

Tarımsal atıklardan elde edilen biyopeletlerin bazı yakıt özelliklerinin uluslararası pelet standartları ile karşılaştırılması

Comparison of some fuel properties of biopellets obtained from agricultural wastes with international pellet standards

Zehra YILDIZ¹, Eşref TOPKOÇ²

¹Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Tarsus, Mersin

²Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Tarsus, Mersin

Eser Bilgisi / Article Info

Araştırma makalesi / Research article

DOI: 10.17474/artvinofd.1231448

Sorumlu yazar / Corresponding author

Zehra YILDIZ

e-mail: zyildiz35@hotmail.com

Geliş tarihi / Received

09.01.2023

Düzeltilme tarihi / Received in revised form

27.03.2023

Kabul Tarihi / Accepted

28.03.2023

Elektronik erişim / Online available

15.10.2023

Anahtar kelimeler:

Alternatif yakıtlar

Biyopelet

Pelet standartları

Keywords:

Alternative fuels

Biopellet

Pellet standards

Özet

Fosil yakıtlar enerji ihtiyacının sağlanmasında, ucuz, yaygın kullanılması, çok iyi bilinen bir teknolojsi olması ve enerji yoğunluğunun yüksek olması gibi nedenlerle çevreye zarar vermesine rağmen uzun yıllardır kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar yerine yakıt fiyatında istikrar sağlanabildiği yerli yakıtı yönelmek, daha az kül ve kükürt içeriği ile daha temiz, ısı değeri yüksek bir yakıt elde etmek için biyopeletlerin alternatif yakıt olarak değerlendirilmesinin hem ekonomik hem de ekolojik açıdan büyük bir önemi vardır. Biyopeletler, farklı biyokütle türlerinin kurutulması, öğütülmesi ve sıkıştırılması gibi fiziksel işlemler ile biyokütle form kazandırılarak elde edilir. Biyopeletler, tarım, hayvancılık ve orman atıkları ile bağlayıcı ya da bağlayıcı maddelerden elde edilen silindirik formda katı biyoyakıtlardır. Bu çalışmada sera atıkları peleti, odunsu atık peleti, çam peleti, çam+mdf peleti, ayçiçeği kabuğu peleti, fındık küspesi peleti ve kavak+kozalak peleti olmak üzere yedi farklı biyopeletinin yakıt özellikleri incelenmiştir. Biyopelet numunelerinin çap, uzunluk, parça yoğunluğu, nem miktarı, kül miktarı, ısı değeri, azot ve kükürt miktarı belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda biyopeletlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri uluslararası pelet standartları ile karşılaştırılmıştır. Biyopelet standartlarında, fiziksel özelliklerinden çap 6-10 mm, uzunluk 3.15-40 mm, ısı değeri için 16.5-19.5 MJ kg⁻¹, nem %7-12, kül içeriği %0.5-2 ve parça yoğunluğu 600-1400 kg m⁻³ aralığında değiştiği belirlenmiştir. Azot içeriği %0.3-1 ve kükürt içeriği ise %0.03-0.08 aralıklarında değişmiştir. Çalışma da kullanılan yedi biyopeletin 5-10 mm, uzunluk 10-31 mm, ısı değeri için 15.887-19.836 MJ kg⁻¹, nem %6.06-17.22, kül içeriği %0.54-18.47 ve parça yoğunluğu 970-1270 kg m⁻³ olarak belirlenmiştir. Azot içeriği %0-3.29 ve kükürt içeriği %0-0.79 aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. Odunsu atık peleti ve kavak+kozalak peletlerinin standartlara en uygun biyopelet türleri olduğu belirlenmiştir. Sera atıkları peleti, fındık küspesi peleti, ayçiçeği kabuğu peleti ve çam+mdf peleti standartlara uygun olmayan analiz sonuçları içerdiği belirlenmiştir.

Abstract

Fossil fuels used owing to cheap, extensive, good known technology and high energy although environmental harmful for long time. Fossil fuels, it is important local fuels in term of both great economic and ecologic that is biopellets as an alternative green fuels that is less ash and Sulphur and a higher calorific value when it is stability in the fuel price. Biopellets are obtained by giving form to biomass with physical processes such as cutting, grinding and pressing. Biopellets are solid cylindrical biofuels derived from the wastes of agriculture, livestock and forests with binder or not binding agent. The fuel properties of the seven different biopellets such as greenhouse waste pellet, woody waste pellet, pine pellet, pine+mdf pellet, sunflower shell pellet, hazelnut pulp pellet and poplar+cone pellet examined in this study. It was determined properties such as diameter, length, moisture content, ash content, particulate density, calorific value, nitrogen and sulfur content of the biopellets. Physical and chemical properties of the biopellets as result of these analyzes to compared internaional biopellet standards. In biopellet standards, its physical properties are range was found to vary 6-10 mm in diameter, 3.15-40 mm in length, 16.5-19.5 MJ kg⁻¹ calorific value, 7-12% moisture content, 0.5-2% ash content and 600-1400 kg m⁻³ particle density. Nitrogen content varied between 0.3-1% and sulfur content in the range of 0.03-0.08%. It was determined fuel properties of seven biopellets used in the study 5-10 mm, length 10-31 mm, calorific value 15,887-19,836 MJ kg⁻¹, moisture 6.06-17.22%, ash content 0.54-18.47% and particle density 970-1270 kg m⁻³. It was determined that the nitrogen content varied between 0-3.29% and sulfur content in the range of 0-0.79%. It was determined that woody waste pellets and poplar+cone pellets were the most suitable biopellet types for the standards. It has been determined that greenhouse waste pellet, hazelnut pulp pellet, sunflower shell pellet and pine+mdf pellet contain analysis results that do not comply with the standards.

GİRİŞ

Türkiye'nin yıllık biyokütle potansiyeli 109.4 milyon ton olup, 5 milyon ton civarında tarımsal ürün artığının olduğu tahmin edilmektedir (Sümer ve ark. 2016). Bölgeler içerisinde tarla ürünleri artıklarının toplam ısı değeri açısından en büyük pay %25 ile Akdeniz Bölgesi'ne aittir (Küsek ve ark. 2015). Yonga, talaş, kabuk, kılıf, dal, yaprak, sap, saman, meyve çekirdeklerinden oluşan tarımsal atıklar, hayvansal atıklar ve endüstriyel atıklar atık biyokütle kaynaklarıdır (Sümer ve ark. 2016). Ekili birim alan başına elde edilen tarımsal ürüne yakın miktarda hasat artığı ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar daha çok gübre olarak kullanıldığı ya da doğrudan yakılarak değerlendirildiği için toprağı kirletip verimini azaltmaktadır (Er 2022). Tarımsal artıklar, yakıt üretimi için önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Tarımsal artıklardan enerji üretmek için en kolay ve etkin yöntemlerden birisi, bu artıkları katı yakıt olarak kullanmaktır. Bununla birlikte, bitkisel artıkların katı yakıt olarak kullanımında karşılaşılan en önemli sorun, yoğunluklarının düşük ve nem içeriklerinin yüksek olmasıdır. Bu durum, taşıma ve depolama sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Tarımsal artıklar pelet haline getirilerek bu sorun çözülebilir. Biyopelet üretiminde kullanılan biyokütle türü kaynaklara ve ulaşım yollarına yakınlıklarına göre seçilmektedir. Ege ve Akdeniz'de zeytinyağı fabrikası atığı Pirina, Ankara da mobilya fabrika atıkları, Karadeniz'de orman ve atıkları biyopelet yapımında hammadde olarak genellikle kullanılmıştır (Karaca 2021). Biyopeletler, atık veya taze biyokütle kaynaklarının kurutulması, öğütülmesi ve presslemesi gibi basit fiziksel işlemler ile elde edilir. Biyokütlenin biyopelet haline gelmesi ile ısı değeri yüksek ve yığın yoğunluğu düşük bir katı yakıt elde edilir. Peletleme işlemi ile atıklar yoğunluğu artığı için taşıma, depolama ve nakliye masrafları azalmaktadır. Boyut ve şekilde homojenlik sağlandığı için yakma sistemlerine otomatik beslenerek atıkların daha etkin kullanımı sağlanır, yanma özellikleri iyileşir ve çevreye zarar veren emisyon miktarı azalır. Ayrıca biyopeletler atık biyokütlelerden elde edildiğinde atıkların geri kazanılarak değerlendirilmesi ile hem ekolojik hem de ucuz yerli ve yenilenebilir bir yakıt elde edilir. Bu yakıtlar, kazan yakıtı olarak ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılır (Küsek ve ark. 2015, Bilgin ve ark. 2016).

Biyopeletlerin katı fosil yakıt olan kömüre göre daha az kül ve kükürt içeriğine sahip olmasından dolayı daha temiz, yerli ve yenilenebilir bir alternatif yakıt olarak değerlendirilmesinin hem ekonomik hem de ekolojik açıdan büyük bir önemi vardır. Günümüzde enerji amaçlı kullanılan odun peleti uluslararası düzeyde büyük pazarı olan katı biyokütle yakıtlarından biri olup işlem hacmi bakımından biyodizel ya da biyoetanol ile yarışır duruma gelmiştir (Zengin ve ark. 2020).

Uluslararası biyoyakıt ticaretini yaygınlaştırmak ve kolaylaştırmak için standartlaşma önemlidir. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde pelet yakıtlarında istenen özellikleri belirlemek için ilk çalışmalar 1980'lerin ortalarında ısıtma ekipmanı üreticileri ve kullanıcıları için başlatılmıştır. Almanya, İsveç, Avusturya, İtalya, Fransa, Danimarka, Finlandiya, Hollanda, Birleşik Krallık ve diğer ülkeler 1990'ların başına kadar eski kömür test standartlarını benimsemiştir. 1990'ların sonlarında, Avusturya, İsveç, Birleşik Krallık, Fransa ve Danimarka gibi Avrupa ülkeleri, Evrensel Avrupa Katı Hal Pelet Yakıt Standardı (CEN) standardını kullanmıştır. Standardizasyon için CEN, Teknik Komite (TC) 335 katı biyoyakıtları bünyesinde biyoyakıt standardını geliştirmiştir. Avrupa standardı, CEN/TC 335 kapsamında standardizasyon kaynakları katı biyoyakıt için geçerlidir (Miranda ve ark. 2015, Anonim 2017). Avrupa standardında peletler odunsu, otsu ve meyve gibi biyokütle türlerine göre üç kategori de sınıflandırılmaktadır. Daha sonra her bir kategori dört alt gruba ayrılır. Her bir kategorinin alt grubu orman, plantasyon, odun artıkları, sanayi artıkları ve yan ürünleri ile kullanılmış ahşap ve diğer karışımlardan oluşur (Gürdil ve ark. 2015). 2008 yılında CEN standardı güncellenmiş ve pelet yakıt için uyarlanan ISO standartları kabul edilmiştir. 2000 yılında, Amerikan Pelet Yakıtları Enstitüsü (PFI), biyopelet düzenlemeleri ve pelet yakıtları için bir standardizasyon programı başlatmıştır. 2011 yılında, EN 14961 standardının uygulanması, yoğunlaştırılmış ürün pazarını düzenleyerek üretim teknolojisinin gelişmesini mümkün kılmış ve bu ürünlerin uluslararası ticaretini teşvik etmiştir. Son zamanlarda, EN ISO 17225 standardı eski spesifikasyonun yerini almış, talepleri konut ve üçüncül kullanıma karşılık gelenlerden daha düşük olan endüstriyel uygulama için ahşap peletler gibi yeni sınıflandırmalar getirmiştir.

Avrupa'da ENplus ve Almanya da DINplus standartları, Kuzey Amerika'da ASTM, CANplus ve PFI standartları ve tüm dünyada ISO standartları gibi dünyada odun peletleri için birçok spesifikasyon bulunmaktadır. Avrupa standardı ENplus ve Kanada standardı CANplus biyopellet standartları aynıdır (Miranda ve ark. 2015, Anonim 2017). EN 14961-2 standardına göre üç biyopellet standardı vardır. Kimyasal olarak işlenmiş odun artıklarından üretilen peletler için ENplusA1, kerestecilik atıkları, sanayi faaliyetlerinden elde edilen odun kabukları ve köksüz ağaçlardan üretilen peletler için ENplusA2, orman, ağaçlandırma ve diğer odunlar, ağaç işleme sanayi atıkları ve yan ürünleri ile kullanılmış ahşap ürünlerinden üretilen peletler için ENplusB pelet standartları vardır (Gürdil ve ark. 2015, Aydemir 2017). PFI standardı, Amerika da pellet piyasasında kullanılan biyopelet standardıdır. PFI standardı, DINplus, ENplus, ve CANplus standartlarına çok benzerdir. Bu pelet standartlarının dışında birçok ülkenin kendi pelet standartları vardır. Avusturya da ONORM M 7135 standardı, Fransa da ITEBE standardı, İsviçre de SS 18 71 70 standartları ve İtalya da CTI-R 04/5 standartları kullanılmaktadır. Pelet yakıt standartlarındaki farklılıklar, bazı ülkelerde yanma ekipmanına uygun pelet kullanımını için kalite standartlarının geliştirilmesinden kaynaklanmıştır (Miranda ve ark. 2015, Anonim 2017). Türkiye de biyopelletler için kalite standardı mevcut değildir. Biyopelet standartlarında çap, uzunluk, parça yoğunluğu, dayanıklılık ve ısı değeri gibi fiziksel özellikler ile kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon gibi kısa analiz değerleri yer almaktadır. Biyopeletlerin kimyasal özelliklerinde ise azot, klor ve kükürt gibi kimyasal analiz değerleri değerlendirilmiştir. Düşük nem ve kül miktarı ile yüksek

ısı değeri biyopeletin verimli yandığını gösterir. Düşük nem ve parça yoğunluğu taşınma ve depolama maliyetlerini azaltır. Azot ve kükürt miktarı ise çevreye verilen zararı gösterir. Bu sebeplerle, biyopelet standartlarında nem, kül, kükürt ve azot içeriğinin düşük, ısı değeri ve yoğunluğun yüksek düşük olması beklenmektedir (Aktaş 2022).

Çizelge 1'de biyopeletlerin standartlara göre nem (M), kül (K), üst ısı değeri (Q), çap (D), uzunluk (L) ve parça yoğunluğu (d) gibi fiziksel özellikler ile azot (N) ve kükürt (S) içeriği gibi kimyasal özelliklerinin limit değerleri verilmiştir (Anonim 2008, Bantacut ve ark. 2013, Munawar ve Subiyanto 2014, Anonim 2017, Thrän ve ark. 2017, Amirta 2018, Pradhan ve ark. 2018a, Pradhan ve ark. 2018b, Garcia ve ark. 2019, Cahyono ve ark. 2022). Çizelge 1'deki standartlara göre genel biyopelet standartları çap için 6-10 mm, uzunluk 3.15-40 mm, ısı değeri için 16.5-19.5 MJ kg⁻¹, nem için %7-12, kül içeriği için %0.5-2 ve parça yoğunluğu için 600-1400 kg m⁻³ olduğu görülmüştür. Azot içeriği %0.3-1 ve kükürt içeriği ise %0.03-0.08 aralıklarında değişmektedir.

Yakıt peleti için geliştirilen Amerikan veya Avrupa Birliği kökenli biyopelet standartlarında genellikle biyokütle olarak odun talaşı kullanılmıştır (Gürdil ve ark. 2015). Bu nedenle, standartların farklı tarımsal atıklara göre yeniden düzenlenmesi yararlı olacaktır. Türkiye'nin tarımsal atık potansiyeli yüksek olup, enerji tarımı ve enerji ormancılığına gerekli destek ve önem verildiği takdirde biyopeletler katı kazan yakıtı olarak kömür ve odun yerine kullanılabilir. Bu sebeple enerji de sürdürülebilir teknolojik alt yapı oluşturulmasında Türkiye'nin kendine ait biyopelet standardı geliştirilmesi çok önemlidir.

Çizelge 1. Biyopelet standartları

Pellet standardı	M (%)	K (%)	Q (MJ kg ⁻¹)	D (mm)	L (mm)	d (kg m ⁻³)	N (%)	S (%)
ISO 17225-6 I1	≤10	≤1	≥16.5	6, 8 (±1)	3.15-40	≥600	≤0.3	≤0.05
I2	≤10	≤1.5	≥16.5	6, 8, 10 (±1)	3.15-40	≥600	≤0.6	≤0.05
I3	≤10	≤3	≥16.5	6, 8, 10, 12 (±1)	3.15-40	≥600	≤0.6	≤0.05
ONORM M 7135	< 10	<0.5	>18	4-10	<5D	> 1.120	≤0.3	≤0.04
DIN DIN 51731	<12	<1.5	17.5-19.5	4-10	<50	1.000-1.400	<0.3	<0.08
DINplus	<10	<0.5	>18	4-10	<5D	>1.120	≤0.3	≤0.04
Pellet yakıt enstitüsü	-	<3(Std) <1(Prm)	>19			>640		
ITEBE	<15	≤6	>16.9	6±1	10-30	> 650	<0.3	<0.08
SS 18 71 70 Grup 1	≤10	<0.7	≥16.9	<25	<5D	≥600	-	≤0.08
Grup 2	≤10	<0.7	≥16.9	<25	<5D	≥500	-	≤0.08
Grup 3	≤12	<1.5	≥16.9	<25	<5D	≥500	-	-
CTI-R 04/5 Pellet goldA1	≤10	≤0.7	≥16.9	6±1	3.15-40	≥600	≤0.3	≤0.03
Pellet goldA2	≤10	≤1.5	≥16.9	6±1	3.15-40	≥600	≤0.5	≤0.03
PFI PFI süper premium	≤6	≤0.5	-	6.35-7.25	≤25.4	640-768	-	-
PFI premium	≤8	≤1	-	6.35-7.25	≤25.4	640-768	-	-
PFI standard	≤10	≤2	-	6.35-7.25	≤25.4	608-768	-	-
PFI utility	≤10	≤6	-	6.35-7.25	≤25.4	608-768	-	-
CANplusA1		≤0.7	≥16.5				≤0.3	≤0.04
CANplusA2	≤10	≤1.2	≥16.5	6±1, 8±1	3.15-40	600-750	≤0.5	≤0.05
CANplusB		≤2	≥16.5				≤1.0	≤0.05
ENplusA1		≤0.7	≥16.5				≤0.3	≤0.04
ENplusA2	≤10	≤1.2	≥16.5	6±1, 8±1	3.15-40	600-750	≤0.5	≤0.05
ENplusB		≤2	≥16.5				≤1.0	≤0.05

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ana materyal olarak biyopelet imalatı ve satışı yapan 7 farklı firmadan toplanan örnekler kullanılmıştır. Kullanılacak atık biyoküteller öğütülerek parçacık boyutu küçültülmüş, daha sonra kurutularak nemi giderilmiş ve yüksek basınçla sıkıştırılarak silindirik formda biyopeletler elde edilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 1 de sırasıyla verilen domates sera atıkları peleti (SAP), meşe odunu atık peleti (OAP), çam peleti (ÇAP), çam+mdf

peleti (ÇMP), fındık küspesi peleti (FKP), ayçiçeği kabuğu peleti (AKP) ve kavak+kozalak peleti (KKP) olmak üzere yedi farklı biyopelet kullanılmıştır. Analiz öncesi biyopelet numuneleri havanda öğütülmüştür. Biyopeletlerin çap, uzunluk, parça yoğunluğu, nem, kül, üst ısı değer gibi fiziksel özellikleri ile azot ve kükürt içeriği gibi kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Analizler üç defa tekrarlanmış, elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 1. Biyopelet türleri

(a) sera atıkları (b) odunsu atık (c) çam peleti (d) çam+mdf peleti
(e) fındık küspesi peleti (f) ayçiçeği kabuğu peleti (g) kavak+kozalak peleti

Biyopeletlerin parça yoğunlukları EN 16127 standardına göre belirlenmiştir. Bu yöntemde 80-100 g kütleye sahip biyopelet örnekleri rastgele alınmış ve her bir biyopeletin çapı, uzunluğu dijital kumpas ile ölçülmüştür. Çap ve uzunluk ile silindirin hacim formülünden biyopelet hacmi hesaplanmıştır. Hassas analitik terazi ile biyopelet kütlesi ölçülmüştür. Biyopelet parça yoğunluğu, biyopelet kütlesinin biyopelet hacmine bölünerek olarak hesaplanmıştır.

Nem tayini ASTM E871-82'e göre yapılmıştır. Nem tayini analizi için öğütülmüş biyopelet numunesi petri kabına % 0.1 duyarlılıkta bir miktar alınarak, $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiştir. Sabit tartım sonucunda yaş baz temelde nem miktarı, eşitlik 1 deki gibi ağırlık farkından hesaplanmıştır. Eşitlik 1'de yer alan m_0 ve m_t sırasıyla kurutma öncesi pelet ağırlığı ve kurutma sonrası pelet ağırlığını (g) ifade etmektedir.

$$\% \text{ Nem} = (m_0 - m_t / m_t) * 100 \quad (1)$$

Porselen krozeler 600°C 'de kül fırınında sabit tartıma gelene kadar bekletilmiş ve kül miktarının numune miktarına oranlanmasıyla kuru baz temelde kül içeriği hesaplanmıştır (ASTM D 1102-84). Eşitlik 2'de yer alan m_t , kül miktarı (g) ve m_0 ise başlangıç numune miktarını (g) ifade etmektedir.

$$\% \text{ Kül} = (m_t / m_0) * 100 \quad (2)$$

Biyopelet numunelerinin üst ısı değeri, ASTM D 5865-13 standardına göre IKA Werke marka kalorimetre cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Biyopelet numunelerinin kuru baz temelde N ve S miktarları Thermo Marka Flash 2000 model elementel analiz cihazı ile yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan SAP, OAP, ÇAP, ÇMP, FKP, AKP ve KKP olmak üzere yedi biyopelete ait fiziksel özelliklerinden çap, uzunluk ve yoğunluk, kısa analiz sonuçlarından nem ve kül değerleri, kimyasal özelliklerinden azot ve kükürt sonuçları ile üst ısı değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'de yer alan yedi biyopeletin yakıt analiz değerleri Çizelge 1'de yer alan uluslararası pelet standartlarından SS 18 71 70, ISO 17225-6, ITEBE, CTI-R 04/5, CAN, EN, PFI, ONORM M 7135 ve DIN standartları ile karşılaştırılmıştır.

Biyokütle peletlerinin fiziksel özelliklerinin bilinmesi özellikle taşıma, depolama ve nakliye işlemleri açısından oldukça önemlidir. Biyopeletlerin fiziksel özellikleri biçim, çap ve uzunluk olarak boyutları, hacim ve parça yoğunluğu, sertliği ve dayanıklılığıdır (Sümer ve ark. 2016). Biyopelet uzunluğu yakıtın otomatik olarak yakma sistemine beslenmesi açısından önemlidir. İnce biyopeletler özellikle küçük kapasiteli yakma sistemlerinde daha iyi bir yanma oranı sağlarken daha kısa peletler daha iyi bir akış sağlamaktadır (Bilgin ve ark. 2016). Parçacık boyutunun azalması, yüzey alanını, gözeneklik boyutunu ve sıkıştırma işleminde parçacıkların yapışması için temas eden nokta sayısını artırır. İyi bir pelet kalitesi için parçacık boyutunun, %10-20'sinin oldukça küçük partiküllerden oluşması koşulu ile 6-8 mm arasında olması gerekmektedir. Çünkü daha küçük parçacıklar daha büyük parçacıkların boşluklarını doldurmakta ve böylece daha yoğun ve daha dayanıklı sıkışmış ürünler elde edilebilmektedir. Oldukça kaba parçalanmış materyaller, peletleme işlemi sırasında doğal çatlakların oluşmasına, bu durum da peletlerin oldukça dayanıksız olmasına neden olmaktadır (Küsek ve ark. 2015).

Çizelge 2. Biyopeletlerin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Numune adı	M (%)	K (%)	Q (MJ kg ⁻¹)	D (mm)	L (mm)	D (kg m ⁻³)	N (%)	S (%)
SAP	7.27	18.47	15.887	5.2	10	1210	2.90	0.79
OAP	7.08	0.54	19.681	6.2	24	1260	-	-
ÇAP	8.51	5.07	18.811	6.5	34	1190	-	-
ÇMP	6.06	2.41	18.606	9.3	28	1150	3.29	-
FKP	17.22	3.17	18.364	5.0	10	1270	1.66	0.10
AKP	7.92	3.55	19.665	8.2	16	1000	0.85	0.09
KKP	7.02	1.02	19.836	10	31	970	0.09	-

Bu çalışmada biyopelet çapları 5-10 mm arasında değişmektedir. En küçük biyopelet çapı fındık kabuğu peletine ait olup, 5 mm'dir. En büyük pelet çapı ise kavak+kozalak peletin çapı olup, 10 mm'dir. Biyopelet çapı ONORM M 7135 ve DIN pelet standartlarında 4-10 mm arasında değişmekte bununla birlikte SS 18 71 standardında ise < 25 mm olduğu için çalışmada kullanılan tüm biyopeletler bu standart ölçülerini sağlamaktadır. Ayrıca ITEBE, CTI-R 04/5, CANplus, ENplus ve PFI standartlarında çam+mdf peleti, ayçiçeği kabuğu peleti ve kavak+kozalak peletin çapı uygun değildir. Çalışmada kullanılan biyopelet uzunlukları 10-34 mm arasında değişmektedir. Çam peleti ve kavak+kozalak peletin uzunluğu pelet uzunluğu aralığı 10-30 mm olduğu için ITEBE ve PFI standartlarının üstünde olduğu için bu standartları sağlamamaktadır. Çam+mdf peletin uzunluğu, PFI standart pelet uzunluğunun üzerindedir. Bunların dışında kalan diğer biyopeletlerin uzunluğu, tüm standartlara uygundur.

Biyopelet yoğunluğu nakliye masraflarını, taşıma ve depolama etkinliğini etkilemektedir. Daha yoğun elde edilen biyopeletler nakliye masraflarını azaltmakta, taşıma ve depolama etkinliğini artırmaktadır. Avrupa Pelet Konseyi tarafından biyopelet kalitesi ile ilgili standartlarda yoğunluk olarak sadece hacim yoğunluğu dikkate alınmaktadır. Çalışmamızda kullanılan biyopeletlerin parça yoğunluğu 970-1270 kg m⁻³ arasında değiştiği belirlenmiştir. En düşük parça yoğunluğu kavak+kozalak peletine en yüksek yoğunluk ise fındık kabuğu peletine aittir. EN, CAN biyopelet standartlarında pelet hacim yoğunluğu 600-750 kg m⁻³, PFI pelet standardında biyopelet parça yoğunluğu 608-768 kg m⁻³ olduğu için çalışmada kullanılan tüm biyopelet yoğunlukları bu standartların üzerindedir. ONORM M 7135 ve DINplus standardında biyopelet yoğunlukları

diğer standartlardan daha yüksek olup >1.120 ve DIN 51731 için 1.000-1.400 kg m⁻³ olarak belirtilmiştir. Ayçiçeği kabuğu peleti ve kavak+kozalak peletin yoğunlukları bu standartların altındadır.

Buğday samanı, arpa samanı, mısır peletlerinin yoğunluğu 850-1250 kg m⁻³, sarıçam, kayın, ladin talaşı biyopeletlerinin parça yoğunluğu 1270 kg m⁻³, fındık zurufu peletlerinin parça yoğunluğu 1307 kg m⁻³ bulunmuştur (Bilgin ve ark. 2016). Biyopelet parça yoğunluğu için elde edilen sonuçlar standartlara uygun bulunmuştur.

Yakıtların genel özelliklerinin belirlenmesinde kısa analiz önemlidir. Kısa analiz kapsamında nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon miktarı hesaplanmaktadır. Ancak uluslararası standartların hepsinde uçucu madde ve sabit karbon miktarı olmadığından karşılaştırma yapılması açısından Çizelge 1'de nem ve kül içeriğine yer verilmiştir.

Nem içeriği, biyopelet kalitesini belirleyen en önemli özelliklerden biridir. Ateşleme hızı, duman oluşumu, depolama ve taşıma maliyetlerini etkiler. Düşük nem içeriği biyopelet ateşlemesini kolaylaştırır ve depolama ömrünü uzatır. Yüksek nem içeriği, depolama sırasında küf oluşumuna neden olur (Bantacut ve ark. 2013). Nem tayini sonucunda biyopelet numunelerinde nem miktarı, %6.06-17.22 arasında değişmektedir. En düşük nem miktarı, Çam+MDF peletine aittir. Daha sonra en az nem miktarı %7.02 ile kavak+kozalak peleti ve %7.08 ile odunsu atık peletine aittir. En yüksek nem miktarı fındık küspesi peletine aittir. İzin verilen en düşük nem miktarı PFI süper premium'a ait olup, %6 altındadır. Pelet numunelerinde bu nem değerini sağlayan örnek yoktur. İzin verilen en yüksek nem miktarı %15 ile ITEBE standardına aittir. Standartlarda nem miktarı %6-15

arasında değişmekte olup, genelde birçok standartta nem miktarı %10 olarak belirlenmiştir. Fındık küspesi peleti haricinde tüm pellet numunelerindeki nem miktarı %10'nun altındadır. Yapılan başka bir çalışmada fındık zürüfünden elde edilen pelet nem içeriği % 10.4 bulunmuş ve bu değer fındık küspesinden elde ettiğimiz peletin nem içeriğinin çok daha azdır (Bilgin ve ark. 2015). Nem içeriği, geleneksel katı yakıtlar olan odun için %10-50 ve kömür için ise %10-15 aralığında değişmektedir (Topkoç ve Yıldız 2021). Çalışmada kullanılan FKP dışındaki tüm biyopeletlerin nem içeriği kömürden ve odundan daha düşük olduğu görülmektedir.

Kül miktarı, biyopelet üretiminin derecelendirilmesinde önemli bir parametredir. Kül, fosfatlar, klorürler, sülfatlar gibi anyonlar ve sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, demir ve manganez gibi diğer halojenürler ve katyonlar içeren oksitler ve tuzlardan oluşur (Bantacut ve ark. 2013, Munawar ve Subiyanto 2014). Kül tayini sonucunda pelet numunelerinde kül miktarı, %0.54-18.47 arasında değişmektedir. Antrasit cinsi kömürde kül içeriği %4-15 aralığında ve alt bitümlü kömürde kül miktarı %3-10 aralığında değişmekte olup, çalışmada kullanılan SAP haricindeki tüm biyopeletlerin kül miktarı daha azdır (Erik 2022). En düşük kül miktarı, odunsu atık peletine ve Kavak+Kozalak Peleti'ne aittir. En yüksek kül miktarının sera atıkları ve çam peletine ait olduğu belirlenmiştir. En düşük kül miktarı ONORM M 7135 ve PFI süper premium'a ait olup, limit %0.5 dir. En yüksek kül miktarı %6 ile ITEBE ve PFI Utility standartlarına aittir. Buna göre odunsu atık peleti tüm standartlardaki kül miktarına uygun iken sera atıklarındaki kül miktarı tüm standartların üzerindedir. Çam peleti, fındık küspesi peleti ve ayçiçek kabuğu peleti sadece ITEBE ve PFI Utility standartlarına uygun kül içermektedir. Yüksek kaliteli pelette kül oranı düşük olmalı ve %1-2'yi geçmemelidir. Pelet yapılmadan yakılan ağaçlarda ise %6 ile %10 arasında değişmektedir. Biyokütle peletlerinin kül içeriği ısı değerini etkiler. Hammaddenin kül içeriği ne kadar yüksek olursa, kalori değeri o kadar düşük olur. Düşük kül oranı sayesinde yakma sisteminin verimi artar ve işletme maliyetleri azalır (Munawar ve Subiyanto 2014).

Mısır koçanının, ayçiçek sapının, badem kabuğunun, pamuk sapının, yer fıstığı kabuğunun, arpa samanının,

pirinç samanının, tütün tozunun ve pirinç kabuğu gibi birçok tarımsal atığın ısı değeri 4.3-9.4 MJ kg⁻¹ arasında değişmektedir. Biyopelet standartlarında biyopeletlerin üst ısı değeri 16.5 MJ kg⁻¹ ve üzerinde olması istenmektedir. Sera atıkları peleti haricinde diğer tüm biyopeletler standartlardaki ısı değeri karşılamaktadır. Avrupa standartlarına göre, materyalin yakıt olarak değerlendirilebilmesi için ısı değerinin 15.5 MJ kg⁻¹ ve üzerinde olması gerektiğinden sera atıkları peleti yakıt olarak değerlendirilebilir. En yüksek ısı değere 19.836 MJ kg⁻¹ Kavak+Kozalak Peleti ve daha sonra 19.681 MJ kg⁻¹ ısı değerle odunsu atık pelet sahiptir. Buna göre tarımsal atıkların biyopelet haline getirilmesi ile ısı değeri artmaktadır. Fındık kabuğu, 18.233 MJ kg⁻¹, kavak odunundan elde edilen peletler 18.891 MJ kg⁻¹ ve kavak odun tozundan elde edilen peletler 19.23 MJ kg⁻¹ ısı değerine sahip olduğu bulunmuştur (Tumturay 2020, Zengin ve ark. 2020). Çalışmamızda kullandığımız fındık küspesi biyopeletinin ısı değeri fındık kabuğunun ısı değeri arasında önemli bir fark yoktur. Kavak+kozalak peletinin ısı değeri kavak odunu ve kavak odun tozu peletlerinden daha yüksek bulunmuştur. Ham odunun ısı değeri 17.71-22.35 MJ kg⁻¹ aralığında değişmektedir (Er 2022). Yumuşak ağaçların ısı değerleri 19-20 MJ kg⁻¹, sert ağaçların ısı değerleri ise 14-19 MJ kg⁻¹ aralığındadır (Türkoğlu ve Gökoğlu 2017). Çalışmada kullanılan OAP, AKP ve KKP peletlerin ısı değeri yumuşak ağaçların ısı değer aralığında olup, diğer peletler yumuşak ağaçların ısı değer aralığındadır. Ülkemizde, oldukça sınırlı doğal gaz ve petrol rezervlerine karşın, 16 milyar ton linyit rezervi ile Dünya linyit üretiminin yaklaşık olarak %8'i Türkiye'de yapılmaktadır. Zengin rezervlere karşın linyit kömürünün ısı veriminin düşük, yüksek kül ve kükürt içeriği sahip bir yakıttır (Turumtay 2020). Ülkemizdeki linyit/alt bitümlü kömürün ısı değerleri 4.184-20.92 MJ kg⁻¹ arasında değişmektedir. Ülkemizdeki toplam linyit/alt bitümlü kömür rezervinin yaklaşık %68'i düşük kalorili olup %23.5'i 8.368-12.552 MJ kg⁻¹ arasında, %5.1'i 12.552-16.736 MJ kg⁻¹ arasında, %3.4'ü 16.736 MJ kg⁻¹ üzerinde ısı değerdedir. Çalışmada kullanılan sera atıkları peleti haricinde biyopeletlerin hepsinin ısı değeri yerli linyitlerin ısı değerinden daha yüksektir (Aydemir 2017). Avrupa Pelet Konseyi pelet standartları ENplus-A1, Enplus-A2 ve EN-B standartlarda peletlerin ısı değeri 16-19 MJ kg⁻¹ arasında olması istenmektedir (Aydemir 2017).

Avrupa Pelet Konseyi tarafından belirlenen standartlarına göre çalışma da kullanılan peletlerden SAP ısı değeri standardın altında, OAP, AKP ve KKP ise standardın üzerinde olduğundan ısı değeri açısından uygun olmadığı görülmüştür.

Kısa analiz sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek kül miktarı ve en düşük ısı değeri sahip olduğundan sera atıkları peleti standartları karşılamamaktadır. Odunsu atık peleti tüm standartlara uygun bir biyopelettir. Çam+MDF peleti de düşük nem ve kül içeriği ile yüksek ısı değeri ile birçok standarda uygun bir biyopelettir.

Kükürt ve azot çevre açısından en büyük kirleticilerden biridir. Ayrıca kükürt yanma odası, kazan ve borularda korozyon bir etkiye sahiptir. Azot miktarı standartlarda en az %0.3 en fazla %1 olarak verilmiştir. Genel olarak azot miktarı birçok standartta %0.3 olarak verilmiştir. Odunsu atık peleti ve çam peletinin azot ve kükürt miktarı ile kavak+kozalak peletinin kükürt miktarı limitinin altında olduğu için tespit edilememiştir. Sera atıkları peleti, çam+mdf peleti, fındık küspesi peleti kükürt miktarları standartların üzerindedir. Kükürt miktarı standartlarda $\geq 0.03-0.08$ aralığındadır. Odunsu atık peleti, çam peleti, çam+mdf peleti ve kavak+kozalak peleti standartlardaki azot değerine uygundur. Azot miktarı açısından ayçiçeği kabuğu peleti ve fındık küspesi peleti standartlara uymamaktadır. Fındık küspesi peleti hem azot hem de kükürt değerleri standartlara uymamaktadır. Odunsu atık peleti, çam peleti ve kavak+kozalak peleti azot ve kükürt değerleri tüm standartları karşılamaktadır. Biyopeletlerin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları dikkate alındığında odunsu atık peleti ve kavak+kozalak peleti standartlara uygun pelet çeşitleridir.

SONUÇLAR

Odunsu atık ve kavak+kozalak peletlerinin, nem, kül ve ısı değeri ile N ve S elementel analiz sonuçları değerlendirildiğinde standart limit değerleri içerisinde olduğu görülmüştür. Odunsu atık peleti, PFI süper premium, ONORM M 7135 ve DINplus dışındaki diğer standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. Odunsu atık peleti PFI premium kategorisinde, Kavak+Kozalak peleti PFI standart kategorisinde ve Çam peleti PFI utility standartları kategorisinde yer alabilecek biyopelet

türleridir. En fazla kül içeriğine sera atıkları peleti, en fazla nem içeriğine fındık küspesi peleti, en yüksek ısı değeri ise Kavak+Kozalak peleti sahip olduğu belirlenmiştir. En fazla azotu Çam+MDF peleti ve en fazla kükürtü sera atıkları peleti içermektedir. Sera atıkları peleti, fındık küspesi peleti, ayçiçeği kabuğu peleti ve Çam+MDF peleti standartlara uygun olmayan analiz sonuçları içermektedir. Bu biyopeletlerin özellikle kül ve azot içerikleri standartlarda belirtilen limit değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu çalışma da kullanılan biyopeletlerin sahip olduğu ısı değerleri ve nem içerikleri bakımından katı yakıtla çalışan yakma sistemlerinde alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Türkiye de özellikle tarım ve ormancılık faaliyetleri en önde gelen Mersin ilinde zirai atıklardan elde edilen biyopeletlerin, geleneksel katı yakıtlar arasında yer alan odun ve kömür gibi yakıtlara ekonomik ve ekolojik açıdan alternatif olarak kullanımı önemlidir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışma Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütülen "Çeşitli tarımsal atıklardan elde edilen biyopeletlerin bazı yakıt özelliklerinin değerlendirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aktaş T (2022) Türkiye'de imal edilen odun pelet örneklerinin kalite özelliklerinin ve standartlara uygunluğunun belirlenmesi. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 8(1): 25-40.
- Amirta R (2018) Pellet Kayu Energi Hijau Masa Depan, EHM Depan, Mulawarman University Press.
- Anonim (2008) PFI Standard Specification for Residential/Commercial Densified Fuel 1.
- Anonim (2017) APEC Energy Working Group/Expert Group on New and Renewable Energy Technologies, Heating Applications of Bio-pellet to Enhance Utilization of Renewable Energy in the APEC Region. APEC Project No. EWG 18/2016A.
- ASTM D 1102-84 (2013) Standard Test Method for Ash in Wood. ASTM International: West Conshohocken, PA.
- ASTM D 5865-13 (2013) Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International: West Conshohocken, PA.
- ASTM E 871-82 (2013) Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International: West Conshohocken, PA.

- Aydemir T (2017) Farklı tarımsal artıklar kullanılarak hazırlanan karışım peletlerinde kenevir sapı kullanımının pelet kalite özellikleri üzerine etkisi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Bantacut T, Hendra D, Nurwigha R (2013) Mutu Biopellet Dari Campuran Arang Dan Sabut Cangkang Sawit. Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 23 (1):1-12.
- Bilgin S, Koçer A, Yılmaz H, Acar M, Dok M (2016) Çay fabrikası atıklarının peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. JAFAG 33:70-80.
- Bilgin S, Yılmaz H, Koçer A, Acar M, Dok M (2015) Fındık zurufunun peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. Tarım Makinaları Bilim Dergisi, 11: 265-273.
- Cahyono AA, Amri I, Bahruddin A (2022) Upgrading characteristics of empty fruit bunch biopellet with addition of bintaro fruit as co-firing. Journal of the Bioprocess, Chemical, and Environmental Engineering Science, 1:1-8.
- Er A (2022) Biyoyakıt kaynağı olarak pelet yapımı. Sakarya Ticaret Borsası. <https://www.stb.org.tr/Arastirmalar/pelletbiomass>.
- Erik NY (2022) Kömür özelliklerinin temiz kömür teknolojilerine (gazlaştırma, sıvılaştırma, karbon elyaf ve kok üretimi) etkisi: derleme. Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4(2): 22-56.
- Garcia R, Gil MV, Rubiera F, Pevida C (2019) Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. Fuel, 251:739–753
- Gürdil GAK, Baz YÖ, Demirel Ç, Demirel B (2015) Yakıt peleti ve briketi için güncellenmiş avrupa birliği standartları ve ilgili parametreler. U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, 29(2): 147-156.
- Karaca NK (2021) Türkiye pelet yakıtı sektörünün mevcut durumu ve gelecek öngörüler: bir anket çalışması. ODTÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Küsek G, Güngör C, Öztürk HH, Akdemir Ş (2015) Tarımsal artıklardan biyopelet üretimi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 29 (2):137-145.
- Miranda T, Montero I, Sepúlveda FJ, Arranz JJ, Rojas CV, Nogales S (2015) A review of pellets from different sources. Materials 8:1413-1427.
- Munawar SS, Subiyanto B (2014) Characterization of biomass pellet made from solid waste oil palm industry. Procedia Environmental Sciences, 20:336-341.
- Pradhan P, Arora A, Mahajani SM (2018a) Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. Energy for Sustainable Development, 43:1-14.
- Pradhan P, Arora A, Mahajani SM, Arora A (2018b) Production and utilization of fuel pellets from biomass: a review. Fuel Processing Technology, 181:215-232.
- Sümer SK, Kavdır Y, Çiçek G (2016) Türkiye’de tarımsal ve hayvansal atıklardan biyokömür üretim potansiyelinin belirlenmesi. KSÜ Doğa Bil. Dergisi, 19(4):379-387.
- Thran D, Peetz D, Schaubach K (2017) Global wood pellet industry and trade study.
- Topkoc E, Yıldız Z (2021) Tarımsal atıkların katı yakıt olarak değerlendirilmesi. 5. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Mersin.
- Tumturay H (2020) Çay budama atık biyokütlesinin linyit kömür ile karıştırılarak beraber yanma potansiyelinin araştırılması. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 21 (2): 135-142.
- Türkoğlu T, Gökoğlu C (2017) Kızılçam ormanları hasat artıklarından yapılan odun peletinin yakıt özelliklerinin belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (1): 58-63.
- Zengin Y, Çelik AE, Dok M, Çolak S (2020) Kavak odun atıklarından elde edilen peletlerin bazı yakıt özelliklerinin belirlenmesi. AÇÜ Orman Fak Dergisi, 21(1):29-36.