



**Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa
Bilimleri Dergisi**
Usak University Journal of Science and Natural Sciences

<http://dergipark.gov.tr/usufedbid>
<https://doi.org/10.47137/usufedbid.1555877>



Derleme Makalesi (Review Article)

Üretim Aşamasında Oluşan Tekstil Atıklarının Değerlendirme Yöntemleri

*Hasan Arıkan, Ayşe Pınar Tüzüm Demir**

Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 64200 Uşak, Türkiye

*Geliş: 25 Eylül 2024
Received: 25 September 2024*

*Revizyon: 22 Ocak 2025
Revised: 22 Ocak 2025*

*Kabul: 7 Mart 2025
Accepted: 7 March 2025*

Özet

Bu çalışmanın, ağırlıklı olarak tekstil atıklarına değer katmak amacıyla tekstil atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalara ışık tutması amaçlanmıştır. Tekstil endüstrisinde giysi üretimi işlemleri aşamalarında büyük miktarda katı atık oluşmaktadır. Bu atık durumundaki malzemelerin geri kazandırılarak değerlendirilmesi, atıkların ve yenilenebilir doğal kaynakların kullanımı açısından ekolojik ve ekonomik faydalar sağlar. Uşak, Türkiye’de tekstil alanında ve geri kazanım sektöründe büyük bir paya sahiptir. Uşak ili tekstil endüstrisinde, üretim sırasında çok büyük miktarlarda oluşan ve geri dönüştürülemeyen toz halindeki ve boyutları iplik eğirmeye elverişli olmayan lif halindeki tekstil atıkları, büyük sorun yaratmaktadır. Bu atıkların çeşitli alanlarda değerlendirilmesi ekonomik ve çevresel açıdan katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, tekstil endüstrisinde üretim aşamasında oluşan tekstil atıklarının, bakteriyel selüloz üretimi, selüloz asetat üretimi ve piroliz gibi yöntemlerle değerlendirilmesine odaklanmıştır. Bu makale, Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşmada olumlu etkisi olan bu alandaki diğer araştırmaları gözden geçirmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Tekstil lifi, geri dönüşüm, bakteriyel selüloz, selüloz asetat üretimi, piroliz.*

Methods for Evaluating Textile Wastes Generated During Production

Abstract

This study aims to shed light on studies on the evaluation of textile wastes as a way to add value to textile wastes. A large amount of solid waste is generated during the garment production processes in the textile industry. Recycling and evaluating these waste materials provides ecological and economic benefits in terms of the use of wastes and renewable natural resources. Uşak has a large share in the textile sector and recycling sector in Turkey. Textile wastes in the textile industry of Uşak province, which are in very large quantities during production and are in the form of dust that cannot be recycled and in the form of fibers that are not suitable for spinning yarn, create a big problem. The evaluation of these wastes in various areas will contribute economically and environmentally. This study focuses on the evaluation of textile wastes generated during the production phase in the textile industry by methods such as bacterial cellulose production, cellulose acetate production, and pyrolysis. This article reviews other research in this field that has a positive impact on achieving the Sustainable Development Goals.

Keywords: *Textile fiber, recycling, bacterial cellulose, cellulose acetate production, pyrolysis.*

©2025 Usak University all rights reserved.

*Corresponding author: Ayşe Pınar TÜZÜM DEMİR

E-mail: arikanhasan@hotmail.com (ORCID ID: 0009-0009-4102-1194)

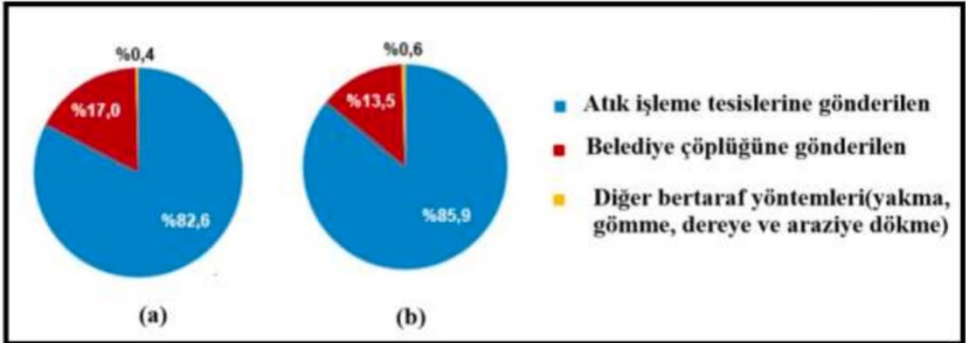
E-mail: pinar.demir@usak.edu.tr (ORCID ID: 0000-0002-0822-5728)

©2025 Usak University all rights reserved.

1. Giriş

Küresel nüfus artışı ve yükselen yaşam standartları, temel ihtiyaçların doğal bir sonucu olarak tekstil taleplerinin artmasına, aynı zamanda da tüketime yol açmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumunun (TÜİK) 2023 yılında yayımlanan verilerinde, dokuma, giyim eşyası ve deri ürünleri imalatına ait sektörel atık istatistiklerine göre bu sektörlerde 2020 ve 2022 yıllarında sırasıyla 642514 ve 824364 ton atık oluştuğu belirtilmiştir. Bu da tüm sektörlerdeki toplam atık miktarının %0,60-0,75'lik kısmını oluşturmaktadır [1]. Tekstil alanında ve geri kazanım sektöründe büyük bir paya sahip olan Uşak ili, %72'lik bir payla Türkiye'deki tekstil geri dönüşümünün merkezi konumundadır. Hızla değişen moda trendleri neticesinde, tekstil endüstrisinin, giysi üretimi için elyaf çıkarma, eğirme (iplik), dokuma (kumaş) ve kesme işlemleri aşamalarında ve tüketici sonrasında büyük miktarda katı atık oluşturan [2], dünyadaki en kirlenici endüstriler arasında yer aldığı bilinmektedir. Avrupa ve Amerika'da yılda yaklaşık 10 milyon ton tekstilin israf edildiği, bunun 7,5 milyon tonunun tüketim öncesi veya endüstriyel atık olduğu tahmin edilmektedir [3].

Tekstil atıkları; doğal, sentetik, organik ve inorganik liflerden oluşur [4]. Pamuk, polyesterden sonra dünyada en çok üretilen ikinci elyaftır. Yün, tekstil alanında en çok kullanılan proteinli doğal liftir [2]. Yünün işlenmesi sırasında ortaya çıkan atıklar, yün yapağının yıkanmasından çıkan yün mumu, taraklama ve tarama işlemi sırasında oluşan kısa elyaf atıkları gibi geri dönüştürülebilir atıklar veya yünün karbonizasyonundan kaynaklanan kül ve kırılmış selülozik maddeler gibi geri dönüştürülemeyen atıklardır [5]. Doğal ipeğin işlenmesi sırasında en yaygın atık ürün, zamk giderme işleminden elde edilen serisin adı verilen sakızimsı bir malzemedir [6]. Uşak ili tekstil sanayiinde üretim sırasında çok büyük miktarlarda oluşan ve geri dönüştürülemeyen toz halindeki ve boyutları iplik eğirmeye elverişli olmayan lif halindeki tekstil atıkları büyük sorun yaratmaktadır [7]. Oluşan bu atıklar ya çeşitli yöntemler ile bertaraf edilmekte veya geri dönüştürülerek değerlendirilmektedir. TÜİK'in 2023 yılında yayımlanan 2020 ve 2022 yıllarına ait verilerinde atık hizmeti verilen belediyelerde toplanan 30,3 milyon ton atığın %85,9'u atık işleme tesislerine ve %13,5'i belediye çöplüğüne gönderilirken, %0,6'sının ise açıkta yakılarak, gömülerek, dereye veya araziye dökülerek bertaraf edildiği belirtilmiştir [1].



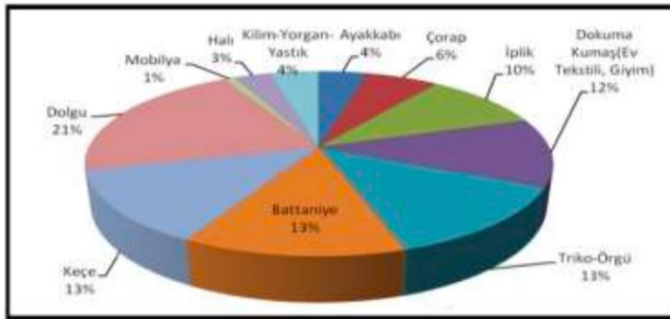
Şekil 1. TÜİK'in 2023 yılında yayımlanan (a) 2020 ve (b) 2022 yıllarına ait verilerinde atık hizmeti verilen belediyelerde toplanan 30,3 milyon ton atığın bertaraf yöntemlerine göre dağılımı [1].

Döngüsel bir ekonomi yaratmanın önemi göz önüne alındığında, bu endüstrilerin neden olduğu çevresel etkiyi azaltmak için bu malzemelerin yeniden kullanımına ilişkin bir bilgi boşluğunun varlığını doğrulamak mümkündür. Ülkemizde kolay ulaşılabilir ve ekonomikliği ile ön plana çıkan ve tekli doymamış yağ asitleri (MUFA), çoklu doymamış

yağ asitleri (PUFA), E vitamini, kalsiyum, magnezyum ve selenyumca oldukça zengin olduğu bilinen, ayrıca yapılan çalışmalarda yumurta sarısında oksidatif stabilite değerini arttırdığı tespit edilen ve kanatlı beslemede önemli bir alternatif yem katkı maddesi olma potansiyeline sahip olan susamın kanatlı hayvan beslemede kullanımına yönelik yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

Atık Hiyerarşisine göre atıkları öncelikle kaynağında önleme veya azaltma esastır. Kaynağında önlenemeyen veya azaltılamayan atıklar geri kazanım, geri dönüşüm veya yeniden kullanım gibi yöntemler ile değerlendirilmelidir. Geri dönüştürülemeyen atıklar için son çözüm ise enerji kazanımı ve bertaraftır. Katı atık boşaltma ve bertaraf, özellikle gelişmekte olan ülkeler için çok önemli bir risktir. Katı atıkların düzensiz bertaraf edilmesi toprak ve hava kirliliğine neden olmakta, insan sağlığı ve çevre için risk oluşturmaktadır. Bu noktada tekstil atıklarının bertaraf edilmeden değerlendirilmesi önem kazanmaktadır [8]. Bu atıkların geri dönüştürülerek çeşitli alanlarda değerlendirilmesi ekonomik ve çevresel açıdan katkı sağlayacaktır. Bunlar arasında doğal kaynakların korunması, enerji ve su tüketimi ile kirliliğin en aza indirilmesi yer almaktadır. Tekstil geri dönüşümü, tüketici öncesi veya tüketici sonrası atık olarak sınıflandırılabilir. Tekstil geri dönüşümünde, bu atıklar atık durumundan uzaklaştırılıp pazara (hem endüstriyel hem de son tüketici) geri dönüştürülmektedir. Tüketici öncesi atıklar, tekstil, elyaf ve pamuk endüstrilerinden otomotiv, havacılık, ev inşaatı, mobilya, yatak, kaba iplik, ev mobilyası, kağıt, hazır giyim ve diğer endüstriler için yeniden üretilen yan ürün malzemelerinden oluşur. Tüketici sonrası atık, sahibinin artık ihtiyaç duymadığı ve atmaya karar verdiği, üretilmiş tekstillerden yapılmış ya eskidiği, hasar gördüğü, ya da modası geçtiği için atılan her türlü giysi veya ev eşyası olarak tanımlanır [9]. Şekil 2 'de tekstil endüstrisi atıklarının geri dönüştürüldükten sonraki kullanıldıkları alanlar gösterilmiştir [10].

Tekstil ürünleri doğal liflerin çözünmesi, polimerik liflerin kimyasal bozunması, mekanik işlem (ön işlem) ve ısı işlemler ile geri dönüştürülür [11]. Kimyasal yöntemde, sentetik içerikli atıklar, kimyasal depolimerizasyon yöntemleri ile geri dönüştürülerek çeşitli alanlarda kullanılabilir. Kimyasal geri dönüşüm yaklaşımı genellikle kağıt yapımında, selüloz, nanoselüloz ve nanokristal selüloz ekstraksiyonunda ve adsorbanların, elektrotların ve süper kapasitörlerin hazırlanmasında kullanılır [12]. Mekanik yöntemde, atıkların çeşitli makinalarla parçalanarak tekrar liflere dönüştürülmesi sağlanabilmektedir. Böylece oluşan geri kazanılmış atıklar, iplik, dokuma, örme ve dokusuz yüzeylerin üretiminde kullanılabilir. Termomekanik yöntemde, eritilerek granül haline getirilen atıklar plastiklerin ve liflerin üretiminde kullanılır [7]. Geri kazanıma uygun olmayan atıklar yakılarak enerji eldesinde kullanılabilir. Pamuk artıkları keçemsi hale getirilerek organik izolasyon malzemesi, pamuk ve jüt artıkları saç örgüsüne benzer formlara getirilerek halat malzemesi elde edilebilir [13].



Şekil 2. Teleflerden Elde Edilen Ürünlerin Kullanım Alanlarının Dağılımı [10].

Bu derleme, tekstil endüstrisinde üretim aşamasında oluşan tekstil atıklarının; bakteriyel selüloz üretimi, selüloz asetat üretimi ve piroliz yöntemi ile değerlendirilmesine odaklanmıştır.

2. Tekstil Atıklarının Bakteriyel Selüloz Üretimi ile Değerlendirilmesi

Biyoselüloz olarak bilinen bakteriyel selüloz (BS), selülozun en saf formudur. BS, hemiselüloz ve lignin gibi safsızlıkların sıklıkla bulunduğu bitki selülozuna kıyasla üstün fizikokimyasal ve mekanik özelliklere sahiptir. Ayrıca, gözenekliliği, kalıplanabilirliği, biyolojik olarak parçalanabilirliği, yüksek kristallliği, nano lifli ağ yapısı, yüksek saflığı, yüksek su emme ve tutma kapasitesi, biyoyoumluluğu, kimyasal ve ısıya karşı direnci, toksik olmayışı, kolay sterilizasyonu nedeniyle tıp, eczacılık, gıda, kimya, çevre, mühendislik ve moda gibi alanlarda tercih edilmektedir [14]. Su tutma kapasitesi ve yavaş su salınım hızı, su moleküllerinin BS'un karmaşık yapısı içerisinde hidrojen bağları ile bağlanmasından kaynaklanır [15]. Bu şaşırtıcı fizikokimyasal özellikler, hem araştırma bilimcilerinden hem de sanayicilerden önemli ilgi görmüştür [16]. Olağanüstü mekanik özellikleri nedeniyle, kağıt, kulak zarı perforasyonunun tedavisi, [16] koruyucu film, gıda gibi çeşitli uygulamalarda polilaktik asit (PLA), nişasta, polihidroksialkonat (PHA) gibi biyopolimerler ve polivinil alkol (PVA) ve doymamış polyester gibi diğer polimerlerle güçlendirilerek kullanılır [17]. BS'un bu özelliklerinden yapay kan damarları, deri, kornea, kırık ve kemik üretimi gibi birçok biyomedikal uygulamada, çok işlevli nanokompozit malzemelerinin geliştirilmesinde, antimikrobiyal ve antiviral filmler, doku mühendisliği iskeleleri, kardiyovasküler sistem, oftalmik ve iskelet sistemleri, kırık ve endodonti, mükemmel biyoyoumluluğu nedeniyle biyomedikal araştırmalarda yararlanılmaktadır [16, 18]. Yüksek gözeneklilik nedeniyle, fotokatalizör, elektronik algılama platformu ve biyoalgılama malzemesi olarak kullanılmaktadır [19]. BS'un biyobozunurluğu, insan kolajenine benzeyen ağ benzeri morfolojiye sahip olması gibi üstün özellikleri, onu tıbbi alanda tercih edilir hale getirmekte ve kontrollü ilaç dağıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. BS geniş yüzey alanlarına sahiptir ve sıvıları absorbe etme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, özellikle gıda endüstrisinde kaplama, koyulaştırıcı ve bağlayıcı maddelerin üretiminde kullanılabilir [21]. Bunun yanı sıra BS, petrol ve gaz geri kazanım sektöründe, kozmetikte, yapıştırıcılarda, boyalarda ve madencilikte de kullanılabilir [17].

BS, asetik asit bakterileri gibi bazı bakteriler tarafından üretilen hücre dışı bir biyomalzemedir [22]. BS, yüksek maliyetli kültür ortamında üretilen fermentasyon gibi pek çok yöntemle üretilmekle beraber, çeşitli endüstrilerden (tarım, gıda, bira fabrikası, tekstil) gelen tonlarca düşük maliyetli substrat ve sanayi atıklarından da üretilmektedir. Bu yöntem hem atıkların değerli maddelere dönüştürülmesine katkı sağladığı için daha ekonomik, hem de çevre dostu ve temiz bir yöntemdir [14]. Sanayileşme ve dünya nüfusunun artması, tekstil ve elyaf tüketiminin artmasına neden olmuş, bu da tekstil endüstrileri ve tüketicilerin tonlarca atık üretmesine neden olmuştur. Bu, sürdürülebilir tekstil/elyaf atıklarının kullanımı, geri dönüşümü ve yönetimine olan talebi vurgulamaktadır. Çoğunlukla elyaf/tekstil endüstrisinde kullanılan doğal kaynaklar selülozik içerik bakımından zengindir ve bu nedenle oluşan atıklar detoksifikasyon ve hidroliz işlemlerinden sonra BC gibi çeşitli katma değerli ürünlerin üretiminde kullanılabilir [23]. BS üretimi için fermentasyon işlemlerinde kullanılan karbon kaynakları arasında monosakkaritler (glukoz ve fruktoz gibi), disakkaritler (sakkaroz ve maltoz gibi) ve alkoller (etanol, gliserol ve mannitol gibi) bulunur [24]. Bununla birlikte, bu hammaddeler genellikle pahalıdır ve bazen düşük BS verimi sağlar, bu da yüksek BS üretim maliyetlerine yol açar. Yüksek üretim maliyeti sorunu, BS'nin endüstriyel üretiminin ölçeğini sınırlar. Maliyet, selüloz üretiminde önemli bir sınırlama olduğundan, mevcut

çabalar, endüstriyel atıkların, BS veya mikrobiyal selüloz (MS) sentezi için uygun maliyetli bir substrat olarak kullanılması üzerine odaklanmıştır. Endüstriyel atıkların ve yan ürün akışlarının fermantasyon ortamı olarak kullanılması, BS üretiminin maliyet rekabetçiliğini artırabilir [16]. Pek çok endüstriyel atık karbon ve nitrojen içeriği bakımından zengindir; dolayısıyla bunların substrat olarak kullanılması ile yüksek mikrobiyal selüloz konsantrasyonları sağlayabilir [17]. Geçtiğimiz birkaç on yılda, endüstriyel sektörde 'sıfır atık' elde etme isteği, birçok araştırmacının endüstriyel atık ve yan ürünleri mikrobiyal yetiştirme için potansiyel besin kaynakları olarak kullanmasına yol açtı. Bu tür pek çok endüstri arasında gıda, tarım ve biracılık endüstrilerinden kaynaklanan atıklar ve yan ürünler en yaygın olarak kullanılanlardır ve zengin bir karbon kaynağı olabilir [25]. Son yıllarda birçok çalışma, gıda işleme atık suları, atmosferik asetik asit hamurundan elde edilen atık sıvıdaki hemiselülozlar, melas, konjak glikomannan, meyve suyu, pirinç kabuğu ve buğday samanı gibi alternatif hammaddeler kullanılarak BS üretme girişimlerine odaklanmıştır. Bu hammaddeler bol miktarda bulunmaktadırlar veya endüstriyel/tarımsal atıklar ya da nispeten ucuz tarım ürünleridir [26]. İplik, kumaş üretimi veya konfeksiyon yapım prosesleri sırasında ortaya çıkan diğer türdeki tekstil atıkları, eski pamuklu giysiler veya giysiler ve kullanılmış rejenere selüloz (viskon gibi) kumaşlar esas olarak selüloz polimerlerinden oluşur ve bunlar potansiyel olarak BS üretimi için başka bir tür ucuz polisakkarit kaynağı olabilir [27]. Ayrıca, tekstil endüstrisi, CO₂ emisyonunda önemli bir paya sahiptir ve çevre kirliliğinde büyük bir rol oynamaktadır. Tekstil ve konfeksiyon sektörü, kumaşların kesilmesi sonucu oluşan tonlarca atık üretmekte ve çoğu zaman çöplüklerde bertaraf edilmektedir [28]. Tekstil endüstrisi, hem kimyasal işlemlerinden kullanılan malzemeler açısından, hem de üretimi ve bertarafı sırasında çevresel bozulma açısından en karmaşık sektörlerden biridir. Bu nedenle, daha sürdürülebilir malzemeler için, oluşan biyomateryalin biyolojik olarak parçalanabilir olduğu ve moda endüstrisi de dahil olmak üzere birçok sektör için potansiyel kullanıma sahip olduğu için mikroorganizmaların kullanılması olumlu olacaktır. Probiyotik içecek Kombucha'da bulunan *Komagataeibacter xylinus* ailesinin bakterileri, BS üretimi için harika bir kaynak olup, giysi ve aksesuar üretiminde kumaşların yerini alma potansiyeline sahiptir [29]. BS'un laboratuvar ölçeğinde üretimi için, selüloza farklı mikro yapı ve özellikler, yani statik ve dinamik yetiştirme sağlayan iki yaklaşımı vardır. BS biyosentezi için basit ve tipik bir yöntem olan statik yetiştirmede, BS membranı, sıvı besin çözeltisinin hava/sıvı ara yüzünde üretilir ve kullanılan kaba bağlı olarak, farklı membranlar elde edilebilir. Membranların kalınlığı, genellikle 14 günü geçmeyen inkübasyon süresine bağlıdır. Uzun fermantasyon süreleri sırasında glikolik ve formik asitler ve diğerleri gibi inhibitör metabolitlerin birikimi olur. Bu yetiştirme yönteminde, membran teknolojisi, gıda ambalajı veya biyotıpta iskele uygulamalarında kullanılan selüloz genellikle çok sert ve güçlü bir yapı oluşturan film düzlemine paralel katmanlar halinde üretilir. Dinamik yetiştirmede, BS çalkalama ile üretilir, şekli ve boyutu çalkalama hızına (oksijen transferini kontrol eden) ve genellikle statik yetiştiricilikten daha kısa olan yetiştirme süresine bağlıdır. Kültür koşulları ile ilgili olarak, ayrıca, oksijen kaynağına, pH'a, sıcaklığa ve kullanılan substrata (genellikle sakkaritler olan karbon kaynakları) ve de bakteri suşuna bağlıdır. Fermantasyon işlemi normalde yaklaşık 28-30°C ve pH 4-7'de gerçekleştirilir. Çalışmaların çoğu, 4'ün altındaki pH'ın bakteri üremesi için uygun olmadığını bildirmişler [30].

Urbina ve arkadaşları (2017), hücre canlılığının asidik pH tarafından tercih edildiği gözlemler. Bunun, büyük çaptaki üretimlerde avantaj olabileceği, çünkü çoğu mikroorganizma bu kadar düşük pH ortamında yaşayamayacağı, bu nedenle diğer bakteri, mantar veya mayalar tarafından kontaminasyonun önlenebileceğini belirttiler. Şimdiye kadar, BS üretimi için en çok kullanılan kültür ortamının, D-glikoz, pepton, maya özü, sodyum fosfat dibazik ve sitrik asitten oluşan ortam olduğu bildirdiler [30]. Hong ve

arkadaşları yaptıkları çalışmada (2012), pamuk bazlı atık tekstillerden Gluconacetobacter xylinus BS üretimi için alternatif hammadde olarak araştırdılar. Selüloz kumaşları, iyonik sıvı (IL) 1-allyl3-methylimidazolium klorür ([AMIM]Cl) ile işlediler. [AMIM]Cl'nin 0,02 g/mL kadar düşük bir konsantrasyonda selüloz aktivitesinin %25 inaktivasyonuna neden olduğunu ve 0,0005 g/mL'den daha yüksek konsantrasyonlarda mevcut olduğunda fermantasyon sırasında BS üretimini azalttığını rapor ettiler. Pamuklu kumaş hidrolizatından elde edilen BS'un, glikoz bazlı ortamda yetiştirilen kültürden %83 daha yüksek olan 10,8 g/L verimle elde edildiğini rapor ettiler [31]. Leppanen ve ark. (2009), çeşitli ağaç türleri, pamuk liflerinden ve ketenden, selüloz ve hafif asit hidrolizi ile yapılmış mikrokristalin selülozun yapısını ve morfolojik farklılıklarını incelenmiştir [32]. Zhang ve ark. (2001), çeşitli viskozite-ortalama molekül ağırlıklarına sahip koagülasyon yoluyla pamuk linterlerinden rejenerasyon selüloz (RS) filmleri hazırlamışlardır. Selülozun çözünmesi ve RS filmlerin yapısını, şeffaflığını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. RC filmlerinin selüloz II kristal formunu ve 800 nm'de %85 ışık geçirgenliğine sahip homojen bir yapı sergilediğini gözlemişlerdir. Daha sonraki yıllarda selüloz ve türevleri ağırlıkça %6 NaOH / %4 Üre çözeltisi ile çözülerek, selüloz bir NaOH/Üre çözeltisi içinde seyreltilmiş ve çözelti sistemi içindeki davranışı lazer ışık saçılması ve viskozimetreye incelenmiştir [33, 34]. Selüloz üretimindeki en önemli sınırlamalardan biri maliyet olduğundan, mevcut çabalar, BS veya MS sentezi için uygun maliyetli bir substrat olarak endüstriyel atıkların fermantasyon ortamı olarak kullanımına odaklanmaktadır. Kadier ve arkadaşları (2021), BS'un ticari ölçekli üretimi için endüstriyel atıkların (tarımsal sanayi, tekstil, biyodizel, mikro-alg biyokütlesi, atık su şekeri ve lignoselülozik biyorafineriler, bira fabrikaları ve içecekler) besin kaynakları (karbon ve azot) olarak kullanılmasının teknik ve ekonomik fizibilitesini incelemiştir. Atık akışlarından BS'un büyük ölçekli üretiminin iyileştirilmesini amaçlayan kültür koşullarının (sıcaklık ve pH gibi bakteri kültürü koşullarının) optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. BS üretimindeki besin kaynağı endüstriyel atıklardan üretim maliyetini düşürdüğünden ve atık bertaraf sorunlarını azaltacağından sonuçların başarılı olduğunu belirtmişlerdir [35]. Neto ve arkadaşları (2022), yaptıkları çalışmada bir tekstil şirketinde pamuklu kumaşlardan elde edilen selülozun mekanik parçalanmasının ekonomik ve çevresel kazanımlarını değerlendirmişlerdir. Çevresel tahminler ve ekonomik değerlendirme analizleri yapılmıştır. Pamuk selülozunun mekanik parçalanmasının, 11.798.662,98 ABD doları tutarında ekonomik kazanç ve 31.335.767.040,26 kg tutarında çevresel etkide (biyotik, abiyotik, su, hava ve erozyon) bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Bulguların, tekstil sektöründe dögüsel ekonomi için fırsatların varlığını ve mekanik geri dönüşüm sürecinde elektrik enerjisi ve yağlayıcı tüketimi bakımından yaklaşık %99,69 oranında dögüsel ekonomi için fırsatlar sunduğu bildirilmişlerdir [28]. Provin ve arkadaşları (2021), tekstil endüstrisi tarafından üretilen kirlilik sorununa, bir biyo- tekstil olan BS'un avantaj ve dezavantajlarını ve bunun Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine yapacağı katkıları değerlendirmişlerdir. Hammadde kıtlığı ve atık geri kazanım ihtiyacı, katma değerleri ekonomide mümkün olduğu kadar uzun süre tutmaya çalışan yeni bir ekonomik kalkınma politikasını zorunlu kılmaktadır. Tekstil Endüstrisi tarafından üretilen atık miktarı için atık üretilmemesi, mevcut atıkların yeterli şekilde yönetilmesi ve doğal kaynakların sömürülmesini gerektirmeyen, biyolojik olarak parçalanabilen, sürdürülebilir yeni malzemelerin oluşturulması gerekliliği belirtilmişlerdir [29]. Yeni BS sentez stratejileri geliştirerek, yeni biyoreaktörler tasarlayarak, genetiği değiştirilmiş mikrobiyal türler kullanarak ve alternatif ucuz fermantasyon ortamları ile maliyet azaltılabilir. Ul-İslam ve arkadaşları (2020), düşük maliyetli BS üretimi için kullanılacak çeşitli alternatif kaynakları, yaygın tekstil malzemelerinin sınıflandırılmasını, özelliklerini ve neden oldukları çevresel etkilerini gözden geçirmişlerdir [36].

3. Tekstil Atıklarının Selüloz Asetat Üretimi ile Değerlendirilmesi

Selüloz, doğada bol miktarda bulunması, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve fosil kaynaklardan elde edilen polimerlerle karşılaştırıldığında çevresel etkisinin daha düşük olması nedeniyle dünya çapında büyük önem taşımaktadır [37]. Glikoz moleküllerinin birleşiminden gelen, doğrusal yapı ve yüksek molekül ağırlığı sunan bir polisakarittir [38]. Endüstriyel olarak odunun (çam, okaliptüs vb.) selülozu kağıt üretiminde, pamuğun lifli yapısından dolayı ise tekstil imalatında doğal selüloz lifleri kullanılmaktadır [39]. Tekrarlanan her selüloz ünitesi üç hidroksil grubuna sahiptir ve bu serbest OH gruplarının metil, asetil, karboksimetil vb. gibi diğer kimyasal gruplarla değiştirilmesiyle çeşitli türev bileşikler sentezlenebilir. Selüloz molekülü asetik anhidrit ile esterleştirildiğinde, selüloz asetatlar (SA) elde edilir [40]. SA, plastik filmler, tekstil elyafları, filtrasyon membranları, boyalar, sigara filtreleri, kaplamalar, diyalizörler, ilaçlar ve biyomedikal araçlar gibi çeşitli endüstriyel uygulamaları nedeniyle en önemli selüloz türevlerinden biri olarak kabul edilir [41].

Tekstil atıkları, kimyasal işlemlerle katma değerli ürünlere dönüşebilen selüloz açısından zengin olması nedeniyle değerli bir kaynaktır [42]. Homem ve Amorim (2020), Portekiz'deki bir tekstil endüstrisi tarafından sağlanan tekstil atıklarının SA sentezinde kullanımını değerlendirmişlerdir. SA, homojen asetilasyon yöntemi ile üretilmiş ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve ikame derecesi ile karakterize edilmiştir. FTIR spektrumları, asetilasyonun gerçekleştiğini kanıtlayan yeni bantların ortaya çıktığını göstermiş ve herhangi bir ön saflaştırma adımı olmadan, basit bir yöntemle SA elde etmenin mümkün olduğunu rapor etmişlerdir [43]. Cao ve ark. (2016), atık pamuklu kumaşlardan suda çözünür SA sentezlemek için katalizör olarak az miktarda asidik IL gerektiren optimize edilmiş bir "yarı homojen" işlem geliştirmişlerdir. Atık pamuklu kumaşlardan suda çözünür SA'nın en yüksek dönüşümüne %90,8 ulaşmışlardır. Elde edilen üründen ek kullanımlık ambalaj malzemeleri, levha kaplamaları ve bağlayıcılar vb. uygulamalar için cazip, şeffaf selüloz kompozitlerin üretilebileceğini belirtmişlerdir [44]. Tonin ve arkadaşları (2008) lif atıklarından biyokompozit selüloz asetat sentezlemiştir. Yün- selüloz asetatların kimyasal, termal, mekanik özelliklerin ve morfolojisini incelemişlerdir. Selüloz asetat-yün karışımlarının kabul edilebilir bir gerilme, termal ve su absorplama özelliklerine sahip olduklarını rapor etmişlerdir. Yapılan çalışma ürünlerinin keratin-selüloz temelli biyo-kompozit malzemeler için gübrelenebilir ambalaj, tek kullanımlık tarımsal filmler, tekstil lifleri ile yeni geliştirilmiş yangın dayanımı, nem tutuculuk vb. olabileceğini belirtmişlerdir [45]. Cheng ve ark. (2010), doğal yenilenebilir ve nispeten ucuz pamuk yan ürünü olan pamuk çapağı ve pamuk tohumu kabuğunun bir kısmını selüloz asetata dönüştürmüşlerdir [46]. Costa ve arkadaşları (2022) yaptıkları çalışmalarında, karışık tekstil atıklarından selülozun asit hidrolizi ile ekstrakte edilme koşullarını incelemeyi, bunları selüloz türevlerine dönüştürmeyi ve atıkların azaltılmasına katkıda bulunarak olası selüloz kaynaklarının genişletilmesini amaçladılar. %65-88 arasında selüloz tozunu geri kazanmışlardır. Ekstrakte ettikleri selülozdan selüloz türevleri üretme fizibilitesi için uyguladıkları stratejiler; sodyum karboksi metil selüloz elde etmek için eterleştirme (0,27 ile 0,61 arasında ikame derecesi ile) ve selüloz asetat elde etmek için esterleştirme (2,59 ikame derecesi ile). Elde edilen selüloz türevlerinin, tekstil endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanımının faydalarına ve bunun döngüsel ekonomi kavramı ve uygulamasına teşvik edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Özellikle karışık tekstil kalıntılarında daha genel bir selüloz ekstraksiyon prosedürüne ihtiyaç duyulduğunu ve ekstrakte edilen selülozdan katma değerli ürünler elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bitki materyalinden selüloz ekstraksiyon işlemi, lignin ve diğer selülozik olmayan malzemeleri uzaklaştırmak için selülozun saflaştırılmasını gerektirdiğinden, pamuklu tekstillerde bulunan selüloz çok daha saf olduğu için, bu malzemelerden selüloz

elde etme işleminde özellikle tekstil atığı kullanılıyorsa, daha kolay ve daha düşük maliyetli olacağını belirtmişlerdir [47]. Türkiye ve Dünya'daki havlu üreten tekstil fabrikalarında selüloz ihtiva eden pamuklu atık olarak ortaya çıkan kırpıntılar, tekrar katma değeri yüksek bir şekilde değerlendirilememektedir. Bu şekilde ortaya çıkan kırpıntıları Ali Koç yaptığı çalışmasında (2015), NaOH ve H₂O₂ ile temizleyerek ağartmış, ağarttığı bu selülozu 0°C'de NaOH ile merserize etmiş ve merserize selülozdan, dimetil sülfat (DMS) ile mikrodalga ışını cihaz kullanılarak metil selüloz (MS) sentezlemiştir. Sentezlenen MS'un yapısını analitik ve spektroskopik (1H-, katı-13C-NMR, FT-IR) yöntemlerle aydınlatılmıştır [48]. Şeyma Yılmaz yaptığı çalışmasında (2017), pamuklu atıkları ağartma işlemi ile temizlemiş ve ağartılmış selülozu sülfürik asit katalizörlüğünde asetanhidrit ile reaksiyona sokarak selüloz triasetat (STA) sentezlemiştir. CTA uygun şartlarda magnezyum asetat/asetik asit karışımında hidrolizlenerek selüloz diasetat (SDA)'a dönüştürülmüştür. STA ve SDA'ların yapısı FT-IR, 1H-,13C-NMR ve XRD spektroskopik yöntemleri ile aydınlatılmıştır [49]. Homem ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada, Portekiz'deki bir tekstil endüstrisi tarafından sağlanan tekstil atıklarından SA üretimini değerlendirmişlerdir. SA, homojen asetilasyon yöntemi ile üretilerek FTIR spektrumları ile asetilasyonun meydana geldiğini kanıtlanmıştır. Daha önce herhangi bir saflaştırma adımı olmadan, basit bir yöntemle SA elde etmenin mümkün olduğunu göstermişlerdir [43].

4. Tekstil Atıklarının Piroliz ile Değerlendirilmesi

Tekstil atığının homojen olmaması ve karmaşık yapısı geri dönüşümünü ekonomik olarak zorlaştırır. Piroliz, homojen olmayan ve karmaşık yapıdaki atık maddelerini katma değerli ürünlere dönüştüren bir termokimyasal işlemidir [50]. Piroliz, organik maddelerin oksijensiz ortamda bozundurulması işlemidir. Oksijensiz ortamda 500-800°C sıcaklıklarda ısıl bozunma ile gerçekleşen piroliz, 800-1100°C sıcaklıklarda gerçekleşen gazlaştırma ile karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir [13]. Bu yöntemde, büyük moleküller inert, vakum, indirgen veya yükseltgen ortamlarda, katalizörlü veya katalizörsüz olarak, sıcaklık etkisi ile parçalanırlar. Bu süreçte bağlar kopmakta ve oluşan radikaller kararlı hale geçmek için gaz, sıvı ve katı ürünler oluşturmaktadırlar [51]. Bu işlem için gereken ısı miktarı, organik maddenin yapısını bozarak yeni kimyasalların oluşumuna neden olacak miktarda olmalıdır. Isıl bozunma katı yakıt açısından "karbonizasyon", sıvı ve gaz yakıt açısından ise "piroliz" olarak adlandırılır. [13]. Pirolitik ürünlerin verimleri, büyük ölçüde hammadde türüne ve piroliz koşullarına (sıcaklık, ısıtma hızı, basınç, parçacık büyüklüğü ve ortam) bağlıdır [52]. Pirolitik gaz, karbon monoksit (CO), hidrojen (H₂), C1-C4 hidrokarbonları ve karbondioksit (CO₂) gibi yanıcı gazlardan oluşmaktadır. Gazın bileşimi, piroliz sıcaklığı ve tekstil atığının türüyle ilişkilidir. Metal katalizör kullanımı, gaz pirolizatındaki yanıcı gazların miktarını arttırmaktadır. Tekstil atıklarından türetilen pirolitik yağlar; alifatik, aromatik, fenolik bileşikler, asitler, aldehytler, alkoller ve diğer oksijenli bileşikler dahil olmak üzere çok çeşitli kimyasal grupların karışımlarıdır. Piroliz sonucu ortaya çıkan ürünler enerji üretiminde, çeşitli kompozit ürünlerin üretiminde, daha yüksek kalite ve değerinde yakıt üretiminde veya kimyasal işlemlerle kimyasal ürün üretiminde kullanılabilir [53, 54]. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeni ile sıvı ürünler (yağ, biyoyağ, ya da tar) daha çok tercih edilmektedir. Doğru olarak depolandırıldıklarında oldukça kararlı bir yapıya sahip olan sıvı ürün (biyoyağ) iyileştirme işlemleri sonucunda hidrokarbon yakıtlara dönüştürülebilir. Biyokütle ve atıkların yakıt olarak doğrudan kullanımında ortaya çıkan düşük enerji yoğunluğu ve yüksek depolama, taşıma maliyetleri gibi dezavantajlar, biyokütleyle piroliz işlemi uygulanarak, taşıma ve depolama maliyetleri daha düşük ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip, katı, sıvı ve gaz ürünlerin üretimi ile ortadan kaldırılabilir [11]. Dolayısıyla, kesilmiş tekstil atıklarını piroliz işlemiyle yararlı ürünlere dönüştürmek, çöp sahalarına atmak ve yaktmaya alternatif çevre dostu bir yöntemdir.

Pamuk genellikle %88-96 oranında selülozdan oluşur, geri kalanı protein, pektin maddeleri ve mumdur. Pamuk, kullanımdan önce yıkanıp ağartıldıktan sonra selüloz içeriği yaklaşık %99 olur. Tekstil lifleri ısıtıldığında, polimer molekülleri piroliz adı verilen bir işlemde daha küçük moleküllere ayrılmaya başlar. Bu piroliz ürünlerinden bazıları yakıttır. Farklı tekstillerden elde edilen lifler farklı polimerlerden yapıldığından, üretilen yakıt türü ve miktarı her tekstil türü için farklıdır. Bir tekstil türünün ne kadar şiddetli yandığı, üretilen duman ve is miktarı ve kumaşı işlemek için gereken alev geciktirici sistem türü açısından önemli olabilir. Tekstil atıkları son derece yanıcı oldukları için birçok araştırmacı alev geciktirici ile işlenmiş pamukların piroliz mekanizmasını incelemeye odaklanmıştır [55]. Tekstil atıklarının piroliz sürecinde ilk olarak 470-530 K arasında hemiselülozlar, 510-620 K aralığında selüloz ve 550-770 K arasında da lignin parçalanır. Amaç biyokütle pirolizinden elde edilen sıvı ürünlerin verimini en üst düzeye çıkarmaksa, sıcaklığı düşük, ısıtma oranını yüksek ve kalma süresini düşük tutmak gerekir. Yüksek kömür üretimi için ise, düşük sıcaklık, düşük ısıtma oranı işlemi seçilir. Amaç pirolizden elde edilen yakıt gazının verimini en üst düzeye çıkarmaksa, yüksek sıcaklık, düşük ısıtma oranı, uzun kalma süresi tercih edilir [56]. Tekstil malzemeleri esas olarak doğal ve sentetik liflerden oluşur ve sentetik lifler yüksek karbon içeriğine ve kalorifik değere sahip olup doğal olarak bozunması zordur. Tekstil atıklarını geri kazanmak için katalitik piroliz kullanımının, diğer geri dönüşüm yöntemlerine kıyasla karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabileceğini belirtmişlerdir. Tekstil atıklarının katalitik piroliz mekanizması serbest radikal zincir reaksiyonu ve karbokasyon mekanizmasıdır. Katalitik piroliz reaksiyonları için kullanılan yaygın katalizörler silika-alüminat, metaller ve bunların oksitleri ve karbon bazlı katalizörlerdir. Piroliz gazı esas olarak yanma için kullanılır ve piroliz yağı içten yanmalı motorlarda ve kimyasalların üretimi için kullanılabilir. Piroliz karbonuna gelince, bu sadece yüksek kalorifik değere sahip değil, aynı zamanda çok amaçlı bir malzemedir. Gelecekte tekstil atıklarının pirolizi için ucuz ve hazır katalizörler olarak demir bazlı endüstriyel katı atıkların (kırmızı çamur ve çelik çürufu) geliştirilmesi önerilmektedir [36]. Tekstil atıklarının pirolizi, ağırlıkça %>20'lik bir katı kalıntı ile sonuçlanır. Birçok piroliz işlemi, farklı uygulamalar için karbon malzemelerin üretimine odaklanmıştır. Amaçlanan uygulamaya göre de katı kalıntının yüzey alanı genişletilerek ve gözenekliliği artırılarak ilgili özellikleri etkinleştirmek için farklı ön ve son işlemlere tabi tutulur [57]. Tekstil atıklarından elde edilen karbon kalıntısının yüzey alanını ve direncini iyileştirmek için kimyasal aktivasyon yöntemleri kullanılmaktadır [58]. Bunun için de aktive edici ajanlar olarak KOH, H₃PO₄ ve ZnCl₂ kullanılmaktadır. Bu ajanlar gözenek oluşturma sürecinde, yüksek performans sağlamaktadır [50].

Lee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2023), tekstil atığından elde edilen karbon için çeşitli aktive edici ajanlar arasında düşük toksisiteye sahip ve çevre dostu ajanlar olarak, FeCl₂ ve FeCl₃ ile aktivasyonun, yüksek yüzey alanına (örneğin, ~ 1400 m²·g⁻¹ BET yüzey alanı) ve iyi gelişmiş mikro gözenekliliğe yol açtığını bildirilmişlerdir. Tekstil atığından türetilen karbonun MgCl₂ ile aktivasyonu ile, diğer aktive edici ajanlara göre daha homojen gözenek yapılarına sahip daha mezogözenekli karbon malzemelerin elde edildiğini, zeolit katalizörünün atık karışık kumaştan monoaromatik hidrokarbonlar ve naftalin türevleri üretimine yönelik seçiciliği iyileştirdiğini ve CaO katalizörünün de düşük oksijen içerikli pirolizat üretimini desteklediğini belirtmişlerdir. Piroliz sıcaklığındaki bir artışın pirolitik gaz verimini artırdığını ve katı kalıntı verimini azalttığını, katalizör kullanımının katı kalıntı verimini azaltma eğiliminde olduğu, genel olarak, sürekli akışlı pirolizörün daha yüksek gaz pirolizat verimine yol açarken, yarı kesikli pirolizörün daha yüksek sıvı pirolizat ve katı kalıntı verimine yol açtığı belirtilmişlerdir [50]. Miranda ve arkadaşları, tekstil atıklarının termal davranışını farklı ısıtma hızlarında termogravimetri ve yarı-kesikli piroliz ile incelemişlerdir. Kütle kaybının başlangıç sıcaklığının 104-156°C arasında ve son reaksiyon sıcaklığının 423-500°C arasında olduğunu ve ortalama kütle kaybının

%89,5 olduğunu rapor etmişlerdir. 135-309, 276-394 ve 374-500°C sıcaklık aralıklarında bulunan üç DTG pikinin bulunduğunu, ilk ikisinin hemiselüloz ve selülozun ayrışmasıyla veya farklı selüloz ayrışma süreçleriyle ilişkili olabildiği ve üçüncü pikin de muhtemelen sentetik bir polimerle ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. 700°C'de ve 60 ml/dakika azot akışında kesikli bir reaktörde oluşturulan piroliz koşullarında, %72 ağırlık oranında yağ, %13,5 ağırlık oranında gaz ve %12,5 ağırlık oranında kömür elde etmişlerdir [55]. Yousef ve arkadaşları çalışmalarında tekstil atıklarını işlemek ve katma değerli enerji taşıyıcılarına dönüştürmek için katalizör destekli piroliz kullanarak tüketilebilir kimyasalların (katalizörler) ve piroliz süresini en aza indirmeye ve değerli biyo-yag ve gazların (metan ve hidrojen) verimini en üst düzeye çıkarmaya odaklanmışlardır. Boya kaynaklı ağır metaller içeren farklı renklerde (siyah ve mavi) atık kotlar (selüloz/pamuk açısından zengin tekstil atıklarının büyük bir kısmı) üzerinde gerçekleştirdikleri piroliz işleminde 800°C'ye kadar termal ve kimyasal ayrışmayı incelemek için Diferansiyel termal analiz/3D-Fourier-Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi kullanmışlardır. Daha sonra, geliştirdikleri pilot piroliz tesisinde hammaddenin %82'sinden fazlasını sıvı ve gaz ürünlerine başarıyla dönüştüğünü, işlenmemiş hammaddenin etkili biyo-yag veriminin %36-37,6 olduğunu ve piroliz süresinde %18 azalma sağlandığını rapor etmişlerdir [59]. Piroliz kullanılarak tekstil atığı ileri dönüşümünün ekonomik analizini yapan çok az çalışma yapılmıştır. Lee ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmalarında, tekstil atıklarını biyoenerjiye (yanıcı gazlar, pirolitik yağ ve kömür şeklinde) dönüştürmek için kullanılan piroliz işleminin ekonomik ve çevresel uygulanabilirliği konusunda, iki senaryonun (hammadde olarak ağır metaller içeren işlenmemiş tekstiller veya işlenmiş ağır metal içermeyen tekstiller kullanılarak) dikkate alınarak değerlendirildiğini belirttiler. İşlenmemiş tekstil atıklarını ileri dönüştürmek için kullanılan piroliz işleminin (%93 geri kazanım oranı) bir ton tekstil atığı başına toplam 1800 ABD doları kar sağladığının tahmin edildiğini ve ağır metal içermeyen hammadde kullanmanın ek bir işlem gerektirmesi dolayısıyla karın, tekstil atığı tonu başına 602 ABD dolarına düştüğünü belirtmişlerdir. Çevresel olarak de 836 kg sera gazı emisyonunun (CO₂ eşdeğeri), işlenmemiş tekstil atıklarının piroliz işlemi yoluyla ileri dönüştürülmesiyle önlenebileceğini belirtmişlerdir [50]. Kwon ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, katma değerli ürünlerin üretimi ile atık tekstilin bertarafı için önerdikleri teknikte, sentez gazı üretmek için katalitik piroliz kullanmışlardır. Piroliz sonucunda önemli ölçüde sentez gazı ve CH₄ üretimi olduğunu ve CO₂'in piroliz uçucu bileşikleriyle gaz fazı reaksiyonu yoluyla CO oluşumunu arttırdığını bildirmişlerdir. Tehlikeli uçucu bileşikler (yani benzen türevleri ve PAH'lar) sentez gazına tamamen dönüştürmek için Co bazlı katalizör kullanmışlar ve katalitik olmayan piroliz ile karşılaştırıldığında, CO₂ destekli katalitik piroliz ile, daha yüksek H₂ ve CO üretildiğini ve CO₂ destekli katalitik piroliz ile, Co bazlı katalizör üzerinde karbon birikimini de baskıladıklarını belirtmişlerdir. Bu nedenle, CO₂ destekli katalitik pirolizin, benzen türevlerinin ve polisiklik aromatik hidrokarbonların en aza indirilmesi ile atık sentetik tekstilleri sentez gazına dönüştürmek için çevreye zararsız bir proses olarak kullanılma fizibilitesine sahip olabileceği bildirilmiştir [60].

Diğer endüstriyel atıklarla karşılaştırıldığında, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde tekstil atıklarının pirolizine çok az ilgi gösterilmiştir. Tekstil atıklarının pirolizinden katma değerli sentez gazı, gözenekli sorbentler ve yakıt gibi katı faz ürünlerinin bazı yüksek kaliteli sıvı ürünlerle elde edilebileceği bilinmektedir. Özellikle, bu tür tekstil atıklarında bulunan selülozik lifli malzemeler, piroliz işlemleri ile biyo bazlı karbonlu malzemelerin üretiminde kullanılabilir [61].

5. Değerlendirme ve Sonuç

Günümüzde endüstriyel üretim basamaklarında oluşan ve kullanım sonrası meydana gelen atıkların yeniden değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada tekstil sektörünün farklı üretim aşamalarında oluşan hem üretici hem de tüketici sonrası açığa çıkan atıkların geri dönüşüm yöntemleri ile değerlendirilme olanakları ilgili literatürler ışığında incelenmiştir. Oluşan atıkların boyut, renk, hammadde gibi özelliklerine göre sınıflandırılarak üretim süreçlerine yeniden girdisi sağlandığında alternatif ürünler geliştirilebileceği görülmüştür. Elde edilen geri dönüşüm ürünleri için uygun kullanım alanları ve koşulları belirlenerek çevresel ve ekonomik fayda sağlamak kaçınılmazdır.

Geri dönüşümde, etkin bir tedarik zincirinin oluşturulması ve geri dönüşümü yapılacak ürünlerin sınıflandırılması oldukça önemlidir. Bu noktada geri dönüşüm elyaftan elde edilen ürünlerde kalite ve standartizasyon sağlanabilmesi açısından üretim parametrelerinin arşivlenmesi gerekmektedir. Elde edilen son ürünün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesine yönelik araştırmalar ve uygulamalar sayesinde üretimde devamlılık sağlanabilecektir.

Uluslararası rekabet özellikleri değerlendirildiğinde ise Uşak ilinin fiyat ve telef erişim potansiyeli konusunda oldukça avantajlı olduğu ön plana çıkmaktadır. Türkiye tekstil geri dönüşümü sektöründe yaklaşık %80'lik paya sahip Uşak'ta bulunan fabrikalarda yılda 450 bin ton tekstil atığı işlenmektedir. Bu atıklardan elde edilen farklı numara ve hammadde yapısındaki iplikler battaniye üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu noktada geliştirilen ürünlerin özelliklerinin standardizasyonu ve katalog niteliğinde sınıflandırılabilmesi için gerekli çalışmaların yapılması geri dönüşüm ürün sürekliliği açısından önem arz etmektedir [62].

2022 yılı başında çevresel bilincin artırılması adına Uşak'ta geri dönüşüm sektörünün durumunu ortaya koyacak ve kısa-orta-uzun vadede sektöre yol haritası oluşturacak nitelikte bilgilerin olduğu Uşak Tekstil Geri Dönüşüm Sektör Raporu hazırlanmıştır. Uşak ilinde geri dönüşüm üzerine çalışan fabrikalarda ortaya çıkan ürün çeşitliliği öncelik sırasına göre ev tekstili – döşemelik kumaş, dokusuz yüzey (keçe), otomotiv tekstilleri, jeotekstiller, yalıtım malzemeleri, medikal tekstil ürünleri ile antibakteriyel tekstiller olarak belirtilmiştir [62].

Geri dönüşüm ürünlerin elde edilmesinde Uşak ili ürün çeşitliliği ve üretim olanakları bakımından öncü olan bir durumdadır. Atıkların değerlendirilmesi yoluyla atık depolama alanlarının azaltılması çevresel bilince katkı sunmaktadır. Ayrıca geri dönüşümle daha düşük maliyetli yeni ürünlerin elde edilmesi, sektörün sunduğu istihdam olanakları ve nitelikli iş gücünün değerlendirilmesi de bu ilin ülke ekonomisine önemli katkılar sağladığını göstermektedir. Bu katkıların büyüyerek ve gelişerek ilerlemesi adına araştırma geliştirme ve ürün geliştirme (Ar-Ge ve Ür-Ge) çalışmalarının yürütülerek katma değeri yüksek geri dönüşümlü ürünlerin üretilmesi sağlanmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Hasan ARIKAN tarafından hazırlanan "Tekstil atıklarının polimer kompozitlerinin ısıl ve mekanik özelliklerine etkisi" başlıklı yüksek lisans tezinden türetilmiş olup, [Proje No: UBAP 06/ 2024/TP003] numaralı Uşak Üniversitesi Araştırma Fonu (BAP) kapsamında desteklenmiştir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayına gerek duyulmamaktadır.

Katkı Oranı

Yazarlar bu çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Kaynaklar

1. TÜİK. Yıllık Sanayi Ürün (PRODCOM) İstatistikleri, 2023.
2. Lebedyte M, Sun D. A review: can waste wool keratin be regenerated as a novel textile fibre via the reduction method?, *The Journal of The Textile Institute*, 2021; 113:8, 1750-1766.
3. Juanga-Labayen JP, Labayen IV, Yuan Q. A review on textile recycling practices and challenges, *Textiles*, 2022;2,174–188. <https://doi.org/10.3390/textiles2010010>.
4. Wojnowska-Baryła I, Bernat K, Zaborowska M. Strategies of recovery and organic recycling used in textile waste management, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022;19,5859. <https://doi.org/10.3390/ijerph19105859>.
5. Abou Akkada AR, Osman HES. The vise of ruminal ammonia and blood urea as an index of the nutritive value of protein in some food stuffs, *Journal of Agricultural Science*, 1967;69:25.
6. Rangi A, Jajpura L. The Biopolymer Sericin: Extraction and Applications, 2015; 5(1).
7. Macit H, Tayyar AE, Macit AŞ, Alan G. Tekstil sektöründe geri dönüşüm olanakları ve Uşak ili'nde güncel durum, *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 2019; 3(2):91-102.
8. Akyıldız SH, Enis İY, Sezgin H, Bellopede R, Fiore S, Yalcin B. Tekstil Terbiye İşlemi Atıksularında Mikroliflerin Ayrıştırılması ve Tanımlanması, *Politeknik Dergisi*, 2024. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1310805>.
9. Hawley JM. Textile recycling options: exploring what could be, In: *Shaping sustainable fashion: Changing the way we make and use clothes*, 2011;143-157.
10. Altun Ş. Tekstil Geri Kazanım Sektörü Raporu, Uşak TSO, 2014.
11. Damayanti R, Kossak F. Extending Kevin Lynch's concept of imageability in third space reading; case study of Kampung, Surabaya, Indonesia, *A/Z ITU Journal of Faculty of Architecture*, 2016;13(1):57-67.
12. Xue B, Yang Y, Sun Y, Fan J, Li X, Zhang Z. Photoluminescent lignin hybridized carbon quantum dots composites for bioimaging applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019;122:954–961.
13. Üçgül İ, Turak B. Tekstil katı atıklarının geri dönüşümü ve yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesi, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 2015;3(3).
14. Hussain Z, Sajjad W, Khan T, Wahid F. Production of bacterial cellulose from industrial wastes: a review, 2019.
15. Jalali S, Rezaei R, Afjeh MG, Eslahi N. Effect of vanilla as a natural alternative to traditional carriers in polyester dyeing with disperse dyes, *Fibers and Polymers*, 2019;20(1):86-92.

16. Hu W, Chen S, Yang J, Li Z, Wang H. Functionalized bacterial cellulose derivatives and nanocomposites, *Carbohydrate Polymers*, 2014;101:1043–1060.
17. Kadier A, Kalil MS, Abdeshahian P, Chandrasekhar K, Mohamed A, Azman NF, Lograno W. Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (MECs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;61:501-525.
18. Wu X, Wang F, Wang S. Properties of Wool/PET composite yarns, *Textile Research Journal*, 2003;73:4.
19. Schroeder R, Torres FW, Binder C, Klein AN, De Mello JBD. Failure mode in sliding wear of PEEK based composites, *Wear*, 2013;301:717-726.
20. Armada E, Portela G, Roldán A, Azcón R. Combined use of beneficial soil microorganism and agrowaste residue to cope with plant water limitation under semiarid conditions, *Geoderma*, 2014;232-234:640–648.
21. Akter M, Sikder MT, Rahman MM, Ullah A, Hossain KFB, Banik S, Hosokawa T, Saito T, Kurasaki M. A systematic review on silver nanoparticles-induced cytotoxicity: Physicochemical properties and perspectives, *Journal of Advanced Research*, 2018;9:1-16.
22. Belecki K, Townsend CA. Environmental Control of the Calicheamicin Polyketide Synthase Leads to Detection of a New Octaketide and Proposal for Eneidyne Biosynthesis, *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 2012; 51:45, 11316.
23. Hussain Z, Sajjad W, Khan T, Eahid F. Production of bacterial cellulose from industrial wastes: a review, *Cellulose*, 2009;26:2895-811.
24. Keshk S. Vitamin C enhances bacterial cellulose production in *Gluconacetobacter xylinus*, *Carbohydrate Polymers*, 2014;99:98-100.
25. Paximada P, Tsouko E, Kopsahelis N, Koutinas AA. Bacterial cellulose as stabilizer of emulsions, *Food Hydrocolloids*, 2014; 53: 225–232.
26. Bolat S, Yilmaz D. A study on the effect of yarn count and weft density parameters on various woven fabric properties obtained from dual-core spun yarns, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Dergisi*, 2021;36(4):2315-2332. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.769438>.
27. Mehrotra R, Sharma S, Shree N, Kaur K. Bacterial cellulose: an ecological alternative as a biotextile, *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2023;20(2):449-463.
28. Cardoso de Oliveira Neto G, Teixeira MM, Souza GLV, Arns VD, Tucci HNP, Assessment of the eco-efficiency of the circular economy in the recovery of cellulose from the shredding of textile waste, *Polymers*, 2022;14,1317. <https://doi.org/10.3390/polym14071317>.
29. Provin AP, Cubas ALV, Regina de Aguiar Dutra A. Textile industry and environment: can the use of bacterial cellulose in the manufacture of biotextiles contribute to the sector?, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021;23:2813–2825. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02191-z>.
30. Urbina L, Corcuera MA, Gabilondo N, Eceiza A, Retegi A. A review of bacterial cellulose: sustainable production from agricultural waste and applications in various fields, *Cellulose*, 2021;28:8229–8253. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04020-4>.
31. Hong F, Guo X, Zhang S, Han S, Yang G, Jöhnsson LJ. Bacterial cellulose production from cotton-based waste textiles: Enzymatic saccharification enhanced by ionic liquid pretreatment, *Bioresource Technology*, 2012;104.
32. Orelma H, Hokkanen A, Leppänen I, Kammiovirta K, Kapulainen M, Harlin A. Optical cellulose fiber made from regenerated cellulose and cellulose acetate for water sensor applications, *Cellulose*, 2020;27:1543–1553.

33. Dai X, Yin X, Wu C, Zhang W, Chen Y. Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor, *Energy*, 2001;26(4):385-399.
34. Liu Z, Zhang D, Han S, Li C, Tang T, Jin W, Liu X, Lei B, Zhou C. Laser ablation synthesis and electron transport studies of tin oxide nanowires, *Advanced Materials*, 2003;15(20):1754-1757.
35. Kadier A, Ilyas RA, Huzaifah MRM, Harussani MM, Azlin MNM, Yuliasni R, Chandrasekhar K, Amirul Islam M, Asyraf MRM, Ishak MR. Use of Industrial Wastes as Sustainable Nutrient Sources for Bacterial Cellulose (BC) Production: Mechanism, Advances, and Future Perspectives, *Polymers*, 2021,13:3365. <https://doi.org/10.3390/polym13193365>.
36. Ul-Islam M, Ullah MW, Khan S, Park JK. Production of bacterial cellulose from alternative cheap and waste resources: A step for cost reduction with positive environmental aspects, *Korean J Chem Eng*, 2020;37(6),925-937. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0524-3>.
37. Dong F, Yang X, Guo L, Wang Y, Shaghaleh H, Huang Z, Xu X, Wang S, Liu H. Self-healing polyurethane with high strength and toughness based on a dynamic chemical strategy, *Journal of Materials Chemistry*, 2022;10(18):10139- 10149.
38. Kramer A, Schneider-Mergener J. Synthesis and screening of peptide libraries on continuous cellulose membrane supports, *Combinatorial Peptide Library Protocols*, 1998;25-39.
39. Edwin NJ. Characterization of polymer particles via dynamic light scattering and diffusion ordered spectroscopy techniques, 2001.
40. Aziz T, Farid A, Haq F, Kiran M, Ullah A, Zhang K, Li C, Ghazanfar S, Sun H, Ullah R, Ali A, Muzammal M, Shah M, Akhtar N, Selim S, Hagagy N, Samy M, Al Jaouni S. A review on the modification of cellulose and its applications, *Polymers*, 2022;14(15): 3206.
41. Puls J, Wilson SA, Hölter D. Degradation of cellulose acetate-based materials: A review, *Journal of Polymers and the Environment*, 2011;19:152-165.
42. Subramanian K, Sarkar MK, Wangc H, Qina ZH, Chopra SS, Jina M, Kumard V, Chene C, Tsang CW, Lin CSK. An overview of cotton and polyester, and their blended waste textile valorisation to value-added products: A circular economy approach – research trends, opportunities and challenges, 2022;52(21):3921-3942.
43. Homem NC, Amorim MTP. Synthesis of cellulose acetate using as raw material textile wastes, *Materials Today: Proceedings*, 2020;31:315-317.
44. Cao J, Sun X, Lu C, Zhou Z, Zhang X, Yuan G. Water-soluble cellulose acetate from waste cotton fabrics and the aqueous processing of all-cellulose composites, *Carbohydrate Polymers*, 2016;149:60-67.
45. Aluigi A, Vineis C, Ceria A, Tonin C. Composite biomaterials from fibre wastes: Characterization of wool- cellulose acetate blends, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008;39(1):126-132.
46. Cheng HN, Dowd MK, Selling GW, Biswas A. Synthesis of cellulose acetate from cotton byproducts, *Carbohydrate Polymers*, 2010; 80(2):449-452.
47. Costa C, Viana A, C, Marques EF, Azoia NG. Recycling of textile wastes, by acid hydrolysis, into new cellulosic raw materials. *Waste Management*, 2022;153:99-109.
48. Koç A. Pamuklu Tekstil Atıklarından Selüloz Eldesi, Metil Selüloz Sentezi, Karakterizasyonu ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2015, Kahramanmaraş.
49. Yıldız Ş. Havlu Kırıntılarından Selüloz Eldesi, Selüloz Asetat Sentezi ve Karakterizasyonu. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2017, Kahramanmaraş.

50. Lee HS, Jung S, Lin KYA, Kwon EE, Lee J. Upcycling textile waste using pyrolysis process, *Science of The Total Environment*, 2023;859:160393.
51. Ignatyev IA, Thielemans W. Recycling of polymers: a review, *ChemSusChem*, 2014;7(6):1579-1593.
52. Kan T, Strezov V, Evans TJ. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;57:1126-1140.
53. Abdallah R, Juaidi A, Savaş MA, Çamur H, Albatayneh A, Abdala S, Manzano Agugliaro F. A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development, *Energies*, 2021; 14(18): 5748.
54. Liu Z, Zhang D, Han S, Li C, Tang T, Jin W, Liu X, Lei B, Zhou C. Laser ablation synthesis and electron transport studies of tin oxide nanowires, *Advanced Materials*, 2003;15(20):1754-1757.
55. Miranda R, Sosa Bilanco C, Bustos Martinez D, Vasile C. Pyrolysis of textile wastes. I. Kinetics and yields, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007;80(2):489-495.
56. Demirbas A, Gönenç A. An Overview of Biomass Pyrolysis, *Energy Sources*, 2010;24(5):471-482.
57. Djandja OS, Zhao X, Dessie W, Kouediatouka AN, Huang Z, Hou Q, Okopi SI, Kang S, Zhuang S, Lu X. Activated nitrogen-doped porous carbon from organic solid waste to energy storage materials: Pore structure forming and N-doping paths from recent methods, *Journal of Energy Storage*, 2024;98:113181.
58. Williams PT, Reed AR. High grade activated carbon matting derived from the chemical activation and pyrolysis of natural fibre textile waste, *J Anal Appl Pyrolysis*, 2004;71:971-986.
59. Yousef S, Eimontas J, Striugas N, Tatarants M, Abdelnaby MA, Tuckute S, Kliucininkas L. A sustainable bioenergy conversion strategy for textile waste with selfcatalysts using mini-pyrolysis plant, *Energy Conversion and Management*, 2019;196:688-704.
60. Kwon D, Yi S, Jung S, Kwon EE. Valorization of synthetic textile waste using CO2 as a raw material in the catalytic pyrolysis process. *Environmental Pollution*, 2021;268:115916.
61. Ozsın G, Pütün AE. An investigation on pyrolysis of textile wastes: Kinetics, thermodynamics, in-situ monitoring of evolved gasses and analysis of the char residue, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022;10:107748.
62. Zafer Kalkınma Ajansı. Uşak İli Tekstil Geri Dönüşüm Sektör Raporu, 2019.