

## Endüstriyel Çay Atığı Biyokütlesinden Türetilen Karbonize Materyalin Elektriksel İletken Mürekkep Dolgu Maddesi Olarak İncelenmesi

**\*Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 19.03.2024

Kabul/Accepted: 16.10.2024

Yayımlandı/Published: 11.04.2025

### Industrial Tea Waste Biomass Derived Carbonaceous Material as Filler in Electrical Conductive Ink

Gökçen AKGÜL\* 

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 53100, Rize, Türkiye



© Afyon Kocatepe Üniversitesi

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

#### Öz

Yazdırılabilir elektrik/elektronik aygıtların geliştirilmesinde; iletken polimerler, elektriksel iletken karbon materyaller ve bunların hibritleri güncel araştırma konularındandır. Yüksek performans karbon malzemeler ile elektriksel iletken mürekkep hazırlanması ve bu mürekkebin çeşitli yazdırma yöntemleri kullanılarak esnek ve yazdırılabilir teknolojik elektrik/elektronik aygıtların geliştirilmesi mümkündür. Diğer yandan teknolojik uygulamalarda yüksek performans karbon malzemelerin elektronik alanında kullanımının yaygınlaşmasında bazı sınırlamaları vardır; yığın üretimlerinin pahalı olması, üretimleri için fosil kaynakların kullanımı gibi. Alternatif, temiz, yenilenebilir, sürdürülebilir ve ekonomik karbon kaynaklarına ve bunların teknolojik cihazlarda uygulanabilir olarak geliştirilmesine gereksinim vardır. Biyokütle, yenilenebilir, sürdürülebilir ve ekonomik tek karbon kaynağıdır. Bu çalışmada çay üretimi yapılan fabrikalarda ortaya çıkan çay atıkları biyokütlesinden geliştirilmiş olan karbonize materyalin iletken mürekkep hazırlanmasında dolgu materyali olarak kullanılıp kullanılamayacağı incelenmiştir. Çay atıkları biyokütlesinin katalitik pirolizi ile türetilen karbonize materyalin kullanılması ile hazırlanan mürekkebin 3,58 S/cm elektriksel iletkenlik değeri gösterdiği belirlenmiştir. Grafit ile hazırlanan mürekkebe göre (13 S/cm) düşük bir elektriksel iletkenlik değeri olsa da çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbonize materyalin elektriksel iletken karbon mürekkep geliştirilmesine doğru dolgu materyali olarak kullanılması potansiyeli olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler** Çay atığı, Karbonizasyon, PEDOT:PSS, elektriksel iletken mürekkep.

#### Abstract

In the development of printable electrical and electronic devices, conductive polymers, electrically conductive carbon materials, and their hybrids are current research topics. It is possible to produce electrical conductive ink with high-performance carbon materials and to develop flexible and printable technological electrical and electronic devices using various printing methods of this ink. On the other hand, technological applications have some limitations to the widespread use of high-performance carbon materials in the printable electronics field; mass production is expensive, and fossil resources are used for their production. There is a need to develop alternative, clean, renewable, sustainable, and economical resources for carbon and to make them applicable to technological devices. Biomass is the only source of carbon that is renewable, sustainable, and economical. This study examined whether the carbonized material, which was developed from the tea waste biomass from tea-producing factories, could be used as filler in the preparation of conductive ink. The carbonized material prepared by catalytic pyrolysis of tea waste has been determined to have an electrical conductivity of 3.58 S/cm in ink. Although the electrical conductivity value of this ink is lower than the graphite ink (13 S/cm), it has been found that carbonized material derived from tea waste biomass could have potential as filler for the development of electrically conductive carbon ink.

**Keywords** Tea waste, Carbonization, PEDOT:PSS, Electrical conductive ink.

#### 1. Giriş

Akıllı teknolojik cihazların veya robotların geliştirilmesinde özellikle esnek elektronik aygıtlar önem kazanmaktadır. Son yıllarda bu konularda yapılan çalışmalar, cihazların minyatürize edilmesi, kırılğan olmayan esnek ve hafif cihazların geliştirilmesi, metalik kirlilik yaratmayacak çevreci ve ekonomik malzemelerin geliştirilmesi konularında ilerlemektedir (Suganuma, 2014).

Bu tür aygıtların geliştirilmesinde; iletken polimerler, nano boyutlu ve elektriksel iletken karbon materyaller (grafen, karbon nanotüp vb.) ve bunların hibritleri en çok araştırılan malzemelerdendir (Zhou vd., 2021). Özellikle karbon nanotüp gibi materyaller; modifiye edilebilmeleri, yüksek kristalinite, elektronik-optik-mekanik ve termal uygunluk, yüksek yüzey alanı, düşük yoğunluk gibi özellikleri ile sensörler, optoelektronikler, elektrotlar, akım toplayıcılar, işlemciler, termistörler, diyotlar,

transistörler gibi çok sayıda elektrik/elektronik cihazların uygulamalarında kullanılabilmektedir (Javey ve Dai 2006; Marianovic vd., 2017). Chen vd. (2018) “multi-wall” karbon nanotüp/balmumu waksı iletken kompozitinin elektrik devresinde kullanılabılır olduğunu, herhangi bir katlama veya bükülmede bu iletkenliğin kesintisiz sürdürülebileceğini göstermiştir. Ahammed ve Susila (2022), karbon nanotüp ve polivinil alkol kompozitinin 3D yazma metodu ile elektronik devrede filament olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Dou vd. (2020), karbon nanotüpün de katkısı ile esnek ve giyilebilir elektronik devrelerin geliştirilebileceğini deneysel olarak ortaya koymuştur.

Elektriksel iletken karbon materyaller genellikle fosil kökenli kaynaklardan üretilir. Hidrokarbonların kısmi yakılması, kimyasal buhar biriktirme, iyonik sıvılar ile hidrotermal/solvotermal muamele, mikrodalga irradyasyonu, epitaksiyel büyüme, sonokimyasal yöntem, sıvı faz eksfoliasyonu, piroliz vb. (Javey ve Dai, 2006) gibi metotlar fosil kaynaklardan yüksek performans karbon malzeme üretilmesi için kullanılan metotlardır.

Teknolojik elektrik/elektronik cihazların bu yüksek performans karbon malzemeler kullanılarak üretilmesinde ise farklı yöntemler kullanılabılır. Örneğin kimyasal buhar biriktirme veya epitaksiyel büyüme gibi metotlarla bir altlık üzerinde yüksek performans karbon malzeme biriktirilmesi ile direkt olarak elektrik/elektronik cihaz geliştirilebilir. Diğer yandan karbon malzemeler ile elektriksel iletken mürekkep hazırlanması ve bu mürekkebin çeşitli yazdırma yöntemleri kullanılarak esnek ve yazdırılabilir teknolojik elektrik/elektronik aygıtlar geliştirilmesi mümkündür (Qin vd. 2023).

Tüm bu olumlu taraflarına rağmen yüksek performans karbon malzemelerin elektronik alanında kullanımının yaygınlaşmasında bazı sınırlamaları vardır. Örneğin materyallerin üretimi sırasında oluşan elektronik kusurlar, elektronik özellikleri kontrol eden kristal ve yapısal düzenlemelerin istenilen düzeyde gerçekleştirilememesi (yapı-özellik korrelasyonu), yığın (mass) üretimlerinin zor ve pahalı olması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Ayrıca bu karbonlara kaynak olan fosil yakıtların da giderek tükendiği ve bunların kullanımının iklim değişikliğine olan negatif etkileri de göz önüne alındığında alternatif, temiz, yenilenebilir, sürdürülebilir ve ekonomik karbon kaynaklarına ve bunların teknolojik cihazlarda uygulanabilir olarak geliştirilmesine gereksinim vardır.

Biyokütle, yenilenebilir, sürdürülebilir ve ekonomik tek karbon kaynağıdır. Biyokütleden yüksek performans karbonların türetilebileceği literatürde gösterilmiştir (Bukhari vd., 2021; Deng vd., 2016; Osman vd., 2020;

Quyang vd., 2021). Mugadza vd. (2020), biyokütlenin içerisindeki düzenli polimerik selüloz içeriğini karbon nanotüpe dönüştürmüştür. Destroyini vd. (2021) hindistan cevizi kabuğu atıklarından katalitik piroliz ile nano boyutlarda karbon geliştirmiştir. Prekodravac vd. (2021), elektrokimyasal eksfoliasyon metodu ile biyo atıkların grafene dönüştürülebileceğini raporlamıştır ve grafen benzeri nano materyallerin doğal biyokaynaklardan geliştirilmesinin gelecekte potansiyel uygulamalar arasında olduğunu belirtmiştir. Dong vd. (2018) basit bir yöntemle, değişik sıcaklıklarda inert atmosferde piroliz ettikleri şeker kamışı küspesini öğütüp nano boyutlu iletken karbonu ayırmışlardır. Wang vd. (2019) buğday samanından kontrollü karbonizasyon ile iletken süper hidrofobik grafen benzeri karbon oluşturmuştur.

Bu çalışmada çay üretimi sırasında fabrikalarda ortaya çıkan çay atıkları biyokütlesinden önceki çalışmalarımızda geliştirilmiş olan karbonize materyalin “filler”(dolgu) olarak elektriksel iletken mürekkep hazırlanmasında kullanılıp kullanılamayacağı incelenmiştir. Doğu Karadeniz bölgesinde 2023 yılında toplamda 1355 bin ton’un üzerinde yaş çay işlenmiştir (Rize Ticaret Borsası Çay Sektörü Raporları, 2024, <https://www.rtb.org.tr/tr/cay-sektoru-raporlari>). Çay işleme sonucu %3-5 oranında çay atığı ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar işletmeler için halen bir sorun oluşturmakta, hali hazırda genellikle yakılarak (ısı değeri düşüktür, 17 MJ/kg) veya çevreye atılarak bertaraf edilmektedir. Bu yöntemler de hem bir enerji kaynağının yok edilmesine hem de çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu çalışmada, atıl durumdaki ve işletmeler için sorun olan bu yenilenebilir, sürdürülebilir çay atıkları biyokütle kaynağından türetilen karbonize materyalin, ucuz ve teknolojik uygulamaya yönelik elektriksel iletken mürekkep dolgusu olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

Yerel bir çay üretim fabrikasında ortaya çıkan çay atıkları biyokütlesinden karbonize materyal geliştirilmesi, önceki çalışmamızda raporlanan metotlarla gerçekleştirilmiştir (Karamustafa vd., 2022). Özetle, çay atıkları biyokütlesi öğütülerek 0,5 mm elekten elenmiştir. 80 °C’de 24 saat kurutulan çay atıkları, iki farklı grafitizasyon ajanı olarak FeCl<sub>3</sub> ve H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ile (ağırlıkça 2:1 çay atığı:FeCl<sub>3</sub> veya H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, çözgen olarak su kullanılmıştır) 850 °C’de inert N<sub>2</sub> atmosferinde (1 L/min), 10 °C/min ısıtma hızında, 1 saat süre ile fırında (Protherm RTR 11/100/500) katalitik olarak piroliz edilmiştir. Türetilen karbonize numuneler BC-Fe ve BC-B olarak adlandırılmıştır (BC; biyo karbon).

Karbonize materyalden mineral içeriğinin uzaklaştırılması için numuneler, sırası ile 6M HCl ve 6M HF ile yıkanmış ve

su ile nötrale edilmiştir. Asit yıkaması mineral içeriğini % 3'e kadar düşürülebilmektedir. Kuru numuneler; BC-Fe-Y ve BC-B-Y olarak adlandırılmıştır (Y; yıkanmış). Ayrıca BC-Fe-Y numunesi KOH ile aktive edilerek yüzey alanının artması sağlanmıştır. Bunun için ağırlıkça 1:2 oranında KOH (BC-Fe-Y:KOH, çözen olarak su kullanılmıştır), BC-Fe-Y numunesine impregne edilmiş, numune 85 °C'de kurutulmuş ve 850 °C'de 35 °C/min ısıtma hızında N<sub>2</sub> inert atmosferinde ikinci kez piroliz edilmiştir. Aktive edilmiş numune seyreltik HCl ile yıkanarak nötrale edilmiş ve kurutulmuştur (BC-Fe-Y-KOH2, Burada "2", KOH oranını göstermektedir). Piroliz ile çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbonize numuneler olan BC-Fe, BC-Fe-Y, BC-B-Y ve BC-Fe-Y-KOH2 ve bir de ticari toz grafit (SMB Teknik) numunesi, iletken mürekkep dolgu maddesi olarak incelenmişlerdir.

Ticari elektriksel iletken karbon mürekkepler, genel olarak iletken karbon partiküllerin; çözen, stabilizör ve bağlayıcı polimer gibi maddelerden oluşan karışım içerisinde disperse edilmesi ile hazırlanır. Bu çalışmada türetilen karbonize materyaller ve grafit, elektriksel iletken bağlayıcı polimer olan poli(3,4-etilendioksitiyofen) polistiren sülfonat (PEDOT:PSS (1:6 w/w), LT-PS001, LumTec, %1,3-1,7, direnç 500-5000 Ωcm) ile karıştırılarak mürekkep numuneleri hazırlanmıştır. Bunun için ~0,01 g karbon numune, ependorf tüpe alınmıştır. Üzerine 100µL PEDOT:PSS eklenerek sonik su banyosunda 5 dk karışması sağlanmıştır. Hazırlanan mürekkepler, bir fırça (Pebeo çizgi fırçası no 0) yardımı ile kâğıt altlık (60 g/m<sup>2</sup>, 100 µm) üzerine sürülmüştür ve etüvde 60 °C'de 2 saat süreyle kurutulmuştur. Mürekkep alanı yaklaşık olarak 2 cm × 0,2

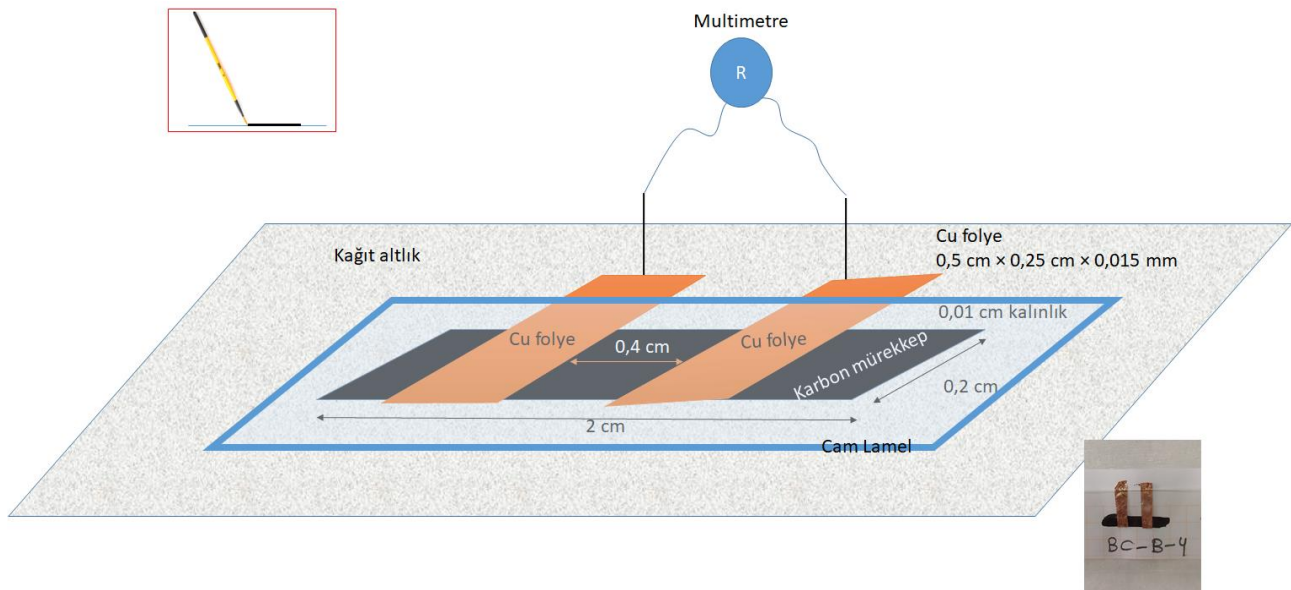
cm' dir. Kâğıt altlık üzerinde kuruyan mürekkeplerin ortalama kalınlıkları bir kumpas ile ~0,01 cm olarak ölçülmüştür. Kâğıt altlık üzerine yerleştirilmiş mürekkep numunelerinin dirençleri bir multimetre (TT T-ECHNI-C VC97) yardımı ile IEC Standard 93 (VDE 0303, Part 30) metoduna göre Şekil 1'de gösterilen düzenek ile belirlenmiştir (Gomez vd. 2016). Cam bir lamel üzerine yaklaşık 0,4 cm aralıkta 0,5 cm × 0,25 cm × 0,015 mm boyutlarında iki adet bakır folye bir yapıştırıcı yardımı ile yapıştırılmıştır. Kâğıt üzerindeki sürülmüş karbon içeren mürekkep, bakır folye ile temas edecek şekilde, lamel bu kısmın üzerine yerleştirilmiştir. Düzenğin üzerine yaklaşık 3 kg'lık bir ağırlık konularak düzenek sabitlenmiştir. Bakır folyenin karbon numunenin dışına taşan kısımları multimetre kontakt noktaları olarak kullanılmış ve multimetre ile dirençler ( $\rho$ ) belirlenmiştir. Elektriksel iletkenlikler ( $1/\rho$ ) ise Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır;

$$\rho = R \frac{d \times a}{b} \quad (1)$$

burada  $\rho$ ; direnç (Ωcm),  $R$ ; multimetrede okunan direnç (Ω),  $d$ ; karbon film kalınlığı (0,01 cm),  $a$ ; bakır kontaktın karbon numune üzerindeki uzunluğu (0,2 cm),  $b$ ; ise bakır kontaktlar arasındaki mesafedir (0,4 cm).

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbon numuneler ve karşılaştırma materyali olarak grafit kullanılarak PEDOT:PSS iletken polimeri ile hazırlanan ve kâğıt altlık üzerine çizgi fırçası ile sürülen numunelerin multimetre ile ölçülen direnç ve hesaplanan iletkenlik değerleri ( $1/\rho$ ) Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin dirençlerinin belirlenmesi için hazırlanan düzenek.

**Tablo 1.** Mürekkep olarak sürülen numunelerin direnç ve iletkenlik değerleri

| Numune                 | $R(k\Omega)$     | $\rho(\Omega cm)$ | $1/\rho(S/cm)$ |
|------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Kağıt                  | -                | -                 | -              |
| Pedot:PSS              | -                | -                 | -              |
| Grafit mürekkebi       | 15               | 0,08              | 13,00          |
| BC-Fe mürekkebi        | $25 \times 10^3$ | 125               | 0,01           |
| BC-Fe-Y mürekkebi      | 56               | 0,28              | 3,58           |
| BC-Fe-Y-KOH2 mürekkebi | $3 \times 10^3$  | 15                | 0,07           |
| BC-B-Y mürekkebi       | $2 \times 10^3$  | 10                | 0,10           |

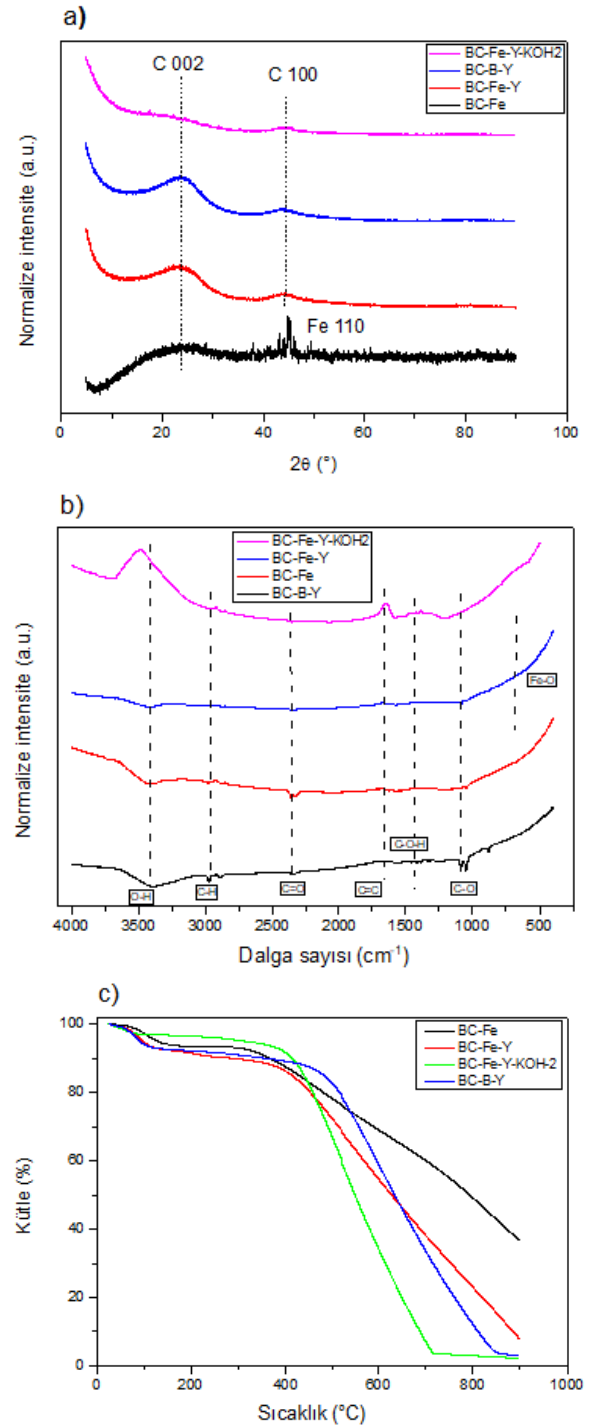
Kağıt altlık yalıtkan olarak dikkate alınmıştır. Karbon dolgu maddesi olmayan PEDOT:PSS iletken polimerinin çizgi fırçası ile kağıt üzerine çizilmiş hali, “mavi suluboya” gibidir ve kağıt üzerinde multimetrik bir iletkenlik ölçülebilecek formda değildir. Karbonun PEDOT:PSS iletken polimerde dolgu maddesi olarak kullanılması, yazdırılabilirliğin yanı sıra iletkenlik uygulamaları için özelliklerin maksimize edilmesini de sağlar.

PEDOT:PSS iletken polimeri ile dolgu maddesi olarak çay atığı biyokütlesinden türetilen karbonize materyaller ve karşılaştırma için grafit karbonu kullanılarak hazırlanan mürekkeplerin kağıt altlık üzerine çizgi fırçası ile sürülmüş düzeneklerinin ölçülen dirençleri; BC-Fe > BC-Fe-Y-KOH2 > BC-B-Y > BC-Fe-Y > Grafit şeklindedir. Dolayısıyla mürekkeplerin iletkenlikleri de tersi sıradadır; BC-Fe < BC-Fe-Y-KOH2 < BC-B-Y < BC-Fe-Y < Grafit. Elektriksel iletkenliği en yüksek çizilmiş mürekkep, biyokütleden türetilen karbonize materyale göre çok daha fazla düzenli kristal yapıya sahip grafitin dolgu maddesi olarak kullanıldığı mürekkeptir (13 S/cm). Grafit, bilindiği üzere karbon oranı yüksek düzenli kristal yapıya sahip bir karbon materyaldir. Grafit referans alındığında 3,58 S/cm iletkenliğe sahip BC-Fe-Y karbonize materyalinin kullanıldığı mürekkepteki karbonize materyalin yapısının diğer karbonize materyallere göre yüksek performansa doğru daha fazla geliştiği söylenebilir. Literatürde BC-Fe-Y materyalinden yarı iletken materyallerinin geliştirilebileceği gösterilmiştir (Akgül vd., 2024). Yarı iletkeneye doğru geliştirilebilen materyalin tam iletkenliğe doğru yapısal geliştirilme potansiyeli olacaktır.

Burada BC-Fe-Y mürekkebinin elektriksel iletkenliği, diğer katalitik grafitizasyon ajanı  $H_3BO_3$  ile piroliz edilen ve asit ile yıkanan BC-B-Y karbonize materyali ile hazırlanan mürekkebinin elektriksel iletkenliğine göre daha yüksektir. Bu da  $FeCl_3$  grafitizasyon ajanının yapısal düzenlemede  $H_3BO_3$ 'e göre daha etkili olduğunu gösterebilir.

Çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbonize materyallerin detaylı yapısal karakterizasyonları literatürde bulunabilir (Karamustafa vd. 2022). Ancak

burada da materyallerin XRD, FTIR ve TGA analizleri tekrar Şekil 2’de verilmektedir.

**Şekil 2.** Çay atığı biyokütlesinden türetilen karbonize materyallerin a)XRD, b)FTIR, c)TGA analizleri

Türetilen bu materyaller saf karbon değildir; amorf yapıdadırlar (XRD) ve COOH, CO, OH gibi yüzey fonksiyonel gruplarınca zengindirler (FTIR). Biyokütle genel olarak selüloz, hemiselüloz, lignin, su, ve daha başka diğer içeriklerden (yağ, mineral, protein...) oluşur. Piroliz sırasında ilk olarak nem ve uçucular biyokütleyi terk eder, artan sıcaklıkla biyokütlenin içerdiği selüloz, hemiselüloz ve lignin yapısal değişime ve bozunmaya uğrar. Karbonize materyalde karbon içeriği yükselir, ancak halen yapısal

olarak oksijen ve diğer elementlerin yanında bazı mineralleri de içerir. Katalitik piroliz ile karbon yapıları, katalitik olmayan pirolize göre daha düşük sıcaklıklarda düzenli yapıya doğru gelişir.

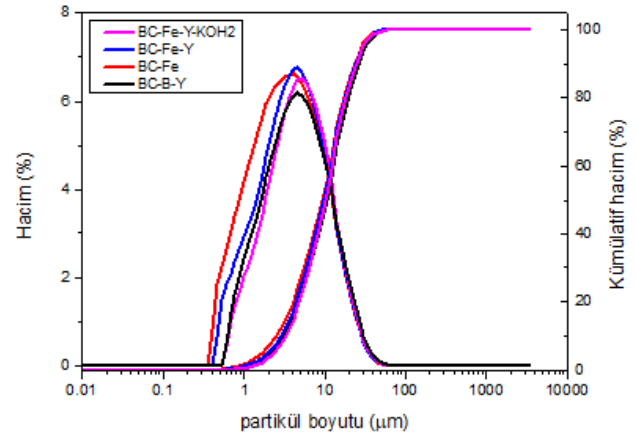
Piroliz ile elde edilen materyalde oksijen içeren gruplar, direnç oluşturmaktadır. Diğer numunelere göre BC-Fe-Y numunesinin direnç oluşturan yüzey fonksiyonel gruplarınca kısmen daha fakir olduğu gözlenmiştir. Bu da BC-Fe-Y mürekkebinin kısmen yüksek iletkenliğini açıklayabilir.

Lignoselülozik bir bitki olarak çay, selüloz, hemiselüloz, lignin, flavanoidler, alkaloidler, ve mineraller gibi bileşenlerden oluşur (Debnath vd., 2021). İçilebilir çay üretimi sonrası fabrikalarda oluşan çay atıklarının içeriği de uygulanan proseslere göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan ve piroliz ile karbonize materyale dönüştürülen fabrika çay atıklarının elemental içeriği %45 C, %6 H, %3 N ve %46 O, %70 uçucular şeklindedir (Akgül vd., 2019). Mineral olarak K, Ca, Mg, P, Fe oksitler gibi içerikler belirlenmiştir. 900 °C'ye kadar hava ortamında yapılan TGA analizleri sonucuna göre mineral içerikleri BC-Fe ve BC-Fe-Y için 36 ve 8%, BC-Fe-Y-KOH ve BC-B-Y için <3% olarak belirlenmiştir. Asit yıkama ile numunelerin mineral içerikleri çoğunlukla uzaklaştırılabilmektedir. BC-Fe numunesinde demir oksitler (FexOy) bulunduğundan (Akgül vd. 2020) BC-Fe mürekkebinin direnci en yüksek, iletkenliği en düşük olmuştur.

Çay atıkları biyokütlesinden türetilen BC-Fe ve BC-Fe-Y, BC-Fe-Y-KOH ve BC-B-Y karbonize materyallerin BET yüzey alanları sırasıyla 67 m<sup>2</sup>/g, 579 m<sup>2</sup>/g, 1317 m<sup>2</sup>/g ve 294 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir (Karamustafa vd., 2022). Burada BC-Fe-Y numunesinin KOH aktivasyonu ile karbonize materyalin yüzey alanı 579 m<sup>2</sup>/g'dan 1317 m<sup>2</sup>/g'a kadar gelişmesine rağmen BC-Fe-Y-KOH mürekkebinin elektriksel iletkenliği BC-Fe-Y mürekkebine göre çok düşük seviyede kalmıştır (0,07 S/cm). Bunun nedeni BC-Fe-Y numunesi içerisindeki düzenli yapıların KOH aktivasyonu ile muhtemel çökmesi olarak açıklanabilir. Hatta KOH ile aktivasyon, materyalin oksidasyonunu artırmış olabilir ki BC-Fe-Y-KOH2 materyali için FTIR analizinde daha güçlü bir OH piki gözlenmiştir.

Şekil 3'de çay atığı biyokütlesinden geliştirilen karbonize materyallerin parçacık boyut dağılımları verilmektedir. Buna göre materyallerin parçacık boyutları 1-100 µm aralığında, hacimce %6-7 kümülatif hacim olarak ise ~%90 orana sahiptirler. Diğer yandan toz grafit ise yüksek oranlarda karbon içerir ve öğütülme metoduna bağlı olarak nanometre boyutlarında homojen parçacık dağılımına sahip olabilir. Grafitteki nanometre boyutlu homojen parçacık dağılımı ve kristal yapı, amorf yapıdaki

biyokütleden geliştirilen karbona göre elektrik iletimini çok daha ileri düzeylerde sağlamaktadır. Bu çalışmada, çay atığı biyokütlesinden geliştirilen karbonize materyallerde bir başlangıç olarak görülen yapısal düzenlenme nano boyutlara doğru parçacıkların gelişmesi ve bu partüküllerin hacminin artırılması ile elektriksel iletken dolgu materyali olarak grafitte doğru bir performans gösterecektir.



Şekil 3. Çay atığı biyokütlesinden türetilen karbonize materyallerin partikül boyut dağılımları

#### 4. Sonuçlar

Yazdırılabilir elektrik/elektronik teknolojisine katkısı olan elektriksel iletken karbon mürekkepler, yüksek performans karbon materyallerin elektriksel iletken polimer içerisinde dispersiyonu ile hazırlanır. Bu amaçla, bu çalışmada yenilenebilir, sürdürülebilir, ekonomik ve çevreci tek karbon kaynağı olan biyokütleden iletken karbon mürekkep hazırlanmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Atıl durumda olan, yakılarak veya çevreye atılarak bertaraf edilmeye çalışılan, bu yolla da yok edilen, yerel ve milli biyokütle enerji kaynağı olan endüstriyel çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbonize materyaller ile iletken mürekkep geliştirilip geliştirilemeyeceği incelenmiştir.

Yapılan çalışmada FeCl<sub>3</sub> grafitizasyon ajanı varlığında çay atıkları biyokütlesinin katalitik pirolizi ile türetilen karbonize materyalin (BC-Fe-Y) kullanılması ile hazırlanan mürekkebin 3,58 S/cm elektriksel iletkenlik değeri gösterdiği belirlenmiştir. Grafit ile hazırlanan mürekkebe (13 S/cm) göre düşük bir elektriksel iletkenlik değeri olsa da çay atıkları biyokütlesinden türetilen karbonize materyalin elektriksel iletken karbon mürekkep geliştirilmesine doğru dolgu materyali olarak kullanılması potansiyeli olduğu görülmüştür.

Daha ileri çalışmalarla bu iletkenlik değeri geliştirilebilir ve yığın olarak elektriksel iletken karbonize materyal ve karbon mürekkepler ve buna dayalı esnek ve yazdırılabilir

teknolojik elektrik/elektronik aygıtlar ekonomik olarak çay atıkları biyokütlesinden geliştirilebilir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu makale 17-18 Ocak 2024 tarihleri arasında Antalya/Türkiye'de düzenlenen "5. Bioenergy Symposium" adlı etkinlikte sözlü bildiri olarak sunulmuştur. Özeti "Development of Electrically Conductive Ink with Carbon Derived from Tea Waste Biomass" başlığıyla konferans özet kitabında yayımlandı. Bu çalışma geliştirilmiş bir versiyonudur.

Bu çalışmada kullanılan karbonize materyaller; Doç. Dr. Gökçen Akgül danışmanlığında Ayşenur Karamustafa tarafından 07/01/2021 tarihinde tamamlanan "Bor katkılı ve biyokütle temelli karbon süperkapasitör enerji depolama malzemelerinin geliştirilmesi" başlıklı yüksek lisans (Tez no: 10376647) çalışmasında geliştirilen materyallerin bir kısmını oluşturmaktadır. Tez ile ilgili sonuçlar (türetilen materyallerin karakterizasyonları ve enerji depolama kapasiteleri), bu çalışma içerisinde de bahsedilen ve referans olarak alınan "Karamustafa vd., 2022" makalesinde verilmiştir. Bu çalışmada, referans makalede belirtilen bir kısım karbonize materyallerin, elektriksel iletken mürekkep dolgu materyali olarak kullanılabilirliği, Doç. Dr. Gökçen Akgül tarafından incelenmiştir.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Bu çalışma tüm kısımları ile yazar Gökçen Akgül tarafından gerçekleştirilmiştir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## 5. Kaynaklar

- Ahammed S. R., Susila, P.A., 2022. Direct writing of electronic circuits using functionalised multi-walled carbon nanotubes and polyvinyl alcohol conductive ink. *Advances in Materials and Processing Technologies*, **8(3)**, 2496-2509. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1913325>
- Akgül, G., Bıçakçı, S.N., 2020. Optical and electrical properties of refined carbon derived from industrial tea waste. *Materials Research Express*, **7 (4)**, 3–12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8995>
- Akgül, G., Maden, T.B., Diaz, E., Moreno Jiménez, E., 2019. Modification of tea biochar with Mg, Fe, Mn and Al salts for efficient sorption of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> and Cd<sup>2+</sup> from aqueous solutions. *Journal of Water Reuse and Desalination*, **09.1**, 57-66. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.018>
- Akgül, G., Tomakin, M. ve Erkaya, H.H., 2024. Semi-conductive carbon from industrial tea waste biomass for a p-n junction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05413-8>
- Bukhari, Q.U.A., Silveri, F., Pelle, F.D., Scroccarello, A., Zappi, D., Cozzoni, E., ve Compagnone, D., 2021. Water-phase exfoliated biochar nanofibers from

eucalyptus scraps for electrode modification and conductive film fabrication. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, **9**, 13988–13998.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05893>

- Chen, T., Yeh, Y., Liao, Y., Yeh, Y., and Liao, Y., 2018. Healable and foldable carbon nanotube/wax conductive composite. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **10**, 24217–24223. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b08310>
- Debnath, B., Haldar, D., Purkait, M.K., 2021. Potential and sustainable utilization of tea waste: A review on present status and future trends. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, 106179. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106179>
- Deng, J., You, Y., Sahajwalla, V., ve Joshi, R.K., 2016. Transforming waste into carbon-based nanomaterials. *Carbon*, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.033>
- Destyorini, F., Irmawati, Y., Hardiansyah, A., Widodo, H., Yahya, I. N. D., Indayaningsih, N., Yudianti, R., Hsu, Y. I., ve Uyama, H., 2021. Formation of nanostructured graphitic carbon from coconut waste via low-temperature catalytic graphitization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **24(2)**, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.06.011>
- Dong, X., He, L., Liu, Y., and Piao, Y., 2018. Preparation of highly conductive biochar nanoparticles for rapid and sensitive detection of 17 $\beta$ -estradiol in water. *Electrochimica Acta*, **292**, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.09.129>
- Dou, J., Tang, L., Mou, L., Zhang, R., Jiang, X., 2020. Stretchable conductive adhesives for connection of electronics in wearable devices based on metal-polymer conductors and carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, **197**, 108237. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108237>
- Gomes, L., Branco, A., Moreira, T., Feliciano, F., Pinheiro, C., and Costa, C., 2016. Increasing the electrical conductivity of electrochromic PEDOT : PSS films – A comparative study. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **144**, 631–640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.001>
- Javey, A. ve Dai, H., 2006. Carbon Nanotube Electronics. 19th International Conference on VLSI Design held jointly with 5th International Conference on Embedded Systems Design (VLSID'06), Hyderabad, India, 6 pp <https://doi.org/10.1109/VLSID.2006.57>
- Karamustafa, A., Sözer, S., Oskay, K.O., Buldu-Akturk, M., Erdem, E., and Akgül, G., 2022. Improving the electrochemical energy storage capacity of the renewable carbon derived from industrial tea waste. *Russian Journal of Electrochemistry*, **58 (9)**, 844–854. <https://doi.org/10.1134/S1023193522090099>

- Marinovic, A., Kiat, L. S., Dunn, S., Titirici, M., ve Briscoe, J., 2017. Carbon-nanodot solar cells from renewable precursors. *ChemSusChem*, **10(5)**, 1004-1013.  
<https://doi.org/10.1002/cssc.201601741>
- Mugadza, K., Stark, A., Ndungu, P.G., Nyamori, V.O., 2020. Synthesis of carbon nanomaterials from biomass utilizing ionic liquids for potential application in solar energy conversion and storage. *Materials*, **13(18)**, 3945.  
<https://doi.org/10.3390/ma13183945>
- Osman, A.I., Farrell, C., Al-Muhtaseb, A.H., Harrison, J. ve Rooney, D.W., 2020. The production and application of carbon nanomaterials from high alkali silicate herbaceous biomass. *Scientific Reports*, **10**, 2563.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59481-7>
- Prekodravac, J.R., Kević, D.P., Colmenares, J.C., Giannakoudakis, D.A., and Jovanović, S.P., 2021. A comprehensive review on selected graphene synthesis methods: from electrochemical exfoliation through rapid thermal annealing towards biomass pyrolysis. *Journal of Materials Chemistry C*, **9 (21)**, 6722–6748.  
<https://doi.org/10.1039/D1TC01316E>
- Qin, Y., Ouyang, X., Lv, Y., Liu, W., Liu, Q., Wang, S., 2023. A review of carbon-based conductive inks and their printing technologies for integrated circuits. *Coatings*, **13**, 1769.  
<https://doi.org/10.3390/coatings13101769>
- Ouyang, D., Hu, L., Wang, G., Dai, B., Yu, F., ve Zhang, L., 2021. A review of biomass-derived graphene and graphene-like carbons for electrochemical energy storage and conversion. *New Carbon Materials*, **36(2)**, 350–372.  
[https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(21\)60024-0](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(21)60024-0)
- Suganuma, K., 2014. Introduction to Printed Electronics. Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering Series, Springer New York, NY  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9625-0>
- Wang, Y., Zhang, D., Deng, J., Zhou, F., Duan, Z., Su, Q., ve Pang, S., 2019. Mosquito ' s compound eyes as inspiration for fabrication of conductive superhydrophobic nanocarbon materials from waste wheat straw. *ACS Sustainable Chemical Engineering*, **7(4)**, 3883–3894.  
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04906>
- Zhou, Z., Zhang, H., Liu, J., Huang, W., 2021. Flexible electronics from intrinsically soft materials. *Giant*, **6**, 100051.  
<https://doi.org/10.1016/j.giant.2021.100051>