çizildiğinde, elde edilen doğrunun eğimi $0.4567 \cdot E_a/R$ değerini vermektedir. Böylece, eğim kullanılarak aktivasyon enerjisi hesaplanabilmektedir [66].

3 Araştırma Bulguları ve Tartışma

3.1 Yakıt Karışımlarının Termal Bozunmasının Değerlendirilmesi

Şekil 1'de yakıt karışımlarının 10°C/dk ısıtma hızındaki termal bozunmaları gösterilmektedir. Bu çalışmadaki arıtma çamurlarının termal bozunması yaklaşık olarak 150-850°C aralığında gerçekleşmiştir. Elde edilen termogramlarda karışımlara ve seçilen ısıtma hızlarına bağlı olarak 6 pik tespit edilirken, ısıtma hızının artması ile termogramlarda 4 ana pik görülmüştür. Birinci pik yaklaşık 200°C'ye kadar devam etmiştir. Bu bölge numunelerdeki nem ve düşük uçuculuğa sahip bileşiklerin numuneden çıkışının olduğu bölgedir [67]. 2. bölgenin yaklaşık 200 ile 408°C arasında, 3. bölgenin ise yaklaşık 400 ile 600°C arasında olduğu görülmektedir. Arıtma çamurlarının termogramlarındaki ikinci ve üçüncü bölgelerde ise selüloz, lipit, hemiselüloz, protein ve karbonhidratların bozunmasının gerçekleştiği ön görülmektedir [64], [65]. Son olarak 4. bölgenin ise 850°C'ye kadar devam ettiği görülmüştür. 4. bölgede arıtma çamurlarının içerdiği inorganik maddelerin bozunması gerçekleşmektedir [33]. Bu çalışmada Kale Linyitinin termal bozunması ise 4 bölgede gerçekleşmektedir. Birinci bölgede (25-211°C) su ve nem buharlaşmaktadır. İkinci (211-529°C) ve üçüncü bölgelerde (522-630°C) ise uçucu bileşenler açığa çıkmış böylece linyitin alevli yanması gerçekleşmektedir. Dördüncü bölgede (630-800°C) ise küldeki inorganiklerin bozunmasının gerçekleştiği ön görülmektedir [66], [67], [68]. Gül posasının termal bozunması ise 3 bölgede

gerçekleşmiştir. Birinci bölge yaklaşık 200°C'ye kadar devam etmektedir ve gülün içerdiği nem ve düşük uçucu bileşikler gitmektedir. İkinci bölge ise yaklaşık 200-500°C arasında yer almıştır. Bu bölgede biyokütlede içerdiği lignin, selüloz ve hemiselüloz ve organik maddelerin termal bozunması gerçekleşmektedir. Son bölgede ise inorganiklerin yanması gerçekleşir bu bölgede çar oluşumu gözlenmektedir [69].

3.2 Yakıt Karışımlarının Yanma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Çalışmada evsel arıtma çamurunun yanma karakteristiklerini inceleyebilmek adına alev alma, son yanma, maksimum pik sıcaklıkları ve DTG_{max} değerleri olmak üzere farklı parametreler incelenmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Alev alma, son yanma ve maksimum pik sıcaklıkları TG/DTG eğrileri kullanılarak belirlenmiştir [70], [71], [72]. Yakıtların yanması sırasında hesaplanan yanma kinetikleri kadar yakıtların tutuşma davranışı da yakıtların teknolojik kullanım alanlarıyla ilgili bilgi veren önemli özelliklerdir [73]. Alev alma sıcaklığı ne kadar düşükse yakıtı tutuşturmak da o derece kolaydır [74]. Son yanma sıcaklığı ise ne kadar düşükse, yakıtların yanması da o kadar az zaman alır ve küldeki yanıcı madde de o kadar az olur [75]. Isıtma hızı arttıkça, numunelerin ısınma süresi artmakla birlikte, numunenin ısı depolaması da azalmaktadır. Bundan dolayı organik maddelerin yanma süreleri de artmaktadır. Bu çalışmada da alev alma ve son yanma sıcaklıkları literatürle paralellik göstererek genel olarak ısıtma hızının artması ile artış göstermiştir [76]. Çalışmada yakıt karışımlarının alev alma sıcaklığı 180°C (100%Ç)- 258°C (%25Ç+%25G+%50L) arasında değişirken son yanma sıcaklıklarının ise 715°C (%100Ç, @10°C/dk)- 861°C (%100Ç, @40°C/dk) aralığında değiştiği görülmüştür. Yakıt karışımlarının ortalama alev alma sıcaklıkları %100Ç, %15Ç+%15G+%70L, %25Ç+%25G+%50L ve %40Ç+%40G+%20L için sırasıyla, 189°C, 207°C, 242°C ve 226°C olarak hesaplanmıştır. Son yanma sıcaklıkları ise %100Ç, %15Ç+%15G+%70L, %25Ç+%25G+%50L ve %40Ç+%40G+%20L için sırasıyla 797°C, 800°C, 782°C ve 800 °C olarak hesaplanmıştır. Niu vd., [77], arıtma çamurları ile yaptıkları çalışmada alev alma sıcaklığının 250-280°C aralığında, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızında pik sıcaklıklarının sırasıyla yaklaşık 480- 503°C ve 297- 524°C aralığında ve son yanma sıcaklıklarının ise 520-632°C aralığında olduğunu bildirmişlerdir. Gao vd., [78], yaptıkları çalışmada arıtma çamuru ve kömürü ağırlıkça 3 farklı oranda karıştırmış ve 20°C/dk ısıtma hızında alev alma sıcaklıklarını 400-442°C aralığında, son yanma sıcaklıklarını ise 721-730°C aralığında bulmuşlardır. Karışımların hesaplanan sıcaklıklarının, arıtma çamuru ile kömürün alev alma (180-446°C) ve son yanma (652-744°C) sıcaklıklarının arasında yer aldıklarını ve kömüre arıtma çamuru ekledikçe de sıcaklıkların arttığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde bu çalışmada da genel olarak alev alma sıcaklıkları arıtma çamurunun linyite eklenmesi ile artış göstermiştir. Ancak, son yanma sıcaklıklarında genel olarak bir değişim gözlenmemiştir.

Wang vd., [79] ise arıtma çamuru ve kömürün birlikte yanmasını araştırmış ve karışımlardaki kömür oranının artması ile pik sıcaklıklarının doğru orantılı olarak arttığını bildirmişlerdir. Chen vd., [80], yaptıkları çalışmada ise arıtma çamuru ve kömürü ağırlıkça farklı oranlarda karıştırarak yanma karakteristiklerini incelemiş ve en yüksek pik sıcaklığının çamurlarının içerdiği sabit karbonun ve kömürdeki uçucu maddelerin yanmasından kaynaklı olduğunu bildirmişlerdir. Niu vd., [77], arıtma çamurları ile yaptıkları çalışmada 20 ve 40°C/dk ısıtma hızında pik sıcaklıklarının sırasıyla yaklaşık

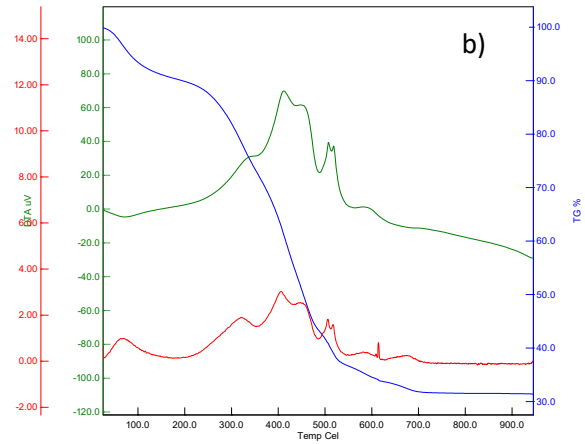
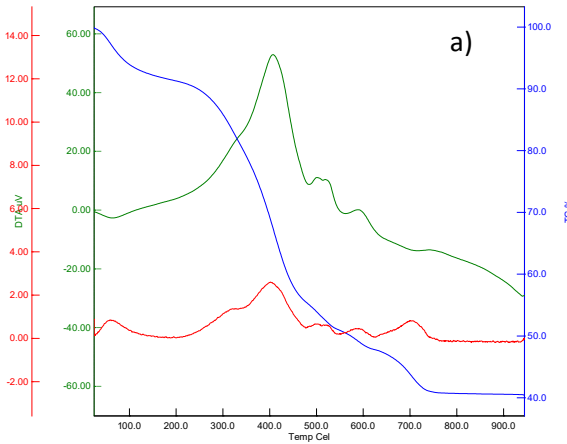
olarak sırasıyla 480- 503°C ve 297- 524°C aralığında olduğunu bildirmişlerdir. Gao vd. [78], arıtma çamurlarını inceledikleri çalışmalarında maksimum pik değerlerini 318-791°C aralığında bulmuşlardır. Literatürde yer alan diğer bir çalışmada arıtma çamurlarının 4 farklı (5-10-15-20°C/dk) ısıtma hızındaki pik sıcaklıkları sırası ile 350-359-363 ve 368°C olarak bildirilmiştir [81]. Bu çalışmada maksimum pik sıcaklıkları çamur için 318°C (10°C/dk) ile 791 °C (40°C/dk) arasında, yakıt karışımları için ise 318 °C (%40Ç+ %40G+ %20L, 10°C/dk) ile 767°C (%25Ç+ %25G+ %50L, @20 °C/dk) arasında değişmiştir (Tablo 2). Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen pik sıcaklıkları literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. DTG_{max}, numunenin maksimum kütle kaybı

oranını belirten bir parametredir [82]. Numunelerin ortalama yanma hızı ve maksimum yanma hızı esas olarak uçucu madde yanma bölgesinde meydana gelmektedir [83]. Bu çalışmada yanma bölgelerinde, ortalama DTG_{max} parametresi ağırlıkça %0.9/dk (%15Ç+%15G+%70L) ile %5.75/dk (%40Ç+%40G+%20L) arasında değişmiştir. Yakıt karışımları için ortalama DTG_{max} değerleri, %40Ç+ %40G+ %20L (%9.8/dk)> %25Ç+ %25G+%50L (%9.1/dk)> %15Ç+ %15G+%70L (%7.5/dk)> %100Ç (%6.4/dk) olarak hesaplanmıştır. Yani, karışımlardaki çamur oranı arttıkça DTG_{max} değerleri artış göstermiştir. Dolayısı ile karışımların daha stabil yanmasını sağlamışlardır [84].

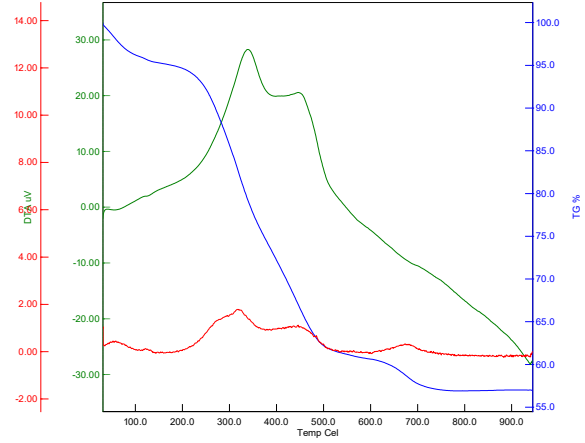
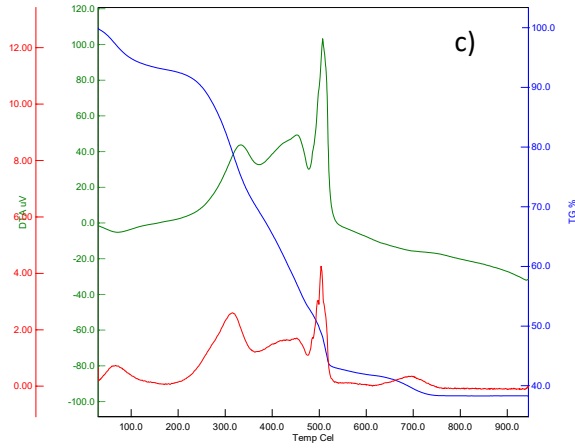
Tablo 2. Yakıt Karışımlarının Yanma Karakteristikleri.

Table 2. Combustion Characteristics of Fuel Blends.

Numune Adı	Isıtma hızı (°C/dk)	Alev alma sıcaklığı (°C)	Pik 2 (°C)	DTG _{max} (%/dk)	Pik 3 (°C)	DTG _{max} (%/dk)	Pik 4 (°C)	DTG _{max} (%/dk)	Son yanma sıcaklığı (°C)
%100 Ç	10	180	318	1.97	445	1.54	673	0.51	715
%100 Ç	20	185	332	3.64	472	1.98	701	0.57	756
%100 Ç	30	206	338	3.77	494	2.49	780	1.22	857
%100 Ç	40	195	339	6.4	503	2.63	791	1.81	861
%15Ç+%15G+ %70L	10	186	-	-	404	2.35	525	1.02	785
%15Ç+%15G+ %70L	20	192	341	4.3	494	4.8	606	0.3	807
%15Ç+%15G+ %70L	30	224	346	4.8	495	6.3	755	1.9	800
%15Ç+%15G+ %70L	40	227	352	5.2	507	7.5	752	0.4	811
%25Ç+%25G+ %50L	10	222	320	1.7	406	2.8	453	2.4	750
%25Ç+%25G+ %50L	20	233	332	3.8	487	5.9	767	0.9	809
%25Ç+%25G+ %50L	30	256	339	7.5	510	6.1	564	6.0	771
%25Ç+%25G+ %50L	40	258	346	9.1	511	7.2	595	7.0	800
%40Ç+%40G+ %20L	10	211	318	2.4	452	1.7	505	0.5	765
%40Ç+%40G+ %20L	20	223	329	5.5	482	5.1	531	0.1	774
%40Ç+%40G+ %20L	30	230	342	5.6	512	4	545	5.3	804
%40Ç+%40G+ %20L	40	251	344	6	-	-	562	5.2	805



d)



Şekil 1. %15Ç+ %15G+ %70L (a); %25Ç+ %25G+ %50L (b); %40Ç+ %40G+ %20L (c); %100Ç (d) olarak hazırlanan yakıt karışımlarının 10°C/dk ısıtma hızındaki termogramları.

Figure 1. Thermograms of fuel mixtures prepared as 25%S + 25%R+ 50%L (a); 15%S+ 15%R + 70%L (b); 40%S + 40%R + 20%L (c); 100%S (d) at a heating rate of 10°C/min.

Arıtma çamurları içerdikleri uçucu madde miktarına bağlı olarak daha hızlı ve daha kısa sürede yanma reaksiyonlarını tamamlayabilmektedirler. Dolayısıyla, S indeksini iyileştirdikleri literatürde verilmektedir [79]. Bu çalışmada da benzer şekilde, karışımlardaki çamur ve biyokütle oranının artması ile D_i indeksinin iyileştiği görülmüştür. Diğer taraftan ısıtma hızının ve yakıt karışımlarındaki linyit oranının artması ile D_b indeksi düşmüştür. Linyit biyokütleyle kıyasla daha düşük termal iletkenliğe sahiptir, dolayısıyla karışımların biyokütle oranının artması ile termal gecikme iyileşmiştir [85]. Bu çalışmada, yakıt karışımlarının ortalama S indeksi, %100Ç için $2.12E-05$; %15Ç+%15G+%70L için $3.04E-05$; %25Ç+%25G+%50L için $2.53E-05$ ve %40Ç+%40G+%20L için $2.19E-05$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama D_i indeksi,

%100Ç için $2.54E-05$; %15Ç+%15G+%70L için; $3.07E-05$; %25Ç+%25G+%50L için $2.85E-05$ ve %40Ç+%40G+%20L için $2.63E-05$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama C indeksi, %100Ç için $1.08E-04$; %15Ç+%15G+%70L için; $1.17E-04$; %25Ç+%25G+%50L için $1.04E-04$ ve %40Ç+%40G+%20L için $9.00E-05$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama D_b indeksi, %100Ç için $3.88E+1$; %15Ç+%15G+%70L için; $4.04E+1$; %25Ç+%25G+%50L için $3.92E+1$ ve %40Ç+%40G+%20L için $33.51E+1$ olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada en yüksek yanma indeksleri %15Ç+%15G+%70L karışımı için hesaplanmıştır (Tablo 3). Çamur karışımlarının daha verimli yanması için çamura gül ve linyit eklenmesinin çamurun yanma indeksini genel anlamda iyileştirdiği görülmüştür.

3.3 Yakıt Karışımlarının Yanma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Çalışmada FWO metodu kullanılarak yakıt karışımlarının oksidatif atmosferde termal bozunması sırasındaki aktivasyon enerjileri de hesaplanmış ve ortalama aktivasyon enerjileri 0.10 ile 0.90 aralığındaki kütlese dönüşüm oranları için sırası ile %15Ç+%15G+%70L için 86.68 kJ/mol; %25Ç+%25G+%50L için 107.20 kJ/mol; %40Ç+%40G+%20L için 114.07 kJ/mol ve %100 Ç için ise 160.05 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Çalışmada farklı kütlese dönüşüm oranları için hesaplanan aktivasyon enerji değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Daha önce literatürde yapılan çalışmalarda Kale Linyiti ve gül posasının aktivasyon enerjileri sırası ile 62.62 kJ/mol ve 187 kJ/mol olarak bulunmuştur [21], [22].

Tablo 3. Yakıt karışımlarının yanma indeksleri.

Table 3. Combustion index of the fuel blends.

Numune Adı	Isıtma hızı (°C/dk)	Kapsamlı Yanma İndeksi (S)	Alev Alma İndeksi (Di)	Yanıcılık İndeksi (C)	Son Yanma İndeksi (Db)
%100 Ç	10	1.61E-06	1.53E-05	6.08E-05	6.95E+01
%100 Ç	20	7.01E-06	2.60E-05	1.06E-04	3.68E+01
%100 Ç	30	1.60E-05	2.27E-05	1.00E-04	2.79E+01
%100 Ç	40	6.01E-05	3.77E-05	1.65E-04	2.10E+01
%15Ç+%15G+%70L	10	2.69E-06	1.61E-05	6.79E-05	7.65E+01
%15Ç+%15G+%70L	20	2.44E-05	3.10E-05	1.30E-04	3.94E+01
%15Ç+%15G+%70L	30	4.58E-05	3.52E-05	1.26E-04	2.60E+01
%15Ç+%15G+%70L	40	4.86E-05	4.07E-05	1.46E-04	1.98E+01
%25Ç+%25G+%50L	10	3.90E-06	1.68E-05	5.68E-05	7.30E+01
%25Ç+%25G+%50L	20	1.88E-05	3.13E-05	1.09E-04	2.63E+01
%25Ç+%25G+%50L	30	3.25E-05	3.09E-05	1.14E-04	2.50E+01
%25Ç+%25G+%50L	40	4.60E-05	3.49E-05	1.37E-04	1.95E+01
%40Ç+%40G+%20L	10	4.46E-06	1.49E-05	5.39E-05	7.45E+01
%40Ç+%40G+%20L	20	2.05E-05	3.19E-05	1.11E-04	3.77E+01
%40Ç+%40G+%20L	30	1.41E-05	3.03E-05	1.06E-04	2.61E+01
%40Ç+%40G+%20L	40	2.95E-05	2.97E-05	9.52E-05	1.96E+01

Literatürde yer alan bazı çalışmalar ise Tablo 4'te verilmiştir. Li vd., [69], çalışmalarında arıtma çamuru içeriğinden toprak alkali metallerinin uzaklaştırılması ile daha yüksek aktivasyon enerjisi değerleri elde ettiklerini bildirmişlerdir. Genel olarak bakıldığında, arıtma çamuru ve karışımlarının geniş bir aktivasyon enerjisi aralığına sahip oldukları görülmüştür. Bu durumun ise içerdikleri uçucu ve organik maddelerin farklılığından kaynaklandığı öngörülmekle birlikte, bu çalışmada elde edilen aktivasyon enerji değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Yakıt karışımlarının aktivasyon enerjileri (kJ/mol).

Table 4. Activation energies of fuel blends (kJ/mole).

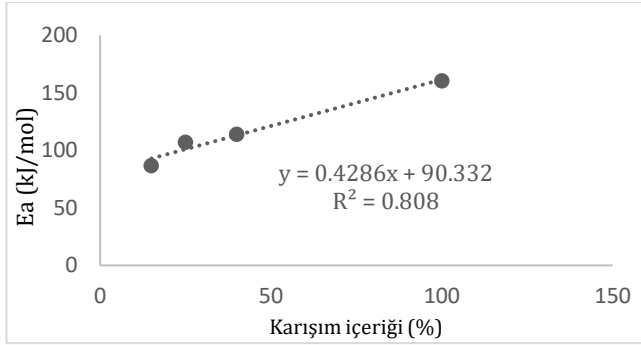
Kütle Dönüşümü α (%)	%15Ç+ %15G+ %70L	%25Ç+ %25G+ %50L	%40Ç+ %40G+ %20L	%100 Ç
10	36.59	41.01	55.98	187.69
15	61.02	47.68	100.27	181.68
20	113.78	108.11	129.68	208.81
25	123.60	152.54	143.13	195.69
30	126.39	176.07	141.62	181.68
35	121.44	198.74	142.82	191.69
40	94.30	190.15	138.74	193.69
45	89.28	157.79	127.30	123.06
50	70.02	117.67	112.91	144.91
55	63.39	100.52	111.34	151.64
60	58.03	82.92	103.93	181.32
65	56.35	76.25	101.35	130.71
70	58.47	71.72	95.03	115.42
75	66.54	69.40	107.92	97.58
80	112.81	68.27	121.84	137.99
85	110.66	78.53	115.58	159.11
90	110.92	84.98	88.76	138.17
Ortalama E _a	86.68	107.20	114.07	160.05

Tablo 5. Literatürde arıtma çamuru ve kömür karışımları yapılan bazı çalışmalar.

Table 5. Some studies on sewage sludge and coal mixtures in the literature.

Karışım	TGA ortamı	Sıcaklık (°C) / @ dönüşüm aralığı	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)	Referans
%9 K+ %5 Ç	Hava	40-900	128.70	Gao vd., [78]
%90K+ %10 Ç			107.48	
%85 K+ %15 Ç			103.47	
%80 K+ %20 Ç			81.50	
%100 Ç	Hava	170-375	219.2	Wang vd., [79]
%100 Ç		373-515	144.7	
%100K		320-740	143.8	
%60Ç+ %40 K		200-450	206.2	
%60Ç+ %40 K		450-700	110	
%50 Ç+ %50 K	Hava	@ 0.2-0.4	194.4	Li vd., [69]
%50 alkali Ç+		@ 0.5-0.8	128.8	
%50 K		@ 0.2-0.4	207.9	
%50 alkali Ç+		@ 0.5-0.8	138.5	
%50 Ca K		@ 0.2-0.4	207.3	
		@ 0.5-0.8	128.5	
%100 arıtma çamuru	Hava	@0.1-0.7	236.9	Aidabulov, vd., [86]
%100 Ç	Hava		109.37	Zhang vd., [41]
%100 K		@0.1-0.9	79.63	
%200 ^o hidrokömür			82.12	
%100 Ç	Hava	@0.1-0.9	160.05	Bu çalışma
%15Ç+ %15G+ %70L			86.80	
%25Ç+ %25G+ %50L			107.20	
%40Ç+ %40G+ %20L			114.07	

Yakıt karışımlarının içeriği yakıtın yanması sırasında sinerjik etki yaratabilmektedir. Şekil 2'den de görüldüğü üzere R^2 1'den farklı bulunmuştur. Bu durum yakıt karışımlarının yanması sırasındaki sinerjik etkiye işaret etmektedir. Arıtma çamurları yüksek uçucu madde içeriğinden dolayı yakıt karışımlarının daha kolay yanmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla, yakıt karışımlarındaki çamur miktarı ile aktivasyon enerjileri arasında pozitif bir sinerji olduğu ve bu durumun ise eş zamanlı yanmalarından kaynaklı olduğu yine literatürde vurgulanmaktadır [61], [87], [88].



Şekil 2. Yakıt karışımlarındaki çamur içeriği oranının yakıt karışımı için hesaplanan aktivasyon enerjisi ile olan ilişkisi.

Figure 2. Relationship between the sludge content in the fuel mixtures and the activation energy calculated for the fuel mixture.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada arıtma çamuru ve linyit karışımlarının yanma karakteristikleri, aktivasyon enerjileri ve yanma indeksleri termogravimetrik analizler ile incelenmiştir. Çalışmada yakıt karışımlarının ortalama aktivasyon enerjileri %15Ç+%15G+%70L için 86.68 kJ/mol; %25Ç+%25G+%50L için 107.20 kJ/mol; %40Ç+%40G+%20L için 114.07 kJ/mol ve %100 Ç yakıt karışımları için 160.05 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Karışımındaki çamur oranı arttıkça genel olarak alev alma sıcaklıkları ve DTG_{max} artarken, son yanma sıcaklıklarında bir değişim gözlenmemiştir. Yani çamur içeren karışımlar daha geç tutuşup termal olarak daha stabil yanmışlardır. Benzer şekilde, yakıt karışımlarının yanma indekslerine bakıldığında ise linyite arıtma çamurunun eklenmesi ile yakıt karışımlarının genel olarak yanma karakteristiğinin iyileştiği ve yakıt karışımlarının daha verimli yandıkları görülmüştür.

5 Conclusions

In this study, the combustion characteristics, activation energies and combustion indexes of sewage sludge and lignite blends were investigated by thermogravimetric analysis. In the study, the average activation energies of the fuel blends were calculated as 86.68 kJ/mole for 15%S+15%R+70%L, 107.20 kJ/mole for 25%S+25%R+50%L, 114.07 kJ/mole for 40%S+40%R+20%L and 160.05 kJ/mole for 100%S fuel blends, respectively. While the ignition temperatures and DTG_{max} generally increased as the sludge content in the mixture increased, no change was observed in the burnout temperatures. In other words, the blends containing sludge ignited later and burned more thermally stable. Similarly, looking at the combustion indexes of the fuel blends, it was observed that the addition of sewage sludge to lignite improved

the combustion characteristics of the fuel blends in general and the fuel blends burned more efficiently.

6 Teşekkür

7 Yazar katkı beyanı

Yazar 1, kinetik hesaplamalar ve yazım kısmında, Yazar 2, 3 ve 5 deneysel çalışmalar ve literatür taraması kısmında, Yazar 4 ise çalışmanın temelini ve yazım fikrinin oluşturulmasında katkı sağlamıştır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Wang J, Azam W. "Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries". *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757, 2024.
- [2] Akgül G, Turan Z. "Endüstriyel çay atıklarından üretilen biyokömürün yakıt pillerinde uygulanması-yenilikçi bir yaklaşım". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 122-126, 2020.
- [3] TÜİK. "İstatistik Veri Portalı". <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKatEgori?p=Cevre-ve-Enerji-103> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [4] UDIAD. "Türkiye'nin Enerjide Dışa Bağımlılığı Azaltma Hedefi". <https://udiad.org/turkiyenin-enerjide-disa-bagimligi-azaltma-hedefi/> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [5] MTA. "Kömür Arama Araştırmaları". <https://www.mta.gov.tr/v3.0/ara-stirmalar/komur-arama-arastirmalari> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [6] Wani SS, Parveez M. "Quality and potential assessment of sewage sludge for clean energy utilization: a study from Srinagar City". *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16, 2025.
- [7] TÜİK. "Atık İstatistikleri". <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [8] Erbaş S, Kazaz S, Baydar H. "Effects of Top-Pruning time on Fresh flower yield, rose oil content and Compounds in oil-Bearing rose (*Rosa damascena* Mill.)". *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26, 2022.
- [9] Tosun I, Gönüllü MT, Arslankaya E. "Gülyağı Sanayi Proses Atıksuları Özelliklerinin Belirlenmesi". 1. *Ulusal Çevre Sorunları Sempozyumu*, Erzurum, Türkiye, 2002.
- [10] T.C. Isparta Valiliği İl Tarım ve Orman Müdürlüğü. "Brifing". <https://isparta.tarimorman.gov.tr/Men u/49/Brifingler> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [11] Ye J, Li Y, Chang G, Chen X, Wang C, Zhang J. "Potential of carbon neutrality for a wastewater treatment plant based on recovery of carbon

- dioxide and heat from chemical looping combustion of sludge". *Journal of Water Process Engineering*, 75, 108081, 2025.
- [12] Çapraz O. "Denizli ili için yenilenebilir enerji kaynaklarının çok kriterli karar verme yöntemleriyle değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 0-0.
- [13] Ali MB, El Hazzat M, Flayou M, Moussadik A, Belekbir S, Sifou A, El Hamidi A. "Advanced Kinetic and Thermodynamic Analysis of Sewage Sludge Combustion: A Study of Non-Isothermal Reaction Mechanisms and Energy Recovery". *FirePhysChem*, 2025.
- [14] Chen L, Liao Y, Xia Y, Ma X. "Combustion characteristics of co-combusted municipal solid wastes and sewage sludge". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 5730-5742, 2024.
- [15] Chan YH, Lock SSM, Chin BLF, Wong MK, Loy ACM, Foong SY, Yiin CL, Lam SS. "Progress in thermochemical co-processing of biomass and sludge for sustainable energy, value-added products and circular economy". *Bioresource Technology*, 380, 129061, 2023.
- [16] Haykiri-Acma H, Yaman S. "Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomass blends: a Turkish case study". *Waste Management*, 28(11), 2077-2084, 2008.
- [17] Atımtay A, Yurdakul S. "Combustion and Co-Combustion characteristics of torrefied poultry litter with lignite". *Renewable Energy*, 148, 1292-1301, 2020.
- [18] Wahab A, Sattar H, Ashraf A, Hussain SN, Saleem M, Munir S. "Thermochemical, kinetic and ash characteristics behaviour of Thai lignite, agricultural residues and synthetic polymer waste (EVA)". *Fuel*, 266, 117151, 2020.
- [19] Çakal GÖ, Yücel H, Gürüz AG. "Physical and chemical properties of selected Turkish lignites and their pyrolysis and gasification rates determined by thermogravimetric analysis". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 80(1), 262-268, 2007.
- [20] Magalhães D, Kazañç E, Ferreira A, Rabaçal M, Costa M. "Ignition behavior of Turkish biomass and lignite fuels at low and high heating rates". *Fuel*, 207, 154-164, 2017.
- [21] Yurdakul S, Gürel B, Varol M, Gürbüz H, Kurtuluş K. "Investigation on thermal degradation kinetics and mechanisms of chicken manure, lignite, and their blends by TGA". *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11, 2021.
- [22] Armakan S, Civan M, Yurdakul S. "Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(22), 12855-12869, 2022.
- [23] Ni Z, Zhang Y, Liu X, Shi H, Yao Y, Tian J, Liu L. "Co-combustion of sewage sludge with corn stalk based on TG-MS and TG-DSC: Gas products, interaction mechanisms, and kinetic behavior". *Energy*, 308, 132747, 2024.
- [24] Zaker A, Chen Z, Zaheer-Uddin M, Guo J. "Co-pyrolysis of sewage sludge and low-density polyethylene – a thermogravimetric study of thermo-kinetics and thermodynamic parameters". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104554, 2021.
- [25] Naqvi SR, Tariq R, Hameed Z, Ali I, Taqvi SA, Naqvi M, Farooq W. "Pyrolysis of high-ash sewage sludge: Thermo-kinetic study using TGA and artificial neural networks". *Fuel*, 233, 529-538, 2018.
- [26] Liu W, Iordan CM, Cherubini F, Hu X, Fu D. "Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China". *Journal of Cleaner Production*, 287, 125046, 2021.
- [27] Messaoudi H, Koukouch A, Bakhattar I, Asbik M, Bonnamy S, Benhouna EG, Rouboa A. "Physicochemical Characterization, Thermal Behavior, and Pyrolysis Kinetics of Sewage Sludge". *Energies*, 17(3), 582, 2024.
- [28] Wu J, Liao Y, Lin Y, Tian Y, Ma X. "Study on thermal decomposition kinetics model of sewage sludge and wheat based on multi distributed activation energy". *Energy*, 185, 795-803, 2019.
- [29] Huang L, Liu J, He Y, Sun S, Chen J, Sun J, Ning XA. "Thermodynamics and kinetics parameters of co-combustion between sewage sludge and water hyacinth in CO₂/O₂ atmosphere as biomass to solid biofuel". *Bioresource Technology*, 218, 631-642, 2016.
- [30] Petrović A, Stergar J, Škodič L, Rašl N, Predikaka TC, Čuček L, Urbanc D. "Thermo-kinetic analysis of pyrolysis of thermally pre-treated sewage sludge from the food industry". *Thermal Science and Engineering Progress*, 42, 101863, 2023.
- [31] TGA. "What is Thermogravimetric Analysis". <https://www.tainstruments.com/what-is-thermogravimetric-analysis/> (Erişim tarihi: 26.04.2025).
- [32] Xiao R, Yang W, Cong X, Dong K, Xu J, Wang D, Yang X. "Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis". *Energy*, 201, 117537, 2020.
- [33] Zhang Y, Yao Y, Yu S, Huang M, Lu X, Lian J, Rao B. "Rapid detection of sludge moisture content based on the frequency domain reflection". *Environmental Technology*, 46(14), 2615-2628, 2025.
- [34] Djandja OS, Yin LX, Wang ZC, Duan PG. "From wastewater treatment to resources recovery through hydrothermal treatments of municipal sewage sludge: A critical review". *Process Safety and Environmental Protection*, 151, 101-127, 2021.
- [35] Qian X, Xue J, Yang Y, Lee SW. "Thermal properties and combustion-related problems prediction of agricultural crop residues". *Energies*, 14, 4619, 2021.
- [36] Boylu F, Karaağaçlıoğlu İE. "Kömür bileşenlerinin kalorifik değer üzerindeki etkisi üzerine değerlendirme". *Yerbilimleri*, 39(3), 221-236, 2018.

- [37] Chan WP, Wang JY. "Comprehensive characterisation of sewage sludge for thermochemical conversion processes-based on Singapore survey". *Waste Management*, 54, 131-142, 2016.
- [38] Zhao L, Sun ZF, Pan XW, Tan JY, Yang SS, Wu JT, Ren NQ. "Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions". *Water Research X*, 18, 100167, 2023.
- [39] Chen YH, Ngo TNLT, Chiang KY. "Enhanced hydrogen production in co-gasification of sewage sludge and industrial wastewater sludge by a pilot-scale fluidized bed gasifier". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14083-14095, 2021.
- [40] Nguyen VT, Chiang KY. "Sewage and textile sludge thermal degradation kinetic study using multistep approach". *Thermochimica Acta*, 698, 178871, 2021.
- [41] Zhou Y, Zhao H, Lu Z, Ren X, Zhang Z, Wang Q. "Synergistic effects of biochar derived from different sources on greenhouse gas emissions and microplastics mitigation during sewage sludge composting". *Bioresource Technology*, 387, 129556, 2023.
- [42] Jiang LB, Yuan XZ, Li H, Chen XH, Xiao ZH, Liang J, Zeng GM. "Co-pelletization of sewage sludge and biomass: Thermogravimetric analysis and ash deposits". *Fuel Processing Technology*, 145, 109-115, 2016.
- [43] Zhang D, Luo W, Li Y, Wang G, Li G. "Performance of co-composting sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste at different proportions". *Bioresource Technology*, 250, 853-859, 2018.
- [44] Wang J, Zhao X, Cai N, Chen M, Wang H. "Pollution discharge and environmental treatment efficiency of rural domestic sewage in China". *Research of Environmental Sciences*, 33(12), 2665-2674, 2020.
- [45] Atay OA, Ekinci K. "Characterization of pellets made from rose oil processing solid wastes/coal powder/pine bark". *Renewable Energy*, 149, 933-939, 2020.
- [46] Kanyılmaz M. *Gül posası ve tavuk gübresinin hidrotermal karbonizasyonu ve torefikasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2024.
- [47] Wilk M, Śliz M, Gajek M. "The effects of hydrothermal carbonization operating parameters on high-value hydrochar derived from beet pulp". *Renewable Energy*, 177, 216-228, 2021.
- [48] Pehlivan E, Özbay N, Yargıç AS, Şahin RZ. "Production and characterization of chars from cherry pulp via pyrolysis". *Journal of Environmental Management*, 203, 1017-1025, 2017.
- [49] Uçışık Erbilin S, Şahin G. "Energy geography within the scope of the lignite in Türkiye". *Doğu Coğrafya Dergisi*, 20, 135-160, 2015.
- [50] Deniz V, Kurt M. "Kale (Denizli) Linyitleri ile İthal Kömür Tozlarının Briketlenme Olasılığının Araştırılması". *Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, 2001.
- [51] Varol M, Atımtay AT. "Effect of biomass-sulfur interaction on ash composition and agglomeration for the co-combustion of high-sulfur lignite coals and olive cake in a circulating fluidized bed combustor". *Bioresource Technology*, 198, 325-331, 2015.
- [52] Kemal M, Semerkant O. "Türkiye linyit potansiyeli ve kullanım olanağı". *Madencilik*, 27, 17-31, 1988.
- [53] Cabuk B, Duman G, Yanik J, Olgun H. "Effect of fuel blend composition on hydrogen yield in co-gasification of coal and non-woody biomass". *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3435-3443, 2020.
- [54] TKİ. "Enerji ve Kömür". <https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur> (Erişim tarihi: 28.04.2025).
- [55] MTA. "Maden Teknik Arama; Kömür Arama Araştırmaları". <https://www.mta.gov.tr/v3.0/ara-stirmalar/komur-arama-arastirmalari> (Erişim tarihi: 28.04.2025).
- [56] Yurdakul S. "Determination of co-combustion properties and thermal kinetics of poultry litter/coal blends using thermogravimetry". *Renewable Energy*, 89, 215-223, 2016.
- [57] Saadatkhah N, Carillo Garcia A, Ackermann S, Leclerc P, Latifi M, Samih S, Chaouki J. "Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 34-43, 2020.
- [58] Zhai Y, Peng W, Zeng G, Fu Z, Lan Y, Chen H, Fan X. "Pyrolysis characteristics and kinetics of sewage sludge for different sizes and heating rates". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 107(3), 1015-1022, 2012.
- [59] Lu JJ, Chen WH. "Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis". *Applied Energy*, 160, 49-57, 2015.
- [60] Feng X, Zhang C, Tan P, Zhang X, Fang Q, Chen G. "Experimental study of the physicochemical structure and moisture readsorption characteristics of Zhaotong lignite after hydrothermal and thermal upgrading". *Fuel*, 185, 112-121, 2016.
- [61] Wu J, Wang B, Cheng F. "Thermal and kinetic characteristics of combustion of coal sludge". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(3), 1899-1909, 2017.
- [62] Zheng S, Hu Y, Wang Z, Cheng X. "Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends". *Journal of the Energy Institute*, 93(4), 1373-1381, 2020.
- [63] Song CZ, Wen JH, Li YY, Dan H, Shi XY, Xin S. "Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of lignite coals with coal gangue". In: *3rd Annual International Conference on Mechanics and Mechanical Engineering (MME 2016)*, 490-495, Atlantis Press, 2016.
- [64] Zhao M, Ji D. "Investigations on the pyrolysis characteristics of sludge and peanut shell: thermal

- decomposition behaviors, kinetic, products". *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(6), 9071-9082, 2025.
- [65] Hu M, Cao X. "Experimental Assessment of Multiple Properties of Mycelium-Based Composites with Sewage Sludge and Bagasse". *Materials*, 18(6), 1225, 2025.
- [66] Varol M, Atimtay AT, Bay B, Olgun H. "Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis". *Thermochimica Acta*, 510(1-2), 195-201, 2010.
- [67] Abbasi-Atibeh E, Yozgatligil A. "A study on the effects of catalysts on pyrolysis and combustion characteristics of Turkish lignite in oxy-fuel conditions". *Fuel*, 115, 841-849, 2014.
- [68] Doscokil L, Enev V, Grasset L, Wasserbauer J. "The characterization of South Moravian lignite in its natural and treated forms using thermal degradation methods". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 128, 83-91, 2017.
- [69] Li J, Xu K, Yao X, Liu J. "Investigation of biomass slow pyrolysis mechanisms based on the generation trends in pyrolysis products". *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 327-338, 2024.
- [70] Lin Y, Ma X, Peng X, Yu Z, Fang S, Lin Y, Fan Y. "Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes". *Fuel*, 181, 905-915, 2016.
- [71] Guo F, Liu Y, Wang Y, Li X, Li T, Guo C. "Pyrolysis kinetics and behavior of potassium-impregnated pine wood in TGA and a fixed-bed reactor". *Energy Conversion and Management*, 130, 184-191, 2016.
- [72] Cong K, Han F, Zhang Y, Li Q. "The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA". *Fuel*, 237, 126-132, 2019.
- [73] Araujo NR, Carvalho FS, Amaral LV, Braga JP, Pujatti FJ, Sebastião RC. "Kinetic study of the combustion process in internal combustion engines: A new methodological approach employing an artificial neural network". *Fuel*, 382, 133739, 2025.
- [74] Liu T, Jia R, Sun R, Tian W, Wang N, Cai Z. "Research on ignition energy characteristics and explosion propagation law of coal dust cloud under different conditions". *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), 3052191, 2021.
- [75] Fadhil M, Hassan S, Aniza N, Hassan A, Aris S. "Ignition and Burnout Temperature Study of Poultry Processing Dewatered Sludge (PPDS)". *Applied Mechanics and Materials*, 695, 438-442, 2015.
- [76] Zhang X, Gu X, Yu J, Ni Y, Lin R, Wang X, Feng H. "Combustion characteristics and nitrogen conversion mechanism in ammonia/coal Co-firing process". *International Journal of Hydrogen Energy*, 69, 317-330, 2024.
- [77] Niu S, Chen M, Li Y, Lu T. "Combustion characteristics of municipal sewage sludge with different initial moisture contents". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129, 1189-1199, 2017.
- [78] Gao F, Zhou C, Du J, Zhang Y, Wu W, Liu G, Li D. "Effect of gaseous agents on co-combustion characteristics of sewage sludge and coal". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106227, 2021.
- [79] Wang Y, Jia L, Guo J, Wang B, Zhang L, Xiang J, Jin Y. "Thermogravimetric analysis of co-combustion between municipal sewage sludge and coal slime: Combustion characteristics, interaction and kinetics". *Thermochimica Acta*, 706, 179056, 2021.
- [80] Chen J, Sun Y, Zhang Z. "Evolution of trace elements and polluting gases toward clean co-combustion of coal and sewage sludge". *Fuel*, 280, 118685, 2020.
- [81] Othman MR, Park YH, Ngo TA, Kim SS, Kim J, Lee KS. "Thermogravimetric characteristics and pyrolysis kinetics of Gihung Respia sewage sludge". *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27, 163-167, 2010.
- [82] Hu J, Qi N, Yang H, Liu S, Chen W, Cheng W, Chen H. "Investigation on steam co-gasification of torrefied biomass and coal: Thermal behavior, reactivity, product characteristic and synergy". *Energy*, 313, 133914, 2024.
- [83] Wnorowska J, Ciukaj S, Kalisz S. "Thermogravimetric analysis of solid biofuels with additive under air atmosphere". *Energies*, 14(8), 2257, 2021.
- [84] Amit TA, Roy R, Raynie DE. "Thermal and structural characterization of two commercially available technical lignins for potential depolymerization via hydrothermal liquefaction". *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100106, 2021.
- [85] Emiola-Sadiq T, Zhang L, Dalai AK. "Thermal and kinetic studies on biomass degradation via thermogravimetric analysis: a combination of model-fitting and model-free approach". *ACS Omega*, 6(34), 22233-22247, 2021.
- [86] Aidabulov M, Zhakupov D, Zhunussova K, Temireyeva A, Shah D, Sarbassov Y. "Thermal characterization, kinetic analysis and co-combustion of sewage sludge coupled with high ash Ekibastuz coal". *Energies*, 16(18), 6634, 2023.
- [87] Ogugua PC, Su H, Tu Y, Wang E. "Synergistic consideration of co-treatment of sewage sludge, low-rank coal, and straw for sustainable resource utilization and enhanced energy efficiency: a review". *Environmental Science and Pollution Research*, 31(17), 24788-24814, 2024.
- [88] Ling P, Chen D, Xu K, Xu J, Mostafa ME, Jiang L, Xiang J. "Insight into the synergistic effect on thermal behavior in co-pyrolysis of coal slime and sewage sludge: Kinetics, thermodynamics, dendrite neural network modelling, and evolved char structure". *Journal of Cleaner Production*, 450, 141790, 2024.