



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KULLANIM ÖMRÜ DOLMUŞ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ GERİ
DÖNÜŞÜM VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞE ŞENLİK

DANIŞMAN: PROF. DR. SİBEL BAŞAKÇILARDAN KABAKCI

**YALOVA
OCAK 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KULLANIM ÖMRÜ DOLMUŞ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ GERİ DÖNÜŞÜM
VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞE ŞENLİK
218107017

DANIŞMAN: PROF. DR. SİBEL BAŞAKÇILARDAN KABAKCI

YALOVA
OCAK 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “KULLANIM ÖMRÜ DOLMUŞ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ GERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Ayşe ŞENLİK



ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden hiçbir yardımını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve yoluma ışık tutan sayın danışman hocam Prof. Dr. Sibel BAŞAKÇILARDAN KABAKCI'ya çok teşekkür ederim. Hammadde tedariki konusunda destek sağlayan sayın Dođancan KOCA'ya ve TPI Kompozit Kanat Üretim Sanayi Tic. Ltd. Şti.'ye teşekkür ederim.

Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için sevgili ailem ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim. Her koşulda yanımda olan ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini hiç esirgemeyen sevgili KARAYEL ailesine ve Halil Can KARAYEL'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışması, Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi (Proje No: 2023/YL/0005) tarafından desteklenmiştir. Proje süresince desteklerinden dolayı BAP birimine teşekkür ederim.

Ocak – 2025

Ayşe ŞENLİK



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| ETİK BEYAN..... | i |
| ÖNSÖZ..... | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | v |
| SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ..... | vii |
| TABLolar LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | xi |
| ÖZET..... | xiv |
| ABSTRACT..... | xvi |
| 1.GİRİŞ..... | 1 |
| 2.RÜZGÂR ENERJİSİ..... | 3 |
| 2.1.Rüzgâr Türbininin Tarihsel Gelişimi..... | 7 |
| 2.2.Rüzgâr Türbin Kanadının Yapısı..... | 9 |
| 3.ATIK RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ YÖNETİMİ..... | 15 |
| 4.RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ GERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİ..... | 19 |
| 4.1.Kompozit Geri Dönüşüm Yöntemleri..... | 20 |
| 4.1.2.Mekanik dönüşüm/geri kazanım..... | 21 |
| 4.1.2.Kimyasal dönüşüm/geri kazanım..... | 22 |
| 5.MATERYAL VE METOT..... | 29 |
| 5.1.Materyal..... | 29 |
| 5.2.Kullanılan Ekipmanlar..... | 29 |
| 5.3.Metot..... | 29 |
| 6.TARTIŞMA VE SONUÇLAR..... | 33 |
| 6.1.ATK'nın Karakterizasyonu..... | 33 |
| 6.2.ATK'nın Piroliz Karakteri..... | 35 |
| 6.3.Yanma Profili..... | 43 |
| 7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 49 |
| KAYNAKLAR..... | 51 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 61 |



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|-------------------|--|
| ATK | : Atık Türbin Kanatları |
| Al | : Alüminyum |
| C | : Karbon |
| Ca | : Kalsiyum |
| CaCO ₃ | : Kalsiyum Karbonat |
| Cefic | : Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi |
| CO | : Karbon monoksit |
| CO ₂ | : Karbon dioksit |
| CETP | : Cam Elyaf Takviyeli Polimer |
| EuCIA | : Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği |
| GW | : Gigawatt |
| IEA | : Uluslararası Enerji Ajansı |
| KETP | : Karbon Elyaf Takviyeli Polimer |
| KOH | : Potasyum Hidroksit |
| MÖ | : Milattan önce |
| MW | : Megawatt |
| N ₂ | : Azot |
| O ₂ | : Oksijen |
| PEI | : Polieterimid |
| PAN | : Poliakrilonitril |
| PS | : Polistiren |
| PU | : Poliüreten |
| PET | : Polietilen tereftalat |
| PVC | : Polivinil klorür |
| PY-GC/MS | : Piroliz Gaz Kromatografisi ve Kütle Spektroskopisi |
| SAN | : Stiren Akrlonitril |
| Si | : Silisyum |
| TG-FTIR | : Termogravimetrik-Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi |
| TRL | : Teknoloji Hazırlık Seviyesi |



TABLolar LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1. Rüzgâr enerjisi avantajları ve dezavantajları [11] | 5 |
| Tablo 4.1. Teknoloji Hazırlık Seviyeleri [54] | 19 |
| Tablo 4.2. Kullanım ömrünü tamamlamış rüzgar türbini kanatlarının geri dönüşüm yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları [56] | 21 |
| Tablo 4.3. Mekanik geri dönüşüm süreci [59, 60] | 22 |
| Tablo 4.4. Yaygın kompozit bileşen malzemelerinin sahip oldukları enerji miktarları [80] | 25 |
| Tablo 4.5. Cam elyaf takviye edilmiş kompozitlerden piroliz işlemi kullanılarak geri kazanımı [78] | 26 |
| Tablo 6.1. ATK Elementel Analizi (kuru bazda) | 33 |
| Tablo 6.2. SEM/EDS analizine göre yüzey elementlerinin dağılımı (%) | 35 |
| Tablo 6.3. ATK numunelerine ait piroliz ve yanma karakteristikleri | 37 |
| Tablo 6.4. Temel foksiyonel gruplara ait FTIR absorpsiyon bantları, [70, 81, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104] | 38 |
| Tablo 6.5. ATK pirokokuna ait SEM/EDS analizine göre yüzey elementlerinin dağılımı (%) | 42 |
| Tablo 6.6. Atık rüzgar türbin kanadının farklı sıcaklıklardaki piroliz ürün yüzdeleri [101] | 43 |
| Tablo 6.7. ATK'nın yanma karakteristiğine ait parametreler | 45 |
| Tablo 6.8. ATK külüne ait SEM/EDS analizine göre yüzey elementlerinin dağılımı (%) | 47 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Kaynağına göre elektrik üretimi, Dünya, 1990-2023 [12]..... | 3 |
| Şekil 2.2. Kaynağa göre yenilenebilir elektrik üretimi, Dünya, 1990-2022 [13]..... | 4 |
| Şekil 2.3. Küresel rüzgâr enerjisi elektrik üretimi, Dünya, (1990-2023) [12] | 4 |
| Şekil 2.4. Ülke Bazında 2023 Yılındaki Kurulu Rüzgâr Türbini Sayıları [14]..... | 5 |
| Şekil 2.5. Kompozit kanat kullanılan ilk rüzgâr türbini [18] | 8 |
| Şekil 2.6. Rüzgâr türbininde kullanılan temel elemanlar [19] | 8 |
| Şekil 2.7. Rüzgâr Türbini Çalışma Prensibi [20] | 9 |
| Şekil 2.8. Kanat yapısında bulunan malzemeler [26]..... | 10 |
| Şekil 2.9. Rüzgar türbin kanadının yatay kesiti [27]..... | 10 |
| Şekil 2.10. Cam elyafın moleküler yapısı [30]..... | 11 |
| Şekil 2.11. Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon lifleri için temel üretim adımları [34] | 12 |
| Şekil 3.1. Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan küresel kompozit atık hacmi | 15 |
| Şekil 3.2. Atık Yönetimi Hiyerarşisi [50] | 16 |
| Şekil 4.1. Bisiklet park alanı(a), çocuk oyun parkı(b) [52]..... | 20 |
| Şekil 4.2. Bir rüzgâr türbini kanadının mekanik dönüşüm aşamaları [58]..... | 22 |
| Şekil 5.1. Kanat gövdesinden kesilmiş bir parça (a,b), balsa (c), epoksi reçine (d), taşlanmış kanat parçası(e)..... | 29 |
| Şekil 5.2. Piroliz ünitesi kurulumu..... | 31 |
| Şekil 6.1. ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (b), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (c), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (d)..... | 34 |
| Şekil 6.2. ATK EDS analizinin sonuçları | 35 |
| Şekil 6.3. ATK'nin TG eğrisi (piroliz profili) (a), ATK'nin DTG eğrisi (b)..... | 37 |
| Şekil 6.4. Piroliz uçucularına ait FTIR spektrumları | 39 |
| Şekil 6.5. ATK numunelerinin hızlı pirolizine ait ürünlerin bağlı pik alanları | 40 |
| Şekil 6.6. ATK numunesi (piroliz öncesi) (a), ATK'a ait pirokok (b)..... | 40 |
| Şekil 6.7. ATK'nin pirokonuna ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK'nin pirokonuna ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (b), ATK'nin pirokonuna ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme) (c), ATK'nin pirokonuna ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (d)..... | 41 |
| Şekil 6.8. Pirokok EDS analizi sonuçları | 42 |
| Şekil 6.9. ATK'nin yanma-TG eğrisi (a), ATK'nin yanma-DTG eğrisi (b)..... | 44 |
| Şekil 6.10. Yanma gazlarına ait FTIR grafiği | 46 |
| Şekil 6.11. ATK külüne ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK külüne ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme) (b)..... | 46 |

Şekil 6.12. ATK külüne ait EDS analizinin sonuçları..... 47





KULLANIM ÖMRÜ DOLMUŞ RÜZGAR TÜRBİN KANATLARININ GERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Dünya genelinde rüzgâr enerjisi yatırımlarının büyümesiyle, hizmet dışı kalan rüzgâr türbinleri bir çevre sorunu haline gelmektedir. Ortalama 25-30 yıllık ömürlerine ulaştıklarında, atık yönetim stratejileri gerektirir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin yaklaşık %85'i geri dönüştürülebilirken, %15'lik kısım ağırlık olarak türbin kanatlarından oluşmaktadır. Türbini kanatları cam elyaf, termoset reçineler, balsa ağacı, yapıştırıcılar ve kaplamalar içermektedir. Bu kanatların karmaşık yapıları ve biyolojik olarak parçalanamaması atık yönetimini zorlaştırır da yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım için çeşitli çözümler mevcuttur. Geri dönüşüm ve geri kazanım hedefleyen yöntemler temelde mekanik, kimyasal ve termal olarak üçe ayrılmaktadır. Bu yöntemler arasında piroliz; sentez gazı, piroliz yağı ve pirokok elde etmeye imkan vermesi sebebiyle önemlidir. Mevcut çalışma, gerçek türbin kanadı örneğinden alınarak yapılmıştır. Ağırlıklı olarak yanma profili ve karakteristikleri ile piroliz profili ve karakteristikleri üzerine durulmuştur. Elde edilen sonuçlar atık türbin kanatlarının geri dönüşüm ve kazanımında ekonomiye ve sürdürülebilirliğe önemli katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışmada, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarından Amaç 7- Erişilebilir ve Temiz Enerji, Amaç 9- Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı, Amaç 12- Sorumlu Üretim ve Tüketim, Amaç 13- İklim Eylemi gibi amaçlar desteklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, taşlanarak toz haline getirilmiş türbin kanadına önce karakterizasyon işlemi yapılmıştır. Bu karakterizasyonda atık türbin kanadının elementel analizi, kül içeriği, ısı değeri ve yapısı incelenmiştir. Daha sonra piroliz profili ve karakteristiklerini çıkarmak üzere hem termogravimetrik yöntemle hem de tüp fırın kullanılarak piroliz yapılmıştır. Pirolize ait karakteristik sıcaklıklar, dönüşüm ve ürünlerin karakterizasyonu ayrı ayrı çıkarılmıştır. Yanma profili ve karakteristiklerini çıkarmak üzere termogravimetrik yöntem uygulanmıştır. Ayrıca yanma sonrası oluşan kül yapısal olarak da incelenmiştir. Çalışmada çeşitli analizler yapılmıştır ve elde edilen bulgular tartışılmıştır. Atık türbin kanat örneklerinin ortalama üst ısı değeri 11.95 MJ/kg olup çimento fabrikalarında alternatif hammadde ya da ek yakıt olarak kullanılması için gerekli olan minimum şartı sağlamaktadır. Piroliz yağında ağırlıklı olarak Bisfenol A ve türevleri bulunmakta olup, az miktarda esterler ve benzoatlar vardır. Ortalama pirokok verimi %61.73'tür. Atık türbin kanadının yanma profili üç kademelidir, kütle kaybının en fazla görüldüğü sıcaklık 200 °C-400°C arasındadır. Hizmet ömrünü dolduran rüzgar türbin kanatlarının ya da diğer bir ifadeyle atık rüzgar türbin kanatlarının geri kazanımı araştırmaya açık, birçok detayın aynı anda düşünülmesini gerektiren ve sürdürülebilir bir yaklaşımla yönetilmesi gereken bir sorundur. Mevcut çalışma, gelecekte yapılacak birçok çalışmaya da referans olacaktır. Ayrıca, atık türbin kanatlarının yönetimi ülkemizde henüz tam olarak tanımlanmamış olması nedeniyle bu alanda da çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbin kanatları, kompozit atıklar, geri dönüşüm, geri kazanım, dögüsel ekonomi



ASSESSMENT OF RECYCLING AND RECOVERY OPTIONS OF END-OF-LIFE WIND TURBINE BLADES

ABSTRACT

With the global growth of wind energy investments, decommissioned wind turbines are becoming an environmental concern. Upon reaching their average lifespan of 25–30 years, they require waste management strategies. While approximately 85% of wind energy systems are recyclable, the remaining 15% mainly consists of turbine blades. These blades are composed of glass fiber, thermoset resins, balsa wood, adhesives, and coatings. Although the complex structure and non-biodegradability of these blades pose challenges for waste management, various solutions are available for reuse, recycling, and recovery. Recycling and recovery methods are generally classified into three categories: mechanical, chemical, and thermal processes. Among these methods, pyrolysis is particularly significant as it enables the production of syngas, pyrolysis oil, and char. This study was conducted using a real turbine blade sample. The primary focus was on the combustion profile and characteristics, as well as the pyrolysis profile and characteristics. The results obtained will provide significant contributions to both economic and sustainability aspects of waste turbine blade recycling and recovery. Additionally, this study aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), specifically Goal 7 – Affordable and Clean Energy, Goal 9 – Industry, Innovation, and Infrastructure, Goal 12 – Responsible Consumption and Production, and Goal 13 – Climate Action.

In this thesis, a turbine blade, ground into powder, was first subjected to a characterization process. This characterization involved elemental analysis, ash content determination, calorific value measurement, and structural analysis of the waste turbine blade. Subsequently, pyrolysis was performed using both thermogravimetric analysis and a tube furnace to determine the pyrolysis profile and characteristics. Characteristic pyrolysis temperatures, conversion rates, and product characterization were separately examined. The combustion profile and characteristics were also determined using thermogravimetric analysis, and the structural properties of the ash formed after combustion were analyzed. Various analyses were conducted in this study, and the findings were discussed in detail. The average higher heating value (HHV) of the waste turbine blade samples was found to be 11.95 MJ/kg, meeting the minimum requirement for use as an alternative raw material or supplementary fuel in cement factories. The pyrolysis oil primarily contained bisphenol A and its derivatives, with small amounts of esters and benzoates. The average char yield was 61.73%. The combustion profile of the waste turbine blade exhibited three stages, with the highest mass loss occurring between 200°C and 400°C. The recovery of end-of-life wind turbine blades, or in other words, waste wind turbine blades, remains an open research topic that requires a holistic approach and must be managed with sustainability in mind. This study will serve as a reference for many future studies. Additionally, since the management of waste turbine blades has not yet been fully defined in our country, further research in this field is necessary.

Keywords: Waste management, Wind turbine blade, recycling, recovery, circular economy



1. GİRİŞ

Birçok ÷lke, sürdürülebilir enerji talebini karşılamak, düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi kolaylaştırmak ve net sıfır emisyon hedefini gerçekleştirmek için yenilenebilir enerji yatırımlarını hızlandırmak zorundadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2024 yılında yayınlamış olduğu “Integrating Solar and Wind” isimli raporu, rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji teknolojileri arasında, güneş enerjisinin ardından en yüksek ikinci büyüme oranına sahip olduğunu ortaya koymaktadır [1]. Ayrıca, Küresel Rüzgâr Enerjisi Konseyi, 2030'da dünya genelinde kara üstü toplam kurulu rüzgâr kapasitesinin 1787 GW olacağını ve net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için 2050 yılına kadar yeni kapasitelerin ekleneceğini belirtmektedir [2]. Dünya genelinde rüzgâr enerjisi yatırımlarının hızlı büyümesiyle birlikte, hizmetten çıkartılan rüzgâr türbinleri acil bir çevre sorunu haline gelecektir. Ortalama 25-30 yıllık ömürlerine ulaştıklarında, hizmet dışı bırakılan türbinler, maksimum geri kazanımı ve minimum yeraltı depolamasını önceliklendiren atık yönetim stratejileri gerektirir, bu da çevresel faydaları en üst düzeye çıkarmayı amaçlar [3]. Avrupa Birliği'nin rüzgâr enerjisi sistemleri için atık yönetimi uygulamalarını 2025 yılına kadar düzenli depolama yasağı ile uyumlu hale getirme kararı, bu sorunun aciliyetini vurgulamaktadır. Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin, rüzgâr enerjisi sistemlerinin tüm bileşenleri için kapsamlı yönetim sistemleri geliştirmekte aktif olarak çalışırken, Türkiye bu konuda henüz bir mevzuat ya da yönetmelik açıklamamıştır.

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin yaklaşık %85'i geri dönüştürülebilir komponentlerden oluşmaktadır [4]. Ancak, kalan %15'i esas olarak türbin kanatlarından oluşmaktadır. Rüzgâr türbini kanatları genellikle birkaç ana bileşeni içerir ve bu bileşenler belirli tasarımlara ve üreticilere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bu nedenle, kapsamlı bir bileşim sunmak, potansiyel malzeme varyasyonları nedeniyle zordur. Genel olarak, rüzgâr türbini kanatları cam elyaf, termoset reçineler, balsa ağacı (veya köpük çekirdek), yapıstırıcılar, kaplamalar, katkı maddeleri ve dolgu maddelerini içerir [5]. Karmaşık yapıları, çok malzemeli bileşimleri ve biyolojik olarak parçalanamayan doğaları nedeniyle zorluklar oluştursa da, hizmet dışı bırakılan rüzgâr türbini kanatlarının yeniden kullanımı, geri dönüştürülmesi ve geri kazanılması için çeşitli çözümler mevcuttur [6]. Hizmet dışı bırakılan rüzgâr türbini kanatlarını etkili bir şekilde değerlendirmek için, yapısal bütünlüklerinin, geliştirme potansiyellerinin (fonksiyonelleştirme) ve olası uygulamalarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi esastır. Birçok çalışma, bu kanatların köprüler ve ses bariyerleri gibi yapılar için bileşenler olarak hizmet vererek inşaat, mimarlık ve altyapı gibi çeşitli endüstrilerde yenilikçi kullanımlar için yeniden kullanılabilceğini göstermiştir [4, 7]. Yeniden kullanımın uygulanabilirliğini belirleyen temel

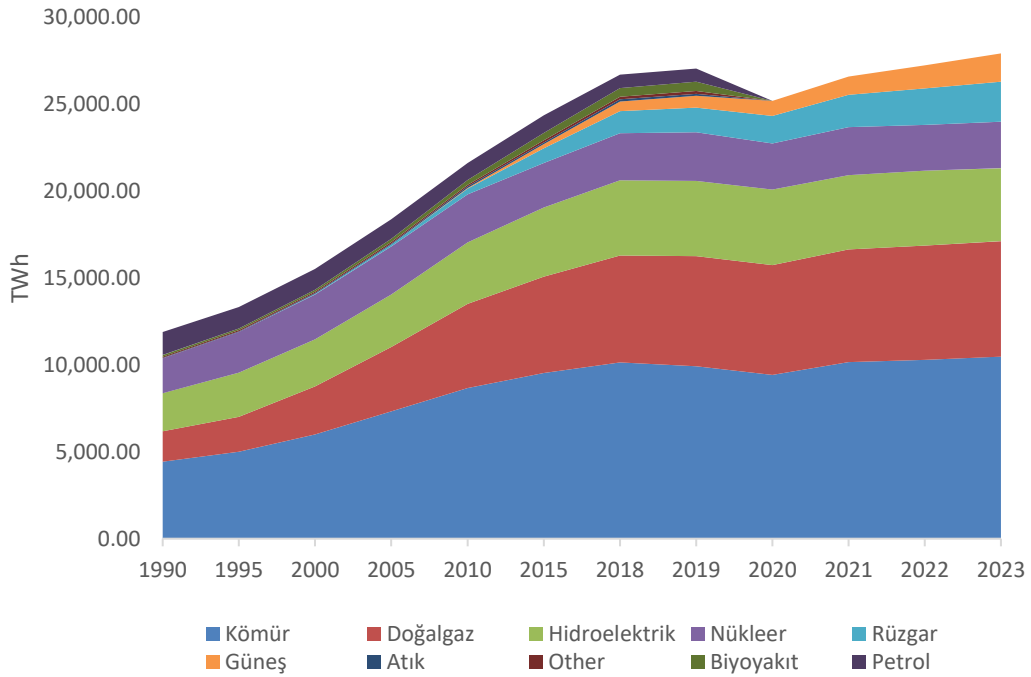
faktörler, mekanik özellikler ve yapısal bütünlükteki bozulma derecesidir. Hizmet dışı bırakılan rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüştürülmesi, kompozit malzemelerin bileşenlerinin ayrılmasını içerir. Cam elyaf, reçineler ve diğer bileşenleri verimli bir şekilde ayırmak için mekanik, termokimyasal ve kimyasal işlemler kullanılabilir. Son yıllarda, geri kazanılan malzemelerde daha yüksek saflık elde etmek için çözücü bazlı yöntemlere (solvoliz) ve depolimerizasyona odaklanan araştırmalar artmıştır [8]. Hizmet dışı bırakılan rüzgâr türbini kanatlarından elde edilen malzemelerin yeni uygulamalar için yeniden kullanılması başka bir seçenek sunar. Cam elyaf kompozitler üzerindeki çalışmalar, geri kazanılan cam elyafın inşaat ve otomotiv endüstrilerinde takviye malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir [9]. Geri dönüşüm süreçlerinden elde edilen reçinelerin ve diğer kimyasalların çeşitli yapıştırıcılar, kaplamalar ve kompozit formülasyonlarında kullanılabilmesi öngörülmektedir. Ayrıca, kanat malzemelerinin piroliz ve gazlaştırılması yoluyla alternatif yakıtların üretimi, geri kazanım için başka yollar sunmaktadır. Hizmet dışı bırakılan türbin kanatlarının yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı, atık bertaraf yüklerinin ve çevresel etkinin önemli ölçüde azaltılmasını vaat etmektedir [10]. Ancak, uygun yöntemlerin seçimi, ekonomik uygulanabilirlik, lojistik zorlukların çözümü ve atık yönetimi düzenlemelerini yöneten yasal çerçevelere uyum dikkate alınarak yapılmalıdır.

Bu tez çalışması, atık yönetimi bağlamında ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının (tezin bundan sonraki kısmında atık türbin kanatları (ATK) olarak anılacaktır) yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı için seçenekler üzerine kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Bu kapsam içerisinde ATK'nın enerji geri kazanımı amaçlı değerlendirilebilmesi araştırılmış, piroliz ve yanma karakterleri üzerine ayrıntılı deneysel çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ayrıca, çeşitli teknolojilerin etkinliği ve uygulanabilirliği karşılaştırılmış, rüzgâr enerjisini etkin şekilde kullanan, geniş deneyime sahip ülkelerin uygulamaları ve mevcut atık yönetim zorlukları da incelenmiştir.

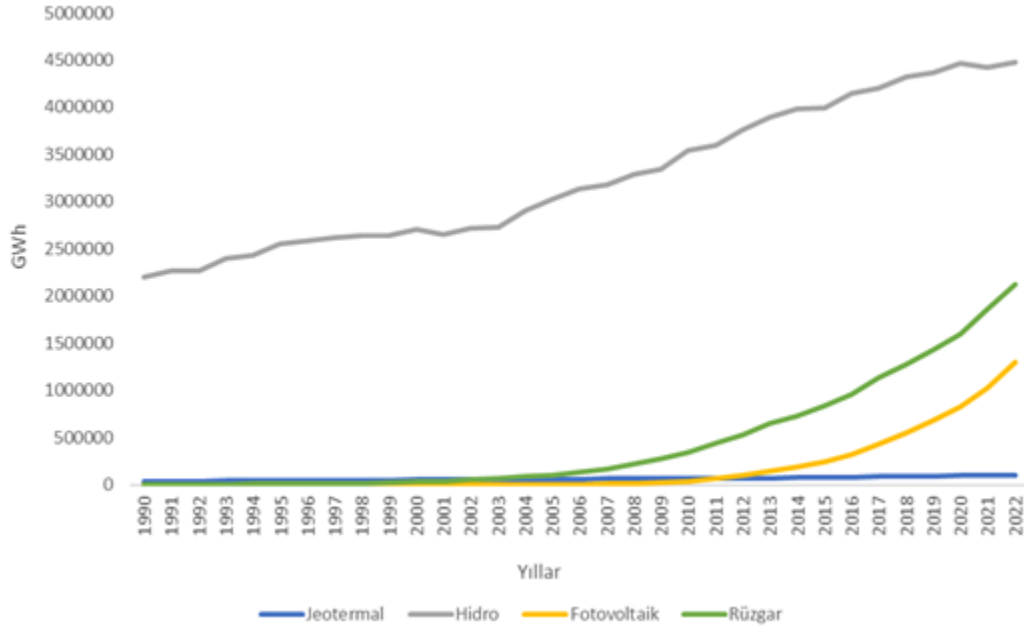
2. RÜZGÂR ENERJİSİ

Rüzgâr enerjisi aslında ikincil düzeyde bir enerji şeklidir. Güneş'in Dünya yüzeyini ısıtması sonucu havada yoğunluk ve basınç farklarından dolayı sıcaklık farkları meydana gelmektedir. Bu eşit olmayan ısı dağılımının nedeni ise ısıtılan maddenin (toprak, su) farklı ısı kapasitelerine sahip olmasıdır. Bu yoğunluk ve basınç farkları sebebiyle oluşan hava hareketleri farklı rüzgâr türlerinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. En basit tanımıyla rüzgâr enerjisi, hareket halindeki havanın kinetik enerjisinden elektrik veya mekanik güç üretmek için yararlanılan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Havanın sahip olduğu kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşmesinde sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri rol oynamaktadır [11]. Rüzgâr enerjisi, Güneş var olduğu sürece Dünyamıza hizmet edebilecek yenilenebilir ve kirlenici emisyonu olmayan bir enerji kaynağıdır.

IEA'dan alınan verilere göre günümüzde elektriğin büyük bir miktarı hala kömür ve doğalgaz gibi fosil kökenli kaynaklardan üretilmektedir (IEA, 2021). Şekil 2.1.'de Dünya genelinde 1990-2023 yılları arasında kaynaklara göre elektrik üretimi dağılımı verilmiştir [12]. Grafik incelendiğinde, 1990'lı yılların başında elektrik üretiminin yoğun olarak fosil yakıta bağlı olduğu ve çok düşük oranda yenilenebilir kaynak kullanıldığı görülmektedir. Zamanla fosil kaynaktan elektrik üretimi artmaya devam etse de toplam üretimde yenilenebilir enerji kaynakları payını arttırmıştır. Özellikle rüzgâr enerjisindeki artış oldukça dikkat çekmektedir.

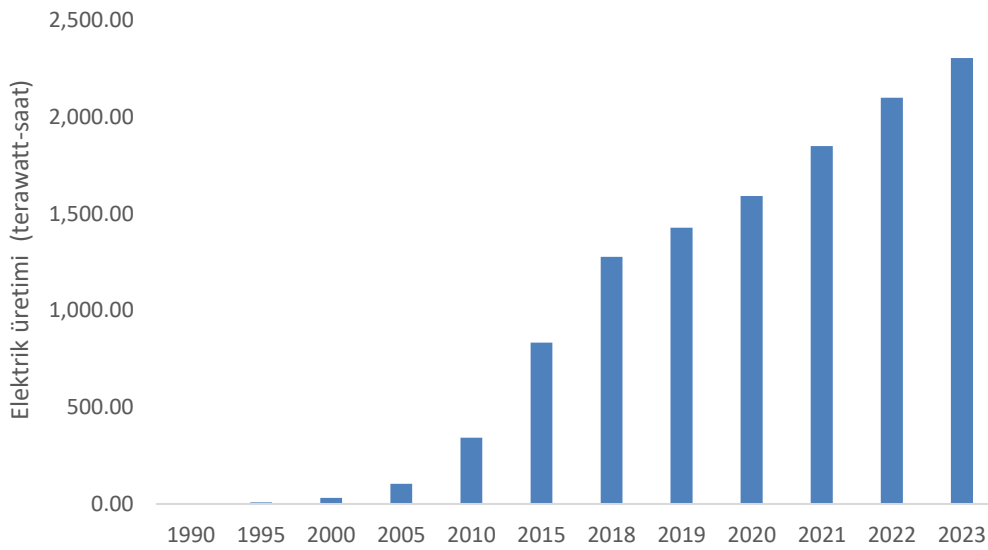


Şekil 2.1. Kaynağına göre elektrik üretimi, Dünya, 1990-2023 [12]

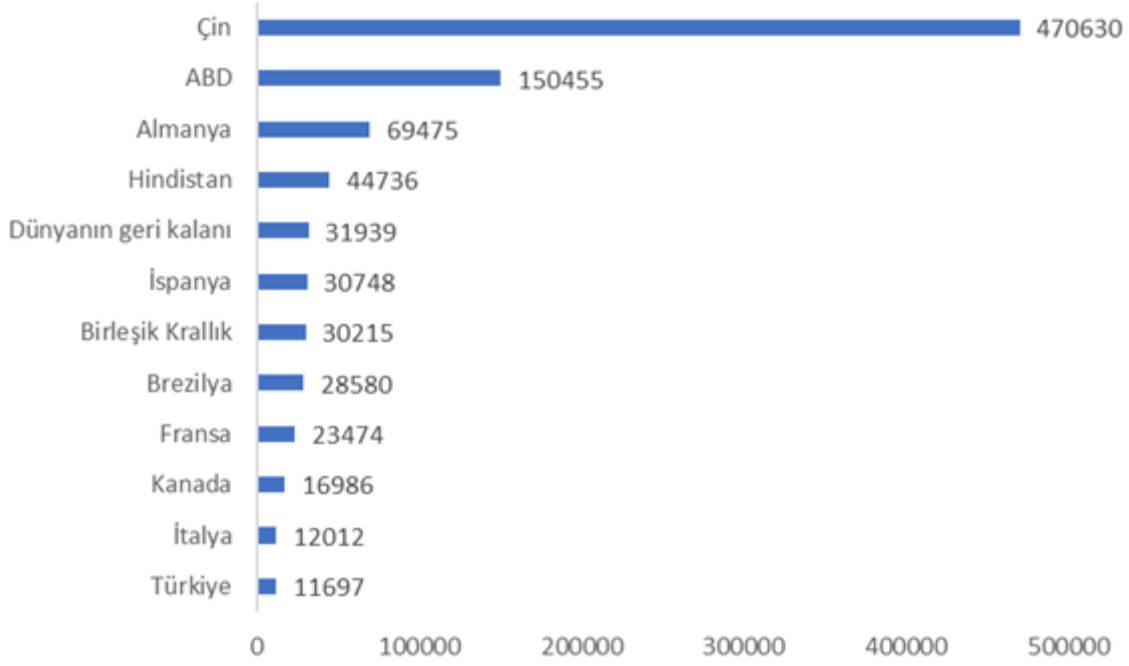


Şekil 2.2. Kaynağa göre yenilenebilir elektrik üretimi, Dünya, 1990-2022 [13]

Küresel bazda yenilenebilir elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 2.2.'de gösterilmektedir. Şekil 2.1. ve Şekil 2.2. incelendiğinde, dünya genelinde rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretiminin 2000'lerin başından itibaren hızla arttığı görünmektedir. Şekil 2.3.'te verilmiş olan küresel rüzgâr enerjisi elektrik üretimi değişimi bu artışı doğrular niteliktedir. Şekil 2.4.'te görüldüğü üzere son yıllarda offshore (deniz üstü) kurulumları da yapmaya başlayan Çin ve Amerika'nın dünya genelinde daha fazla türbine sahip olduğu açıkça gözükmektedir.



Şekil 2.3. Küresel rüzgâr enerjisi elektrik üretimi, Dünya, (1990-2023) [12]



Şekil 2.4. Ülke Bazında 2023 Yılındaki Kurulu Rüzgâr Türbini Sayıları [14]

Rüzgâr türbinleri kullanarak elektrik üretmenin birçok avantajı vardır ve bu avantajlar, rüzgâr türbinlerinin hızlı gelişiminin itici gücü olmuştur [11]. Rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretiminin birçok avantajı ve geliştirilmesi gereken unsurları Tablo 2.1.'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.1. Rüzgâr enerjisi avantajları ve dezavantajları [11]

| Avantajlar | Dezavantajlar |
|--|---|
| <p>Su tasarrufu: Kömür, petrol, gaz veya nükleer yakıt kullanan geleneksel enerji santrallerinde büyük miktarlarda su kullanılmaktadır. Rüzgâr çiftliklerinde ise su kullanılmaması onu avantajlı kılan özelliklerinden biridir.</p> <p>Fosil yakıtları elde etmek üzere yapılan madencilik faaliyetlerinin azalması: Fosil yakıtların (petrol, doğal gaz ve kömür) çıkarılması ve taşınması ciddi çevresel etkilere sahiptir. Rüzgâr çiftliklerinin kurulum aşamasındaki çevresel etki nispeten daha azdır ve türbinlerin etrafında çiftçilik ve diğer faaliyetler yapılabilir.</p> | <p>Rüzgârın süreksizliği: Rüzgâr öngörülmesi zor bir doğal kaynaktır. Bu, rüzgâr çiftliklerinden elektrik üretimi ile ilgili en önemli problemlerden biridir. Rüzgâr hızı her zaman istenilen mertebelerde olmayabilir. Arz-talep dengesizliği olabilir. Çözüm, elektrik gerektiğinde kullanmak üzere depolamaktır.</p> <p>Yüksek rüzgâr potansiyeline sahip alanların uzakta olması: En iyi rüzgâr alanları genellikle şehir merkezlerinden uzak, dağlık veya tepelik bölgelerde bulunur. Bu, karada üretilen elektriğin müşterilere ulaşması için pahalı yüksek voltaj kablolarıyla taşınması gerektiği anlamına gelir.</p> |

| Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|--|
| <p>Kısa sürede elektrik üretimine geçiş: Rüzgâr çiftlikleri nispeten kısa bir sürede devreye alınabilir ve ilk tasarımdan elektrik üretimine geçiş 2 veya 3 yıl içerisinde gerçekleşebilir. Bu, bir nükleer enerji santralini tasarlamak, inşa etmek ve devreye almak için gereken on yıllar ile karşılaştırılabilir. Rüzgâr enerjisi endüstrisinin son 40 yıldaki hızlı büyüme hızı, rüzgâr çiftliklerinin hızla devreye alınabilmesine bağlı olabilir.</p> | <p>Estetik ve gürültü: Rüzgar çiftliklerinin yakın olduğu yerleşimlerdeki bireyler, rüzgâr türbinlerinin görüntüsünden ve sesinden hoşlanmayabilir. Fakat son yıllardaki teknolojik ilerlemelerle gürültü problemi daha azaltılmıştır.</p> |
| <p>Maliyet etkinliği: Türbin maliyetleri, iyileştirilmiş tasarımlar ve seri üretim sayesinde önemli ölçüde azalmıştır, böylece bugün rüzgâr çiftliklerinden elektrik üretme maliyeti, fosil yakıtlardan elde edilen elektrikle oldukça rekabetçidir.</p> | <p>Türbin kanatlarının doğal yaşama zarar verebilmesi: Rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması çevre koşulları gözeticilerle yapılsa da bazen kuş ölümlerine sebep olmaktadır. Modern, çok büyük kanatlı, yavaş dönen türbinlerin daha hızlı dönen türbinlere göre çok daha az kuş ölümüne neden olduğu bilinmektedir.</p> |
| <p>İstihdam ve yerel kaynaklar yaratma: Rüzgâr türbini endüstrisi hızla büyüyen bir endüstridir ve türbinlerin üretim süreçlerinde, taşınmasında, kurulmasında ve çalışan türbinlerin bakımında binlerce işçi istihdam etmektedir. Rüzgâr enerjisi projeleri, yerel kaynakların, iş gücünün, sermayenin ve hatta malzemelerin gelişmesine büyük katkı sağlayabilir.</p> | <p>Güvenlik: Türbinler yerleştirildikten sonraki asıl güvenlik tehlikesi, bir kanadın kopma olasılığıdır. Bu, yakındaki insanlara veya hayvanlara ciddi zarar verebilir. Ayrıca eğilen bir kanat kulenin çökmesine neden olabilir ve bu da ciddi hasara yol açabilir. Bundan dolayı rüzgâr türbinleri, insan yerleşim yerlerinden uzak yerlere inşa edilmelidir.</p> |
| <p>Çiftçiler, çiftlik sahipleri ve ormancılar için gelir kaynağı ve şebeke operatörleri için kaynak: Karasal rüzgâr çiftlikleri için arazi, elektrik tedarik şirketlerine kiralanır ve bu da arazi sahipleri için temiz bir kar sağlar. Normal faaliyetler, türbinlerden çok az etkileşimle devam edebilir. Kira süreleri genellikle 25 ile 50 yıl arasındadır.</p> | <p>Işık ve gölge frekansı: Rüzgâr türbinleri, türbin kanatlarının güneş ışığını kesintiye uğratması nedeniyle gölge titreşimi üretir. Araştırmalar, bu titreşimin bazı epilepsi hastalarında nöbetlere neden olabileceğini göstermiştir. Dönen kanatların hızı kontrol edilebilir ve yavaş dönen türbinler, epilepsi hastaları, kuşlar ve yarasalar için daha az tehlike yaratabilir.</p> |
| <p>Hızlı güç sağlama: Ulusal şebekeler, ülkenin ihtiyaçlarını karşılamak için sabit bir elektrik seviyesi (baz yük) sağlar. Elektrik arzının aniden artırılması gerektiğinde, yeni bir enerji santralini başlatmak günler alabilir. Eğer rüzgâr esiyorsa veya rüzgâr enerjisi depolanmışsa, arz sadece dakikalar içinde ulusal şebekeye beslenebilir.</p> | <p>Başlangıç maliyeti: Bir rüzgar çiftliği kurmanın başlangıç maliyeti, belki de en ciddi engeldir. Bu nedenle birçok hükümet, rüzgâr enerjisini teşvik etmek için hala sübvansiyonlar sunmaktadır. Ancak, türbinin ömrü boyunca hem finansal hem de çevresel olarak getirileri bu maliyeti fazlasıyla telafi etmektedir.</p> |

2.1. Rüzgâr Türbininin Tarihsel Gelişimi

Rüzgâr enerjisi çok eski zamanlardan bu yana insanoğlunun farklı amaçlar için kullanmaya çalıştığı bir kaynak olmuştur. Yel değirmenleri ve su ile çalışan değirmenler, 18. yüzyılın Sanayi Devrimi'nden önce 1200 yılı aşkın bir süre boyunca tek güç jeneratörü olarak kullanılmıştır. Antik çağda Mısır, İran, Mezopotamya ve Çin'de yel değirmenlerinin kullanılmış olduğu bilinmektedir. MÖ 7. yüzyılda Babil Kralı Hammurabi, Fırat ve Dicle nehirlerinin verimli ovalarını dikey eksenli rüzgâr makineleri kullanarak sulamak için bir planı hayata geçirdiği belirtilmektedir [15].

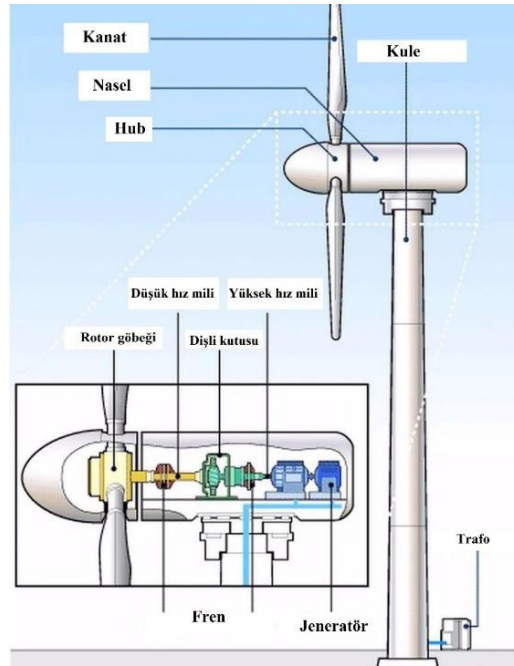
Rüzgâr türbini teknolojisi, aerodinamik, mekanik, yapı dinamikleri, meteoroloji ve elektrik mühendisliği gibi çok disiplinli alanları içeren karmaşık bir teknolojidir. Rüzgâr türbinlerinin tarihi, 1887'de İskoçya'da elektrik üretmek amacıyla bilinen ilk rüzgâr türbini inşa edilmesiyle başlamıştır. Bu türbin, Glasgow'daki Anderson Koleji'nde görev yapan Prof. James Blyth tarafından yapılmıştır. Blyth'in 10 metre yüksekliğinde, kumaş kanatlı rüzgâr türbini Fransız Camille Alphonse Faure tarafından geliştirilen akümülatörleri şarj etmek için kullanılmıştır. Ardından 1988 yılında ABD'nin Ohio eyaletindeki Cleveland kentinde Charles F. Brush tarafından [16] ve 1889 yılında Poul La Cour tarafından Danimarka'nın Askov kentinde kullanılmıştır [17]. 1941 yılında, ABD'nin Vermont eyaletinde S. Morgan-Smith şirketi tarafından üretilen çelik kanatlı türbinler kullanılarak rüzgârdan elektrik üretilmeye çalışılmıştır. Kanatlardan biri, sadece birkaç yüz saatlik aralıklı çalışmanın ardından bozulmuştur. Böylece, uygun malzeme seçiminin önemi ve metallerin rüzgâr kanadı malzemesi olarak kullanılmasının sınırlamaları, rüzgâr enerjisi gelişiminin erken tarihinde ortaya çıkmıştır.

Rüzgâr türbininin enerji üretimi için kullanılmasına ilişkin bir sonraki örnek, Johannes Juul tarafından tasarlanan, çelik direklerden yapılmış üç kompozit kanat ve ahşap kaburgalarla desteklenen alüminyum gövdelere sahip, 1956-1957 yıllarında Danimarka'nın Gedser sahiline kurulan Gedser rüzgâr türbinidir [18]. 1970'lerden sonra rüzgâr türbinleri çoğunlukla kompozit kanatlarla üretilmiştir. Gedser türbini (üç kanatlı, 24 m rotor, 200 kW) rüzgâr enerjisinin ilk başarı hikayesidir ve 11 yıl boyunca bakım yapılmadan çalışmıştır (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Kompozit kanat kullanılan ilk rüzgâr türbini [18]

Bu şekilde, rüzgâr enerjisi üretim teknolojisinin başarısı ile kompozit malzemelerin uygulanması arasındaki bağlantı en başından itibaren kurulmuştur. Bu teknoloji, yıllar içinde olgunlaşarak en güvenilir haline gelmiş, birkaç kilovattan çok megavatlık büyük türbinlere evrilmiştir. Bu süreçte tasarımlar da optimize edilmiştir. Şekil 2.6.'da bir rüzgâr türbininde kullanılan elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Rüzgâr türbininde kullanılan temel elemanlar [19]

Rüzgâr türbinleri, aerodinamik rotorları aracılığıyla rüzgâr enerjisini mekanik güce, ardından jeneratörler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Rüzgâr Türbini Çalışma Prensibi [20]

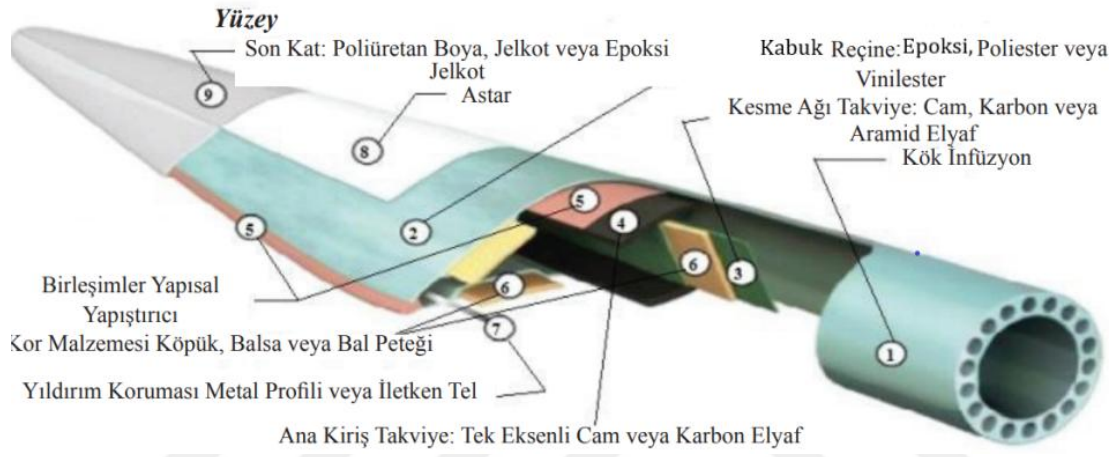
Modern türbinlerde, dişli kutusu olmayan veya çok kutuplu jeneratörler kullanılabilir. Türbinler, aerodinamik rotorlar, iletim sistemi, jeneratör ve kontrol sistemlerinden oluşur. İletim sisteminde dişli kutuları yüksek torku hızlandırmak için kullanılırken, modern sistemlerde dişli kutusuna ihtiyaç kalmayabilir. Jeneratörler ise mekanik gücü elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik bileşenlerdir [21].

2.2. Rüzgâr Türbin Kanadının Yapısı

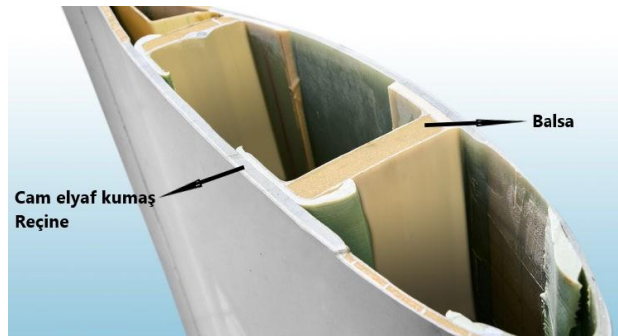
Rüzgâr türbin kanat yapısı, enerji üretimini ve dayanıklılığı maksimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Kanatlar genellikle kompozit malzemelerden, özellikle de cam elyafı ve epoksi reçine gibi hafif ama sağlam materyallerden yapılmaktadır. Kompozit malzemeler, yeni ve istenen özelliklere sahip malzemeler elde etmek amacıyla bir araya getirilen, pratik olarak birbirleri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapılar olarak tanımlanır [22]. Bir sistem olarak kompozit malzeme, takviye elemanları (lifler, partiküller, tabakalar) ve bu elemanları bir arada tutan matrisin belirli fiziksel ve kimyasal koşullar altında birleştirilmesiyle oluşur. Genellikle düşük mukavemetli ve düşük elastisite modüllü reçine (matris) ile, reçineye göre daha az miktarda bulunan takviye elemanlarının yapı içinde dağıtılmasıyla oluşturulurlar [23]. Aerodinamik özellikler, kanatların hava akışını en iyi şekilde yönlendirmesini ve rüzgâr enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlamaktadır. Kanatların şekli, uzunluğu ve eğimi, türbinin konumlandırıldığı bölgedeki rüzgâr hızları ve yönlerine göre belirlenmektedir [24]. Ek olarak, kanatların ucundaki özel tasarımlar, gürültü seviyelerini azaltarak ve performansı artırarak türbinin verimliliğini daha da yükseltmektedir. Kanatlar, cam/karbon elyaf takviyeli polimer, reçine, epoksi ve balsanın birleşiminden oluşan termoset kompozit bir malzemeden yapılmaktadır. Aynı zamanda kompozit ürünlerde dolgu malzemeleri de kullanılmakta ve bunlara ara malzeme denmektedir. Bu malzemeler, kompozit

ürünlerin eğilme dayanımını artırarak kullanım alanlarını genişletir. Ara malzeme kullanımı, yaklaşık %3'lük bir ağırlık artışı ile eğilme dayanımını 3,5 kat, rijitliği ise 7 kat artırmaktadır. Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan başlıca ara malzemeler şunlardır: Polivinil klorür (PVC), Polietilen tereftalat (PET), Poliüretan (PU), Polistiren (PS), Polieterimid (PEI), Stiren akrilonitril (SAN) ve benzeri köpükler [25].

Bir rüzgâr türbin kanadı birçok farklı malzemeden ve katmanlardan oluşmaktadır. Şekil 2.8.'de kanat yapısında bulunan materyaller ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir. Şekil 2.9.'da da bir rüzgar türbin kanadının yatay kesiti verilmiştir.



Şekil 2.8. Kanat yapısında bulunan malzemeler [26]

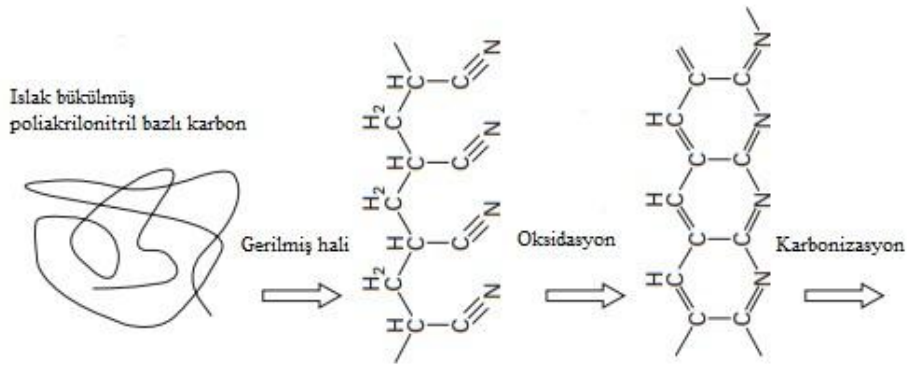


Şekil 2.9. Rüzgar türbin kanadının yatay kesiti [27]

Cam elyaflar, amorf bir malzeme olan camın çok ince liflerinden yapılır (Şekil 2.10.). Bu lifler belirgin bir mikro yapıya sahip olmadıkları için mekanik özellikleri, büyük ölçüde bileşim ve yüzey bitişine bağlı olarak izotropiktir. Cam elyaflar, genellikle birçok polimer üründe takviye edici madde olarak kullanılır ve bu şekilde elde edilen kompozit malzemeler, fiber takviyeli polimer veya cam takviyeli plastik olarak bilinir. Halk arasında bu malzemelere "fiberglass" denir. Silika, oksinitrit, fosfat ve halojen camlar gibi birçok cam türü olmasına rağmen,

bir süre boyunca sabit bir yüke maruz kaldıklarında aşındıkları anlamına gelmektedir. Bu, anlık yükleme ile güvenli olabilecek yüklerde zamanla arızaya yol açmaktadır [33].

Karbon fiberler gibi gelişmiş kompozitler, toplam kompozit pazarının ağırlıkça yalnızca %1,5'ini temsil etmektedir. Ancak, yüksek maliyetli hammaddeler ve karmaşık bir üretim süreci nedeniyle üretimi pahalı olduğundan net pazar değerinin %20'sinden fazlasını oluştururlar. Karbon fiberler çoğunlukla mukavemet ve sertlik için tasarlanır, ancak birden fazla sınıfta mevcuttur. Karbon içeriğine ve fiber yapısına bağlı olarak elektrik iletkenliği, termal ve kimyasal özellikler bakımından değişiklik gösterebilirler. Ticari karbon fiberler, organik öncül malzemelerin filamentlere ekstrüde edilmesiyle yapılır ve daha sonra bunları karbona dönüştürmek için karbonize edilir. İstenen özelliklere bağlı olarak farklı öncüller ve karbonizasyon süreçleri kullanılmaktadır [34].



Şekil 2.11. Poliakrilonitril (PAN) bazlı karbon lifleri için temel üretim adımları [34]

Ultra yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılan PAN (Poliakrilonitril bazlı karbon lifleri) bazlı lifler, dünya çapındaki toplam karbon lifi üretiminin yaklaşık %90'ını oluştururken, mezofaz katran bazlı lifler yüksek modül ve ısı yönetimi uygulamaları için kullanılır. Şekil 2.11.'de PAN bazlı karbon lifinin karbonizasyonu gösterilmiştir. Selüloz bazlı lifler neredeyse piyasadan kaybolmuştur ve buharla yetiştirilen lifler, yapısal uygulamalar için hâlâ bir atılım beklemektedir [35].

Günümüzde kanat üretimi için yoğunlukla cam elyaf takviyesi kullanılıyor olsa da 60 metre uzunluğundaki türbin kanatlarında karbon fiber kullanımı, %100 cam elyafa kıyasla toplam kanat kütlelerini %38 oranında azaltırken, maliyeti %14 oranında düşüreceği tahmin edilmektedir [36]. Karbon lifleri, geleneksel E-glass liflerine çok umut verici bir alternatif sunmaktadır. Diğer alternatifler arasında yüksek mukavemetli camlar, bazalt, aramid ve doğal lifler bulunmaktadır [37]. Karbon lifleri, daha yüksek sertlik sağlar ancak dezavantajları arasında

daha yüksek maliyet, daha düşük basma mukavemeti ve yerel kusurlara (örneğin, hizalama hataları) karşı yüksek hassasiyet yer alır. Karbon ve E-glass liflerinin kombinasyonunun yapıldığı çalışmalarda, daha yüksek sertlik (karbon lifleri sayesinde) ve sınırlı maliyet artışı sağladığı için umut verici bir çözüm olarak önerilmektedir [6, 36].

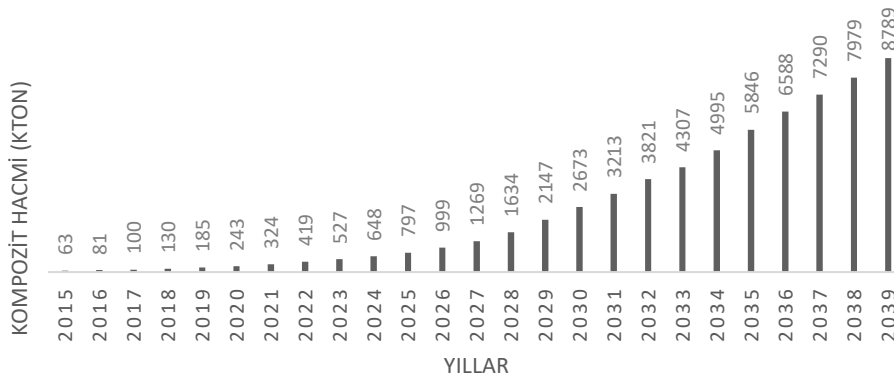
Reçine matrisi açısından bakıldığında, termoplastikler, geleneksel olarak kullanılan termosetlere kıyasla geri dönüştürülebilirlik gibi bazı avantajlara sahiptir. Son yıllarda, bu malzeme gruplarının rüzgâr türbini kanat kompozitleri için uygulanabilirliği üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır [32]. Reçineler, organik veya sentetik kaynaklardan türetilmiş viskoz, sıvı polimerlerdir. Polimer kimyası ve malzeme biliminde, reçine bitkisel veya sentetik kökenli, katı veya yüksek viskoziteli bir madde olup genellikle polimerlere dönüştürülebilir. İki ana reçine türü vardır; bunlar termoset ve termoplastik reçinelerdir. Termoset epoksi reçineler, alifatik, alisiklik veya aromatik omurga yapılarıyla karakterize edilir ve moleküler yapılarında iki veya daha fazla aktif epoksi grubu içerirler. Bu reçineler, çözünmez ve erimez özellikler sergiler ve bu nedenle rüzgâr türbini kanadı üretimi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar [38]. Termoset reçineler, geniş uygulama alanlarına sahip farklı türlerde bulunur. Polyester reçineler, doymamış ve doymuş olmak üzere iki sınıfa ayrılır; doymamış polyesterler, yüksek viskoziteli ve şeffaf pembe sıvılardır ve genellikle cam elyaf laminasyonunda kullanılır. Epoksi reçineler ise yüksek dayanıklılık, güç ve kimyasal direnç sunar, çeşitli formlarda bulunur ve sertleştirilmek için sertleştiriciye ihtiyaç duyar. Poliüretan reçineler, sertleştikten sonra daha yumuşak ve esnek bir yapı oluşturur ve geniş bir uygulama yelpazesi sunar, inşaat sektöründe reçine zeminlerde ve giriş yollarında kullanılır. Fenolik reçineler, yüksek ısı direnci, alev geciktirici özellikler ve boyutsal stabilite ile tanınır ve genellikle fren balataları ve otomotiv parçaları gibi yüksek sıcaklık performansı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Vinil ester reçineleri ise polyester ve epoksi reçinelerinin avantajlarını birleştirir, korozyon ve kimyasal direnç sunar ve genellikle tanklar ve borular gibi yapısal uygulamalarda tercih edilir [39].

Türbin kanadı yapımında yoğun olarak kullanılan epoksi reçineler, iyi mekanik özelliklere ve kimyasal dirence sahiptir ve bu nedenle genellikle kaplama ve yapıştırma işlemlerinde kullanılır. Epoksi ve epoksi bazlı kompozitler üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır [40]. Epoksi reçine, genellikle karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi bazlı kompozitler gibi ileri kompozit malzemelerde lifleri sabitlemek veya sınırlamak için bir yapıştırıcı malzeme olarak kullanılır, fiber takviyelere iyi yapışma, çeşitli sertleştirme sistemleriyle uyumluluk, daha iyi termal, mekanik, elektriksel ve kimyasal özellikler bulunmaktadır, buna rağmen, epoksinin

mekanik özelliklerini, hasar direncini, aşırı çevresel dayanıklılığını ve yüksek sıcaklık performansını artırma yönünde hala birçok araştırma yapılmaktadır. Epoksi bazlı kompozitlerin performansı, epoksi reçine sistemlerinde ikinci faz malzemenin dağıtılmasıyla geliştirilmektedir [41, 42]. Epoksi reçinelerinde fenolik grupların kullanımı, özellikle rüzgâr türbini malzemelerinde çeşitli faydalar sağlayabilir. Fenolik gruplar, epoksi reçinelerin ısıya dayanıklılığını ve mekanik performansını artırabilir, bu da rüzgâr türbinlerinin yüksek sıcaklık ve çeşitli çevresel koşullarda daha dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, fenolik modifikasyonlar, epoksi reçinelerin kimyasal dirençlerini artırarak çevresel kirleticilere ve aşındırıcı maddelere karşı korunmasına yardımcı olur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, fenolik grupların eklenmesi epoksi reçinelerin mekanik performansını olumlu yönde etkileyebilir, ancak fenolik içeriğin artması bu performans üzerinde olumsuz etkiler de yaratabilir. Bu nedenle, fenolik reçinelerin miktarının dikkatli bir şekilde ayarlanması önemlidir. Bunun yanında, fenolik gruplar, epoksi reçinelerin su emme özelliklerini azaltarak, suya karşı daha dirençli hale getirir ve böylece malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [43].

3. ATIK RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ YÖNETİMİ

Kullanım ömürleri 20 ila 25 yıl arasında değişen rüzgar türbinleri için 90'lı yılların başında devreye alınmış santraller artık devre dışı kalmaya başlamış ve yenileri ile değiştirilmesi sürecine girilmiştir. Dolayısıyla atığa çıkan rüzgar türbin santralleri devasa büyüklükte oldukları için konumlandırma konusunda bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Örneğin, 4,2 MW gücünde bir karasal rüzgar türbini, 682 ton ağırlığa sahip olabilir (%90,6 metal, %2,7 kompozit, %0,5 elektronik ve %6,2 diğer malzemeler). Temel, saha kabloları, saha şalt cihazları ve saha transformatörleri bu kütleyle eklenirse, santralin toplam ağırlığı 3.409 t'a (+%400) çıkar. Bu nedenle, 100 MW'lık bir rüzgar enerji santralinin (24 ünite) uygulanması ve yönetimi, 67.850 ton malzeme tüketimini içermektedir [44]. Hızla devam eden rüzgar enerjisi yatırımları ile ilerleyen yıllarda oluşacak atık santral miktarı da paralel bir artış göstermektedir. Türbinlerin metal aksamaları geri dönüştürülebilir olduğundan oluşacak devasa atık miktarının %15'i bir çevresel tehdit oluşturmaktadır. Bu oran da kanat miktarı ile eşleşmektedir. Tahmin çalışmalarına bakıldığında, Avrupa Birliği'nde 2030 ile 2050 yılları arasında 185-325 bin ton türbin kanat atığı ortaya çıkacağı öngörülmektedir [45]. Yakın zamanda ömrü dolmak üzere olan ilk kurulan rüzgâr santrallerinin ve ardından gelecek olan türbinlerin kanatları için nasıl bir yol izleneceği merak konusu olup, etkin bir atık yönetim sistemi gerektirmektedir. Şekil 3.1.'de rüzgâr enerji sektöründen kaynaklanan küresel kompozit atık hacminin projeksiyonu verilmiştir. 2030'lardan itibaren hızla artması beklenen atık hacmi için acil bir atık yönetim planı yapılması gerektiği görülmektedir. Rüzgâr kanadı atıklarının toplam miktarının şu anda 185 kton seviyelerinde olduğu, 2039 yılında ise 8.789 kton'a ulaşacağı öngörülmektedir. Sorun, cam/karbon elyaf takviyeli polimer (CETP/KETP) gibi rüzgâr türbini kanadı malzemelerinde yatmaktadır. Bu malzemelerin termoset reçineleri, geri dönüşümü zorlaştırmakta ve bu da düzenli depolama alanlarında önemli miktarda kompozit atık birikimine yol açmaktadır [46].



Şekil 3.1. Rüzgâr enerjisi endüstrisinden kaynaklanan küresel kompozit atık hacmi

Rüzgar enerjisini etkin kullanan ülkelerin gündemi olan bu konu, doğru yönetilmesi gereken bir süreci kapsamaktadır. Türkiye kanat üretimi konusunda gelişmiş bir ülkedir. Kanatların üretimi sürecinde fabrikalarda ortaya çıkan üretim atıkları ve santral sahalarında doğa olayları vb. sebeplerle hasara uğrayarak işlevini kaybeden kanatlar şu anda düzenli depolama sahalarında depolanmaktadır [47]. Fakat bu çözüm 2020 senesinde Avrupa Birliği tarafından yasaklanmıştır. Bu nedenle, birçok araştırmacı üretim sırasında açığa çıkan, kullanım sırasında hasar gören ve kullanım ömrü dolmuş olan atık kanatların nasıl ekonomiye geri kazandırılacağı konusunda çalışmalara hız vermiştir.

AB'nin atıkla ilgili politikalarının belirleyicisi Atık Çerçeve Direktifi'dir (2008/98/EC) [48]. Bu direktif, AB üye devletlerinin atık yönetimi konusunda ulaşması gereken hedefleri belirler, ancak her üye devletin bu direktife uymak için kendi yasalarını ve düzenlemelerini oluşturmasına olanak tanımaktadır. AB'de atıkla ilgili ek yasama düzenlemeleri ve rüzgâr türbini kanat atıklarıyla ilgili olanlar, Avrupa Atık Listesi'ni belirleyen Komisyon Kararı 2000/532/EC, Atık Yakma Direktifi (2000/76/EC) ve Depolama Direktifi'dir (1999/31/EC). Atıklar ayrıca, nasıl üretildiklerine bağlı olarak altı haneli bir numara ile kodlanır. Cam elyaf polimer kompozit gibi çoklu malzemelerden yapılmış atıklar için bu durum zorluk yaratır. Polimer matrisi organik bir malzeme, cam elyaf ise inorganik bir malzemedir, bu da onları etiketlemeyi zorlaştırır ve aynı ülke içinde farklı etiketleme sonuçlarına yol açmaktadır [7]. Şu anda elyaf takviyeli polimer kompozitlerin çevre dostu kısıtlamalar, hükümet mevzuatı/düzenlemeleri, üretim maliyetleri, varlık yönetimi ve finansal tahminleri karşılayarak işlenmesi ve yeniden işlenmesi kritik küresel hedeflerdir. Bu, bilim ve teknoloji aracılığıyla sürdürülebilirlik talep etmektedir. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin atıklarını değerli/önemli bir kaynağa dönüştürmek ve beşikten mezara yöntemiyle kapalı bir döngü sağlamak, malzemenin döngüsel ekonomide sonsuz kullanımının sağlanması için önemlidir [49, 4].



Şekil 3.2. Atık Yönetimi Hiyerarşisi [50]

Şekil 3.2.'de belirtilen atık hiyerarşisine göre öncelikli amaç, bir proseste atığın oluşmadan önlenmesidir. Eğer bu mümkün değilse proses sürecince oluşacak atık miktarı mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Türbin kanadı üretimi sırasında oluşan proses atıklarını azaltmaya yönelik çalışmalar yapmak ya da üretim hatalarından kaynaklı kanat atıklarını minimize etmek bu basamak için örnek verilebilir. Tekrar kullanım seçeneği, atığın aynı amaç için yeniden kullanılmasını ifade etmektedir. Rüzgâr türbin kanatları için bu seçenek henüz yaygın bir çözüm değildir çünkü türbinlerin yaşam süresi boyunca kanatlar oldukça fazla hasarlar görmekte ve hâlihazırda tamir ve onarım işlemlerine tabi tutularak sistemin parçası olmaya devam etmektedirler. Dolayısıyla atığa çıkmış bir kanadın tekrardan bir türbine entegre edilip kullanılması pek mümkün bir seçenek değildir. Geri kazanım, atığın içindeki malzemelerin (bir veya birden fazla olabilir) farklı bir amaç için kullanılmak üzere ayrılmasını ya da atığın sahip olduğu enerjinin kazanılmasını içermektedir.

Atık yönetiminin doğrudan etki ettiği bir diğer konu ise döngüsel ekonomidir. Döngüsel ekonomi kavramı uzun zamandır var olan bir kavramdır, ancak 1970'lerin sonlarından bu yana daha popüler hale gelmiştir. Döngüsel Ekonomi, Barbara Ward ve Kenneth Boulding tarafından ortaya atılan "uzay gemisi dünya" metaforundan türeyen ve sürdürülebilir kalkınmaya ulaşmak için etkili bir yol olarak kabul edilmektedir. 1990 yılında İngiliz ekonomistler D. Pearce ve R. K. Turner, döngüsel ekonomiyi kaynakların geri dönüştürülmesine dayalı bir ekonomik kalkınma modeli olarak tanımlamışlardır [51]. Ayrıca, ekonominin hem yerel hem de küresel olarak bireylerden büyük kuruluşlara ve işletmelere kadar her ölçekte etkili bir şekilde çalışmasının önemini kabul etmektedir. Döngüsel ekonomide üç önemli ilke vardır [33]:

1. Atıkları ve kirliliği ortadan kaldırmak
2. Ürünleri ve malzemeleri kullanımda tutmak
3. Doğal sistemleri yenilemek



4. RÜZGÂR TÜRBİN KANATLARININ GERİ DÖNÜŞÜM VE GERİ KAZANIM SEÇENEKLERİ

Avrupa Rüzgâr Enerjisi Birliği (WindEurope), Avrupa Kimya Endüstrisi Konseyi (Cefic) ve Avrupa Kompozit Endüstrisi Birliği'nin (EuCIA) yayınladığı “Rüzgâr Türbini Kanadı Döngüsellığı” raporuna göre, rüzgâr türbini kanatlarını geri dönüştürmek için farklı teknoloji hazırlık seviyelerinde (TRL 1 ile 9 arasında) çeşitli alternatif teknolojiler vardır [52]. Teknoloji Hazırlık Seviyesi (TRL: Technology Readiness Level), belirli bir teknolojinin olgunluğunun değerlendirilmesini sağlayan ve farklı teknolojiler arasında olgunluğun tutarlı bir şekilde karşılaştırılmasına imkân veren sistematik bir ölçüm sistemidir [53].

Tablo 4.1. Teknoloji Hazırlık Seviyeleri [54]

| | Seviye | Açıklama |
|-------|---|--|
| TRL 1 | Temel ilkelerin gözlemlendiği ve raporlandığı aşama | En düşük teknoloji hazırlık seviyesi, bilimsel araştırmaların, uygulamalı araştırma ve geliştirme (AR-GE) çalışmalarına dönüştürülmeye başlandığı aşamadır. |
| TRL 2 | Kavram, uygulama ve teknolojinin formüle edildiği aşama | İnovasyonun başlangıcıdır, pratik uygulamalar icat edilebilir. Uygulamalar varsayımları destekleyecek kanıt veya ayrıntılı analiz içermeyebilir. Örnekler analitik çalışmalarla sınırlıdır. |
| TRL 3 | Analitik ve deneysel yöntemlerle kritik fonksiyonların ve/veya karakteristik kavramların kanıtlanması aşaması | Aktif AR-GE çalışması başlatılır. Bu aşama, teknolojinin çeşitli bileşenlerinin analitik tahminlerini fiziksel olarak doğrulamak amacıyla analitik çalışmaları ve laboratuvar deneylerini içerir. Örnekler, henüz entegre edilmemiş veya tam anlamıyla temsili olmayan bileşenleri içerir. |
| TRL 4 | Laboratuvar ortamında bileşenlerin doğrulandığı aşama | Temel teknolojik bileşenlerin birlikte çalışacak şekilde entegre edildiği aşamadır. Bu entegrasyon, nihai sistemle karşılaştırıldığında nispeten "düşük doğrulukta" olur. Örnekler arasında laboratuvar "geçici" donanımın entegrasyonu yer alır. |
| TRL 5 | İlgili ortamda bileşen doğrulamasının yapılması | Bileşen teknolojisinin doğruluğu önemli ölçüde artmıştır. Temel teknolojik bileşenler, simülasyon ortamında test edilebilmeleri için makul derecede gerçekçi destekleyici unsurlarla entegre edilmiştir. Örnekler, bileşenlerin "yüksek kaliteli" laboratuvar entegrasyonunu içerir. |
| TRL 6 | İlgili bir ortamda sistem / alt sistem modeli veya prototip gösteriminin yapılması | TRL 5'in çok ötesinde olan temsili model veya prototip sistemi, ilgili bir ortamda test edilir. Teknolojinin gösterime hazırlığı konusunda büyük bir adımı ifade eder. Örnekler, bir prototipin yüksek kaliteli bir laboratuvar ortamında veya simüle edilmiş bir işletim ortamında test edilmesini içerir. |
| TRL 7 | Sistem prototipinin operasyonel ortamda gösteriminin yapılması | Prototip, planlanan sisteme yakın seviyededir. Operasyonel bir ortamda (örneğin bir uçakta, bir araçta veya uzayda) gerçek bir sistem prototipinin gösterilmesini gerektirmektedir. |
| TRL 8 | Gerçek sistemin test ve gösteri yoluyla tamamlanması ve kalifikasyonunun yapılması | Teknolojinin nihai hâliyle ve beklenen koşullar altında çalıştığı kanıtlanmıştır. Hemen hemen tüm durumlarda, bu TRL, gerçek sistem geliştirmenin sonunu temsil eder. Örnekler, tasarım gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için sistemin amaçlanan ortamda geliştirme testi ve değerlendirmesinin (DT&E) yapılmasını içerir. |
| TRL 9 | Başarılı görev operasyonları ile kanıtlanmış gerçek sistem | Operasyonel test ve değerlendirmenin yapılması (OT&E), son hâliyle ve amaçlanan görev koşulları altında teknolojinin fiili uygulanmasıdır. Örnekler, sistemi operasyonel görev koşulları altında kullanmayı içerir. |

Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarını yeniden kullanmak için bu kanatların yapısal bütünlüklerini ne ölçüde koruduğu, iyileştirilme (fonksiyonellik kazandırma) potansiyelleri ve olası uygulamaların ne olabileceğini dikkatle incelemek gerekir. Yapılan birkaç çalışma, inşaat, mimarlık ve altyapı gibi çeşitli endüstrilerde bu kanatların yeniden amaçlandırma yöntemi ile köprü bileşenleri, park alanları, oyun parkları ve ses bariyerleri gibi yenilikçi amaçlar için kullanabildiğini göstermiştir (Şekil 4.1.). Mekanik özellikler ve yapısal bütünlüğün ne ölçüde bozulduğu yeniden kullanımın uygulanabilirliğini belirleyecek en önemli iki unsurdur.



Şekil 4.1. Bisiklet park alanı(a), çocuk oyun parkı(b) [52]

Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbini kanatlarının içindeki malzemelerin geri dönüştürülmesi ise kompozit malzemelerin bileşenlerine ayrılmasını içerir. Termoset malzemenin karmaşıklığı, rüzgâr türbini kanatlarının geri dönüşümü için özel prosesler gerektirir. Cam elyafı, reçineleri ve diğer bileşenleri etkin bir şekilde ayırmak için mekanik, termokimyasal ve kimyasal prosesler kullanılabilir. Son yıllarda çözücü bazlı yöntemler (solvoliz) ve depolimerizasyon geri kazanılmış malzemelerde daha yüksek saflık elde edilebilmesi açısından daha fazla araştırılmaktadır.

4.1. Kompozit Geri Dönüşüm Yöntemleri

Kompozit geri dönüşüm yöntemleri temelde mekanik, kimyasal ve termal olarak üçe ayrılmaktadır. Atıkların geri dönüştürülmesi için teknolojilerin geliştirilmesi, çevre koruma ve sürdürülebilirlik kavramı açısından büyük bir ihtiyaçtır. Cam elyafı güçlendirilmiş kompozitler söz konusu olduğunda, ilk yaklaşım ağırlıkça bileşimi fazla olan cam elyafların mümkün mertebe geri kazanılması olmuştur. Bu süreçler arasında mekanik yöntemler (öğütme, kırma ve parçalama işlemleri gibi), termal yöntemler (piroliz, gazlaştırma, yakma, hidrotermal sıvılaştırma gibi), kimyasal yöntemler (çözündürme, solvoliz ve hidroliz gibi) ve ileri yöntemler (mikrodalga destekli kimyasal işlem gibi) bulunmaktadır [55].

Tablo 4.2. Kullanım ömrünü tamamlamış rüzgar türbini kanatlarının geri dönüşüm yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları [56]

| Geri Dönüşüm Yöntemi | Avantajlar | Dezavantajlar |
|---------------------------------|---|---|
| Mekanik Geri Dönüşüm | Ucuz, yüksek işlem kapasitesi hem lif hem de reçinenin geri kazanımı | Yeniden üretim için düşük imkanlar, mekanik özelliklerde bozulma |
| Kimyasal Geri Dönüşüm -Solvoliz | Reçine olmadan saf liflerin geri kazanımı, ester gibi belirli bağların seçici olarak kırılması Kompozitlerin tamamen ayrılması ve temiz geri kazanılmış lifler | Yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle pahalı aparat kurulumu Tehlikeli çözücüler kullanılırsa potansiyel çevresel etkiler, kontaminasyona karşı düşük tolerans |
| Termal Geri Dönüşüm Piroliz | Basit ve ucuz, kimyasal çözücüye gerek yok, aynı anda enerji ve malzeme geri kazanımı, reçineden kimyasal hammadde geri kazanım potansiyeli | İşlem parametrelerine yüksek duyarlılık |

4.1.2. Mekanik dönüşüm/geri kazanım

Mekanik işlemler malzemenin boyutunu değiştirmek için yapılan işlemlerdir. Kompozit yapıdaki rüzgâr türbin kanadının en yaygın değerlendirilmesi bu yöntem ile gerçekleşmektedir. Yaşam ömrü dolmuş ya da üretim esnasında yapılan hatalar nedeniyle kullanıma müsait olmayan türbin kanatları mekanik olarak parçalanarak daha küçük boyuta getirilir (Şekil 4.2.); ya da elyaflar ve balsa yapı birbirinden ayrılır. Mekanik geri dönüşüm işlemi cam elyaflara zarar vererek malzemenin mekanik performansını azaltır ve bu nedenle çimentoya katkı maddesi olarak, asfalt için dolgu maddesi olarak veya inşaat sektöründe agrega olarak kullanılması daha yaygındır [57]. Cam elyafların mekanik ayrımı için parçalama ve öğütmenin belirli boyutlarda yapılması gereklidir (Tablo 4.3.). Aynı zamanda, bütün diğer yöntemlerin uygulanabilmesi için kullanım ömrü dolmuş türbin kanadının öncelikle fiziksel proseslerden geçirilmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle mekanik işlemleri uygulamak bir gerekliliktir.



Şekil 4.2. Bir rüzgâr türbini kanadının mekanik dönüşüm aşamaları [58]

Tablo 4.3. Mekanik geri dönüşüm süreci [59, 60]

| | Süreç | Parçacık Boyutu | Ekipman |
|-----------------|---|--------------------|--|
| 1.Parçalama | Atık malzemeleri parçalara ayırmak | 50 - 100 mm | Düşük hızda kesme veya kırma değirmeni |
| 2.Öğütme | Parçaları kırıntılara öğütmek | 10 mm - 50 μ m | Yüksek hızda kesme veya çekiçli değirmen |
| 3.Sınıflandırma | Kırıntıları reçine açısından zengin tozlar ve lifli kırıntılar olarak ayırmak | - | Siklonlar ve elekler |

ATK'nın beton bileşeni olarak yeniden değerlendirilmesinin mekanik ve çevresel avantajlarının incelendiği bir çalışmada, kanat atığının farklı oranlarda betona karıştırılarak beton üzerindeki sertleştirilmiş yoğunluk, basınç dayanımı, çökme, taze yoğunluk, hava içeriği, elastisite modülü, ultrasonik darbe hızı, yarma çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi özellikleri test edilmiştir. ATK kullanımı betonun işlenebilirliğini genellikle liflerin diğer bileşenlerin akışını engellemesi nedeniyle olumsuz etkilese de, betonun çökme değerini artırmıştır. Bu artışın ana nedeni, su ve plastikleştirici miktarının uygun şekilde ayarlanmış olmasıdır. Ayrıca, poliüretan ve balsa ağacı parçacıklarının doğal agrega ile karşılaştırıldığında daha düşük yoğunluğa sahip olması, bu malzemelerin çimento pastası içinde daha kolay hareket etmelerini sağlamaktadır [61].

4.1.2. Kimyasal dönüşüm/geri kazanım

Termoset reçinelerin çapraz bağlı yapıları, belirli şartlar altında (sıcaklık, basınç, uygun katalizör) kimyasal ajanların kullanımıyla seçici olarak kırılabilir. Solvoliz olarak bilinen bu yöntem, reçine matrisinin bileşen monomerlerine depolimerizasyonuna yol açar ve cam elyafların geri kazanılmasını kolaylaştırır [62].

Çözücülerin performansı proses koşullarından oldukça etkilenir. Çözücünün çeşidi (asidik, bazik, polar gibi), işlem sıcaklığı, basıncın varlığı, reaksiyon süresi bu koşullardan bazılarıdır. Cam elyafla güçlendirilmiş epoksi reçine ile yapılan bir solvoliz çalışmasında depolimerizasyon için 4M nitrik asit kullanılmış ve çözme işlemi 80°C’de oldukça uzun reaksiyon sürelerinde (400 saat) gerçekleştirilmiştir [63]. Solvoliz işleminde çokça çalışılmış solventlerden biri de süperkritik alkollerdir. Süperkritik şartlarda çalışılan alkoller kolayca bulunabilmeleri, uygun maliyetli olmaları, düşük toksisiteye sahip olmaları, birçok organik ve inorganik yapıyı çözebilmeleri ve daha sonra distilasyon ile geri kazanılabilmeleri nedeniyle tercih sebebi olmuşlardır. Aseton, etanol, 1-propanol ve metanolün solvent olarak kullanıldığı solvoliz denemelerinde karbon fiberle güçlendirilmiş epoksi reçine 300°C, 375°C ve 450°C’de ve 6-15MPa basınç altında işleme alınmıştır [64]. Bu deneysel çalışmada kesikli sistemlerde fiberin yapısı daha çok korunmuş olsa da kütle transferi daha az olduğu için fiberler üzerinde daha fazla reçine matrisi gözlemlenmiştir. Ayrıca, asetonun daha iyi bir çözücü olduğu fakat alkollerin de -özellikle 1-propanol’ün- bazik katalizör varlığında (KOH) etkin olduğunu göstermişlerdir. Aseton-su-KOH sistemi ile yapılan diğer bir süperkritik solvoliz çalışmasında (çalışılan sıcaklıklar: 200 °C, 250°C, 275°C, 300°C, 325°C; çalışılan basınçlar: 35bar, 70 bar, 130 bar, 160 bar, 300 bar) cam elyafla güçlendirilmiş polyster kompozitler kesikli reaktörde işleme sokularak cam elyaflar ve yağ fraksiyonu (çözünmüş halde monomerler) elde edilmiştir [65]. Etilen glikol, propilenglikol gibi yüksek kaynama noktalı çözücüler de cam elyaf katkılı rüzgar türbin kanatlarının solvoliz işleminde denenmiştir [66]. Hem solvoliz yağını hem de cam elyafı etkin bir şekilde geri kazanabilmek için iki kademe işlem yapılması gerektiği, bu işlemlerin birinci kademesinin etilen glikol varlığında 270 °C’de 16 saat kanat numunelerinin tutulması olduğu, ikinci aşamada da 1-propanol/su/KOH sisteminde 330°C’de 3 saat bekletilmesi olduğu belirtilmiştir. Türbin kanatlarının etilen glikol/KOH (% 1) karışımı ile solvolizinde (190-200 °C aralığında 4-6 saat süreyle) reçinenin tamamen sıvı faza geçtiği görülmüştür [67]. Aynı çalışma, KOH katalizörünün %5’e çıkarılması durumunda sürenin 2 saate indiğini göstermiştir. Türbin kanatları termoset kompozit malzemeler olduğu için her türlü ayırma prosesini uygulamak oldukça zordur. Kimyasal dönüşüm başlığı altında incelenen solvoliz yöntemi zamanla umut verici sonuçlar vermeye başlamıştır. [68]. Farklı çözücü karışımlarının katalitik şartlarda denenmesi ve kademeli solvoliz işlemleri gelecekte çalışılması gereken konular olacaktır.

Solvoliz dışında diğer bir kimyasal geri dönüşüm yöntemi oksidatif sıvılaştırma’dır. Oksidatif sıvılaştırmada aslında bir hidrotermal işlemdir. Kompozit malzeme, su ve oksidasyon ajanı

(hidrojen peroksit gibi) varlığında ısıtılır. Oksidasyon ajanı radikallerine bozunur ve bu radikaller kompozit malzemenin bağlarını degrade eder [69]. Hidrojen peroksitin tercih edildiği bu yöntemde en iyi proses şartlarını 250 °C, 30 bar basınç, %18 hidrojen peroksit, 45 dakika proses alıkonma zamanı ve katı sıvı oranının da %5 olduğunu gösteren bir çalışma yapılmıştır [70]. Farklı bir çalışmada, aynı sıcaklık ve proses süresinde fakat 35 bar basınçta ve %22.5 hidrojenperoksit varlığında cam elyaf geri kazanımı %96 olarak bulunmuştur [71].

Kimyasal yöntemlerle geri dönüşüm metotları daha düşük bir TRL değerine sahip olsa da, geri kazanılan cam elyafların yüksek saflığı ve daha iyi mekanik özellikleri onları tekrar kompozit malzeme yapımında kullanmaya imkan vermektedir. Bu da döngüsel ekonomi açısından son derece avantajlıdır.

4.1.3. Termal dönüşüm/geri kazanım

Yakma, piroliz ve gazlaştırma prosesleri termal dönüşüm/kazanım başlığı altında incelenmektedir. Piroliz, oksidatif olmayan bir ortamda karbonlu bileşenlerin termal bozunmasıdır [72, 73]. Piroliz yöntemi kullanıldığında temelde üç farklı ürün elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bunlar; sentez gazı, piroliz yağı ve kok (char) olarak düşünülebilir [74]. Piroliz, ömrünü tamamlamış rüzgar türbini kanatlarından cam elyaf ve reçineyi geri kazanmak için umut verici bir teknolojidir; piroliz atmosferi ise ATK'larının depolimerizasyonu ve geri kazanılan elyafların mekanik özellikleri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Piroliz sürecinde (oksijensiz ortamda termal bozunma), malzemenin organik kısmı düşük moleküler ağırlıklı ürünlere, sıvılara veya gazlara ayrışır ve bu ürünler yakıt veya kimyasal madde olarak kullanılabilir [75, 76]. Piroliz işlemi genellikle 450 ila 700°C'lik bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Polimer reçinelerinin termal bozunması ve cam elyaflarının geri kazanımı, öncelikle reaksiyon sıcaklığı, ısıtma hızı ve piroliz süresi gibi piroliz koşullarından etkilenmektedir [77]. Mekanik geri dönüşüm ve kimyasal çözündürme ile kıyaslandığında, termal geri kazanım, özellikle piroliz, hem süreci sadeleştirerek hem de yüksek değerli ürünler üreterek ATK'ların kaynak olarak değerlendirilmesinde daha pratik ve geniş bir potansiyel sunmaktadır [78, 79].

Polimer kompozitler çimento fırınlarına enerji sağlamak için endüstriyel boyutta yakılabilir. Bunun nedeni polimer matrisin enerji içeriğinin yüksek olmasıdır (Tablo 4.4.). Yanma sonrasında geride kalan cam fiberler de çimento içinde katkı olarak kullanılmış olur [59].

Tablo 4.4. Yaygın kompozit bileşen malzemelerinin sahip oldukları enerji miktarları [80]

| Kompozit bileşeni | Isıl değer (MJ/kg) |
|-------------------|--------------------|
| Karbon elyaf | 183-286 |
| Cam elyaf | 13-32 |
| Polyester reçine | 63-78 |
| Epoksi reçine | 76-80 |

Ming-xin Xu ve diğ. [81] yapmış olduğu bir çalışmada, piroliz sıcaklığı olarak 500°C belirlemiş, 300 ml/dakika akış hızı ile %20 oranında reaktif gaz (H₂O veya CO₂) fazlası kullanarak üç farklı piroliz senaryosu incelemiştir. Yapılan deneyler'e göre, ATK pirolizinde en düşük verim, gaz ürüne aitken, en yüksek verim katı üründe elde edilmiştir. Ayrıca, H₂O veya CO₂'nin varlığı, piroliz ürünlerinin dağılımı üzerinde hafif etkiler göstermiştir. H₂O eklenmesiyle piroliz yağının verimi (saf N₂ ortamında yapılan deneye kıyasla) düşerken, gaz ürünün verimi yükselmiştir. Bu durum, H₂O'nun ATK'lerdeki epoksi reçinelerin kırılmasını kolaylaştırdığını göstermektedir. Buna karşılık, CO₂'nin varlığı, polimer epoksinin depolimerizasyonunu kısıtlamış ve bu da katı ve yağ ürünlerin verimlerini yükseltirken, gaz ürünün verimini düşürmüştür. Bu sonuçlar, CO₂ ile karşılaştırıldığında, H₂O'nun kullanım ömrünü tamamlamış ATK'lerin pirolizinde daha aktif bir gazlaştırıcı yardımcı madde olarak görev yaptığını ve polimer epoksinin gaz bileşiklerine dönüşümünü teşvik ettiğini göstermektedir. Åkesson ve diğ. [82], yaptığı bir çalışmada cam elyaf takviyeli kompozitlerin mikrodalga pirolizi kullanılarak (440°C, 90 dakika) geri dönüştürülme olasılığı incelenmiştir. Pirolizden sonra geri kazanılan cam elyafın çekme mukavemeti ölçülmüş ve işlenmemiş cam elyafın çekme mukavemeti ile karşılaştırılmıştır. Test, elyafların mukavemetinin yaklaşık %25'ini kaybettiğini göstermektedir. Cunliffe ve Williams [83], 450°C'de termoset polyesterin pirolizi üzerine yaptıkları çalışmada, H₂, CH₄, CO ve CO₂ gibi gazların oluştuğunu gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra, üretilen yağın yüksek konsantrasyonlarda C₂-C₄ hidrokarbonlar içerdiğini rapor etmişlerdir. Piroliz işlemi sonucunda elde edilen liflerin plastik levhalarda yeniden kullanıldığı ve bu liflerin, orijinal liflerle karşılaştırılabilir mekanik özellikler sergilediği görülmüştür. Tablo 4.5.'te farklı koşullarda gerçekleşen piroliz proseslerine ait ürün yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Cam elyaf takviye edilmiş kompozitlerden piroliz işlemi kullanılarak geri kazanımı [78]

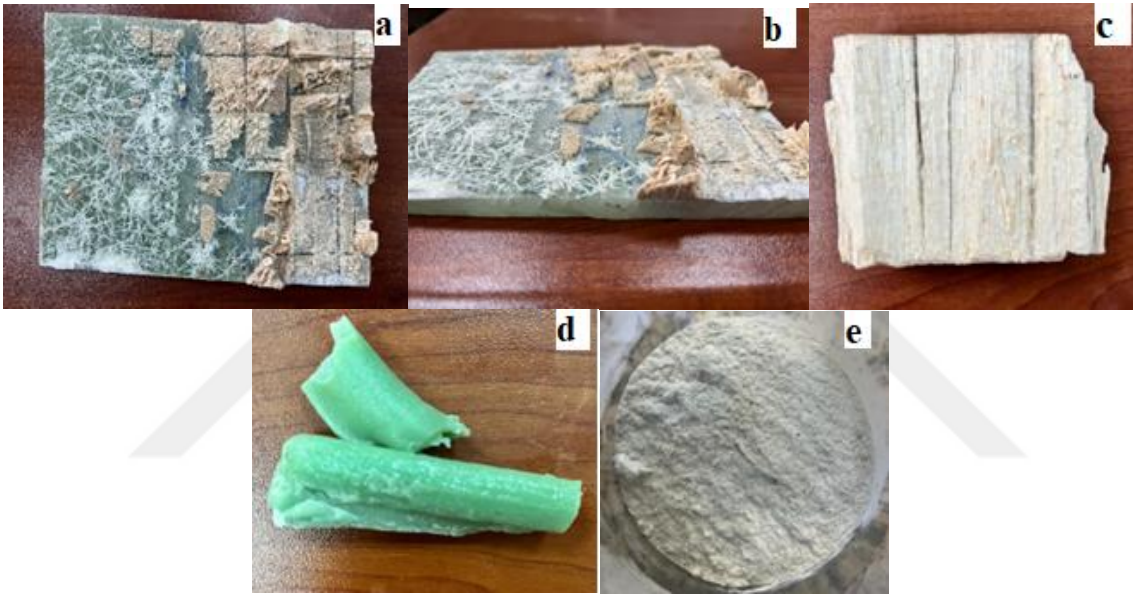
| Reaktör | Elyaf Takviyeli Polimer Tipi | Uygulama Alanı | Piroliz İşletme Koşulları | | | Oksidasyon işlemi | Piroliz Ürün Yüzdeleri(%) | | | Referans |
|----------------------|---|--|---------------------------|---------------------------------------|---|---|---------------------------|-----------|----------|---------------------------------|
| | | | Sıcaklık(°C) | Kalış süresi (dk)/Isıtma hızı (°C/dk) | Gaz akış hızı | | Katı | Sıvı | Gaz | |
| Statik yatak Reaktör | Cam elyaf(12%) ile termoset polyester/stiren reçinesi | Otomotiv sanayi, elektrik ve devre kartı | 350-800 | 60 dk | N ₂ (200 cm ³ /dk) | 400–800°C | 38,3–82,9 | 14,5–47,4 | 2,6–14,4 | Cunliffe ve diğ. (2003) [3] |
| | Cam elyaf(30%) ile termoset polyester/stiren reçinesi | | | | | | 32,6 | 64,1 | 3,3 | |
| | Cam elyaf(31%) ile fenolik reçine | | | | | | 84,4–94,3 | 5,1-12 | 0,6-4,6 | |
| | Karbon elyaf(-) ile fenolik reçine | | | | | | 65 | 30,4 | 4,6 | |
| | Cam elyaf-Karbon elyaf(45%) ile epoksi reçine | | | | | | 65,3-81,7 | 18-31,7 | 0,2-3 | |
| | Cam elyaf(75%) bantlı ile polipropilen reçine | | | | | | 78,9 | 20 | 1,1 | |
| Sabit yatak reaktör | Cam elyaf(70%) dokumalı vinil ester reçinesi | Otomotiv sanayi | 450 | 90 dk | N ₂ (3000 cm ³ /dk) | Kül Fırını 450°C | 83,4 | 15 | 1,6 | Cunliffe ve Williams(2003) [83] |
| | Otomotiv atıklarından cam elyaf(30%)/polyester reçinesi | | | | | | 54,6 | 39,6 | 5,8 | |
| Termolitik reaktör | Cam elyaf | Cam Seramik Malzeme | 550 | 180 dk | - | 1450°C'de termal işlemle Sodyum oksit ile harmanlanmıştır | 68 | 24 | 8 | López ve diğ.(2012) [84] |

| | | | | | | | | | |
|---|---|-------------------|---------------|---|--|-------|-------|-------|------------------------------|
| TGA | Yeniden kullanılabilir plastik yakıt üretiminin yan ürününden cam elyaf takviyeli polimer | Oda sıcaklığı-900 | 5-20°C/dk | N ₂ (200 ml/dk) | - | - | - | - | Yun ve diğ. (2014) [85] |
| Tel Örgü Reaktör | Cam elyaf takviyeli polimer asit çözeltisi depolama tankının yan ürününden üretim şirketi | 600-1000 | 2,4,6,8,10 sn | N ₂ (1 l/dk) | | 20-80 | 15-50 | 5-15 | Yun ve diğ. (2015) [86] |
| Kesikli reaktör | Polyester laminattan elde edilen laminat hurdalarının üretim sürecinden cam elyaf | 500-600 | | | İzotermal ısıtma 500 veya 600°C'de 10 ila 60 dakika boyunca kül fırını | 40-45 | 35-40 | 15-20 | Giorgini ve diğ. (2016) [87] |
| Laboratuvar ölçekli tek kademeli çelik yarı kesikli reaktör | Benzoksazin termostatla güçlendirilmiş karbon fiber dokuma | 500 | 45 | N ₂ (5dm ³ /saat) | 500°C | 73,1 | 2,3 | 23,8 | Onwudili ve diğ. (2016) [88] |
| | Ortoftalik bazlı polyester reçineden cam elyaf | | | | | 65,9 | 8,4 | 25,7 | |

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Materyal

Deneylerde kullanılmış olan hammadde, üretimi tamamlandıktan sonra yapılan kontrollerde fark edilen hatalardan dolayı kullanım dışı kalmış bir türbin kanadına aittir. Gövdesinden bir kesite taşlama işlemi yapılarak deneysel çalışmaya uygun hale getirilmiş ve tarafımıza gönderilmiştir (Şekil 5.1.). Hammadde TPI Composite firmasından temin edilmiştir. Kanadın bireysel bileşenlerinin kütle yüzdeleri üretici tarafından açıklanmadığı için tam bileşimi (bileşenlerin ağırlık yüzdesi) bilinmemektedir.



Şekil 5.1. Kanat gövdesinden kesilmiş bir parça (a,b), balsa (c), epoksi reçine (d), taşlanmış kanat parçası(e)

5.2. Kullanılan Ekipmanlar

Çalışma, Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, laboratuvardaki tüm ekipmanlar (tüp fırın, etüv, kül fırını, cam ekipmanlar, seramik malzemeler) kullanılmıştır. Kullanılan ekipmanların marka/model detayları metot kısmında belirtilmiştir.

5.3. Metot

Elementel Analiz: ATK numunelerindeki karbon, hidrojen, azot ve kükürt ağırlık yüzdelerini belirlemek için LECO TruSpec Mikro Analiz Cihazı kullanılmıştır.

Yüksek Isıl Değer: ATK numunelerinin kalorifik değerleri, IKA C5003 oksijen bombalı kalorimetre kullanılarak ölçülmüştür.

Termogravimetrik Analiz: ATK numunelerinin piroliz ve yanma karakteristiklerini belirlemek için Seiko TG/DTA 6300 termogravimetrik analiz cihazı kullanılmıştır. Piroliz profili için, 3 mg örnek, azot atmosferinde 25°C'den 800°C'ye kadar dakikada 20°C hızla ısıtılmıştır. Yanma profili için ise, 3 mg örnek oda sıcaklığından 800°C'ye 20°C/dk ısıtma hızıyla kuru hava altında ısıtılmıştır.

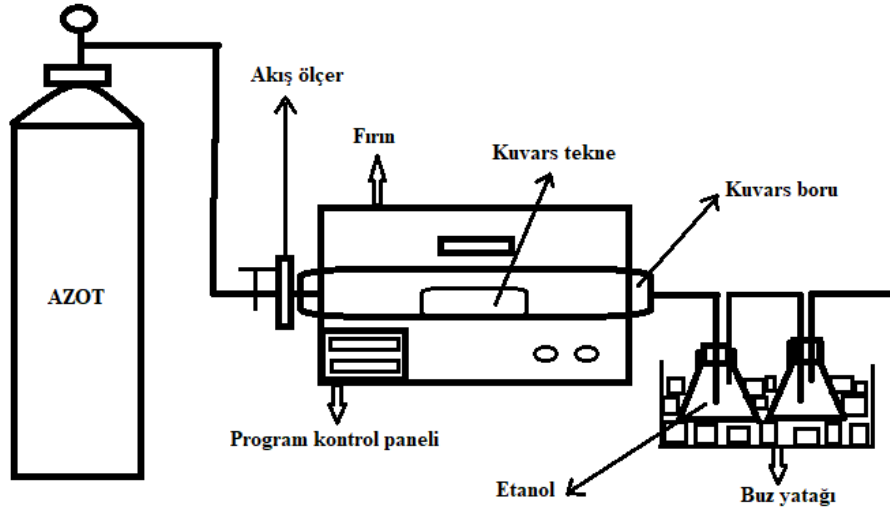
TG-FTIR: Piroliz gazlarını ve yanma gazlarını tanımlamak için birleşmiş termogravimetrik analiz cihazı (Perkin Elmer Pyris STA 600)-FTIR (Spectrum 1) kullanılmıştır. Piroliz gazları için numune 20°C/dk ısıtma hızıyla 25°C'den 900°C'ye kadar azot atmosferi altında ısıtılmıştır. Yanma gazları için ise numune 20°C/dk ısıtma hızıyla 25°C'den 900°C'ye kadar kuru hava atmosferi altında ısıtılmıştır. Kondenzasyonu önlemek için bağlantı hattı 270°C'de sabit tutulmuştur. FTIR spektrumları, 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ve 4 cm⁻¹ çözünürlükte toplanmıştır. Bu analiz ODTÜ Merkez Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

Py-GC/MS: Hızlı piroliz, Shimadzu QP 2010 Ultra GC/MS'ye bağlı Frontier/PY2020 piroliz cihazında gerçekleştirilmiştir. Hızlı piroliz, 600°C'de 10°C/ms ısıtma hızı ve 15 saniyelik bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Piroliz ürünleri, helyum (1 mL/dk) ile GC kapiler kolonuna (Teknokroma, 30 m x 0.25 mm x 0.25 µm) aktarılmıştır. GC fırını, 2 dakika boyunca 40°C'de tutulmuş, ardından dakikada 5°C hızla 200°C'ye ısıtılmış ve 2 dakika boyunca tutulmuş, daha sonra dakikada 10°C hızla 280°C'ye ısıtılmış ve 2 dakika tutulmuştur. Kütle spektrometresi, 70 eV elektron darbe iyonizasyonu ile çalışmış ve *m/z* 30–600 amu kütle aralığında tarama yapmıştır. İyon kaynağı ve ara yüzey sıcaklıkları sırasıyla 230°C ve 280°C'dir. Pikler, NIST kütle spektral kütüphanesi kullanılarak tanımlanmıştır. Bu analiz Bilecik Şeyh Edebalı Merkez Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

SEM/EDS: Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve element haritalaması, enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile donatılmış JSM-6610 JEOL cihazı kullanılarak elde edilmiştir. SEM görüntüleri, hızlandırıcı voltajın 15 kV olduğu ikincil elektron modunda toplanmıştır.

Piroliz: Hızlı pirolizin yanı sıra, piroliz aynı zamanda tüp fırında da yapılmıştır (iç çap:5 cm, uzunluk:70 cm) (bkz. Şekil 5.2.) ATK örneği oda sıcaklığından 600°C'ye kadar dakikada 10°C hızla ısıtılarak ve bu sıcaklıkta 60 dakika boyunca tutulmak suretiyle yapılmıştır. Piroliz sırasında, tüp boyunca sürekli olarak dakikada 100 ml hızla azot verilmiştir.

Kül analizi: Kül analizi yapabilmek için ise numuneler 600°C'ye ayarlanmış kül fırınında sabit tartıma gelinceye kadar yakılmıştır.



Şekil 5.2. Piroliz ünitesi kurulumu



6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

6.1. ATK'nın Karakterizasyonu

ATK, her biri ayrı fonksiyonelliğe sahip birçok materyalden oluşan kompozit bir yapıdır. Tablo 6.1'de görüldüğü üzere ATK numunelerinin elementel içeriği diğer çalışmalarda belirtilen içeriklerle uyumludur. ATK numuneleri ağırlıkça %29,5 karbon ve %3,52 hidrojen içermektedir. Cam elyafla güçlendirilmiş polimerden oluşan kompozitlerin bu oranlarda karbon ve hidrojen içermesi gözlemlenen bir durumdur [90]. İncelenen ATK numunelerinin ağırlıkça %1,41'i azottur. Atık türbin kanatlarıyla ilgili yapılan diğer çalışmalarda ağırlıkça azot içeriğinin %4'e kadar çıktığı görülmekte olup, kanat üreticilerinin tercih ettiği bileşimin bu içeriklere oldukça etki ettiği görülmektedir. Genel olarak, kanat bileşiminde kükürt azdır. ATK numunesinde kükürt içeriği %1'in oldukça altındadır.

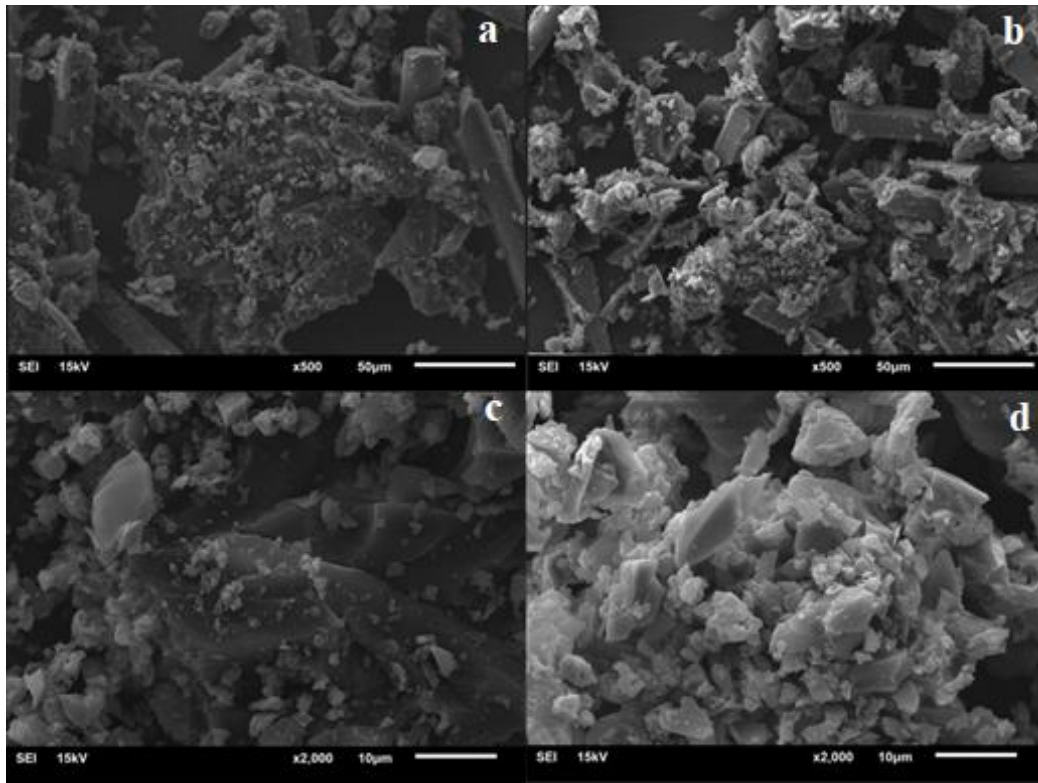
Tablo 6.1. ATK Elementel Analizi (kuru bazda)

| | C | H | S | N | Kül | O* | HHV (kJ/kg) | Ref. |
|--|-------|------|-------|------|-------|-------|----------------|-------------------|
| ATK | 29,50 | 3,52 | 0,035 | 1,41 | 58 | 7,54 | 11949,5 | Mevcut çalışma |
| Sökülmüş rüzgar türbin kanadı | 22,4 | 1,49 | 0,01 | 0,82 | 70,7 | 4,53 | - | [91] |
| Ömrünü tamamlamış rüzgar türbin kanadı | 16,24 | 1,75 | 0,01 | 0,62 | 76,9 | 4,48 | 7200 | [90] |
| Sökülmüş rüzgar türbin kanadı - numune 1 | 27,74 | 3,07 | 0,04 | 3,18 | 55,95 | 9,30 | 12300 | |
| Sökülmüş rüzgar türbin kanadı - numune 2 | 31,44 | 3,46 | 0,02 | 3,99 | 50,02 | 10,12 | 15200 | [92] |
| Sökülmüş rüzgar türbin kanadı - numune 3 | 30,53 | 3,22 | 0,02 | 4,74 | 50,81 | 9,67 | 13100 | |

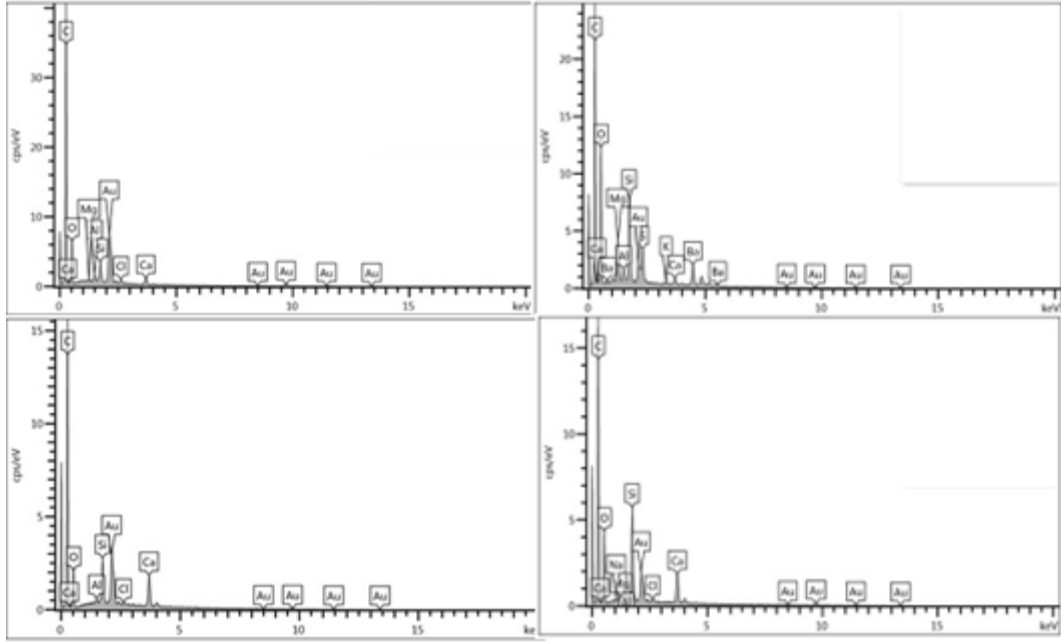
* O= 100- (%C-%H-%N-%S-%kül)

ATK numunelerinin ortalama üst ısıl değeri 11949.5 kJ/kg olup, birçok termoplastik ve reçineden daha düşüktür. Atık türbin kanatlarına ait diğer çalışmalarda ise en yüksek ısıl değer 15200 kJ/kg'dır. Tablo 6.1'de görüldüğü üzere kanatların ısıl değeri, "Atıktan türetilmiş yakıt, ek yakıt ve alternatif hammadde tebliği (Resmi Gazete Tarihi: 20.06.2014, Resmi Gazete Sayısı: 29036)" içinde belirtilen alt limit (10467 kJ/kg) değerinin üstündedir.

ATK numunelerine ait SEM görüntüsü Şekil 6.1.'de, 4 farklı bölgeden alınan EDS analiz sonuçları ise Şekil 6.2.'te gösterilmiştir. ATK numunelerinin SEM fotoğrafları polimerik malzemeyle güçlendirilmiş cam elyaf malzemelerinin SEM görüntüleriyle uyumludur [93]. Cam elyaflar, öğütme nedeniyle düzensiz uzunluklara sahip parçalanmış elyaflar olarak görünmektedir ve reçine ile kaplanmıştır. Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi, EDS tarafından bulunan yüksek karbon içeriği (%58.3-%72.8), oksijen içeriği (%20.3-%27.2) ve silisyum içeriği (%1.3-%4.5), reçinenin organik yapısına ve cam elyaflardaki silisyuma karşılık gelmektedir. Ek olarak, EDS sonuçlarında kalsiyumun varlığı, mukavemeti ve direnci artırmak için cam elyaf kompozitlerinde kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanımına işaret edebilir [94].



Şekil 6.1. ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (b), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (c), ATK numunesine ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (d)



Şekil 6.2. ATK EDS analizinin sonuçları

Tablo 6.2. SEM/EDS analize göre yüzey elementlerinin dağılımı (%)

| Element | | | | |
|---------|------|------|------|------|
| C | 72,8 | 58,3 | 71,5 | 64,7 |
| O | 23,6 | 27,2 | 20,3 | 25,3 |
| Si | 1,3 | 2,9 | 2,7 | 4,5 |
| Ca | 1,2 | 0,5 | 4,9 | 3,7 |
| Cl | 0,5 | 0 | 0,3 | 0,3 |
| Al | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 1,2 |
| Mg | 0,1 | 1,6 | 0 | 0,2 |
| Na | 0 | 0 | 0 | 0,2 |
| Ba | 0 | 7,3 | 0 | 0 |
| S | 0 | 1,6 | 0 | 0 |
| K | 0 | 0,1 | 0 | 0 |

6.2. ATK'nın Piroliz Karakteri

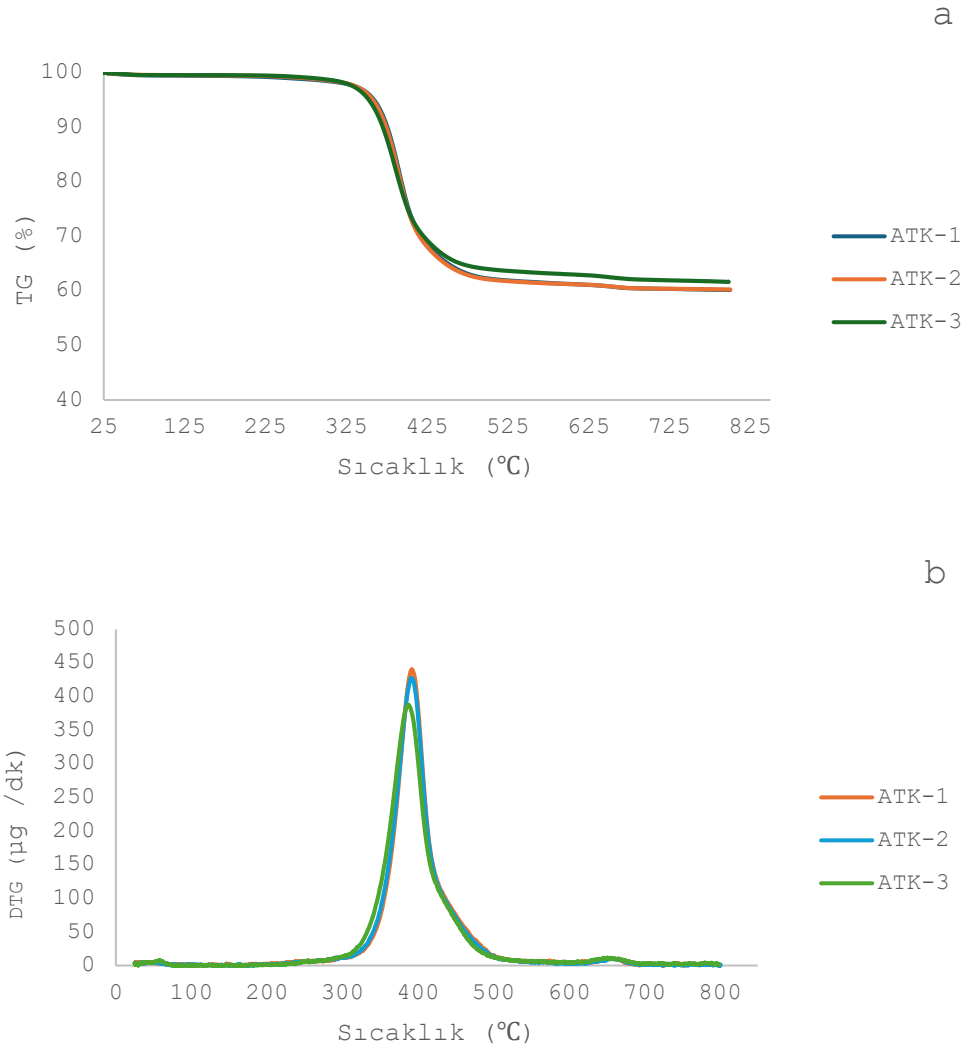
ATK numunelerinin pirolizine ait termogravimetrik (TG) ve diferansiyel termogravimetrik (DTG) eğrileri Şekil 6.3.'te verilmiştir. Termal bozunmaya ait kütle kaybının büyük bir kısmı 225°C - 525 °C aralığında görülmüş olup, 625°C -675 °C sıcaklık aralığında da termal bozunmaya ait çok az miktarda kütle kaybı dikkat çekmektedir. Mekanik özellikleri ve kimyasal direnci artırmak için kanat üretiminde yaygın olarak kullanılan epoksi reçinesinin de termal bozunma sıcaklık aralığı (300 °C – 450 °C), gözlemlenen sıcaklık aralığıyla uyumludur [95]. ATK numunelerinin termal bozunma başlangıç sıcaklığı, cam elyafının varlığı nedeniyle epoksi reçinesine kıyasla daha düşüktür. Çalışmalarında, cam elyaf takviyeli epoksi reçinesinin

290°C- 460°C arasında bozunduğunu göstermişlerdir. Türbin kanatlarının çok önemli bir bileşeni olan balsa ağacının da 175°C - 500°C sıcaklık aralığında termal olarak bozunduğu bilinmektedir [96]. Bu sıcaklık aralığı da ATK numunesinin termal bozunma sıcaklığı ile örtüşmektedir. 625°C- 675°C 'de gözlenen ikinci bozunma, kompozitteki karbonat içeren katkı maddelerinden kaynaklanabilir; CaCO₃'ün 600-800 °C'de bozunduğu bilinmektedir [97]. ATK numunelerinin ağırlık kaybı hızının maksimum olduğu sıcaklık diğer bir ifadeyle pik sıcaklığı 388 °C ile 392 °C arasındadır. ATK'nın ağırlıkça ortalama %39.3'ü termal olarak bozunmuştur.

TG/DTG dataları ve grafikleri kullanılarak ekstrapolasyon yapılmış onset (başlangıç) sıcaklığı (T_{onset}), pik sıcaklığı (T_{pik}), ekstrapolasyon yapılmış ofset (sonlanma) sıcaklığı (T_{offset}), bitiş sıcaklığı (T_{end}), maksimum kütle kaybı hızı (DTG_{max}) ve dönüşüm elde edilmiştir. Pirolizin dönüşümü, başlangıçtaki kütlenin piroliz ürünlerine dönüşen yüzdesi olup şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Dönüşüm} = ((m_0 - m_f) / m_0) \times 100$$

Burada, m₀ piroliz öncesi örneğin başlangıç kütleini, m_f ise piroliz tamamlandıktan sonraki örnek kütleidir. ATK'nın piroliz karakteristikleri Tablo 6.3.'te verilmiştir.



Şekil 6.3. ATK'nin TG eğrisi (piroliz profili) (a), ATK'nin DTG eğrisi (b)

Tablo 6.3. ATK numunelerine ait piroliz ve yanma karakteristikleri

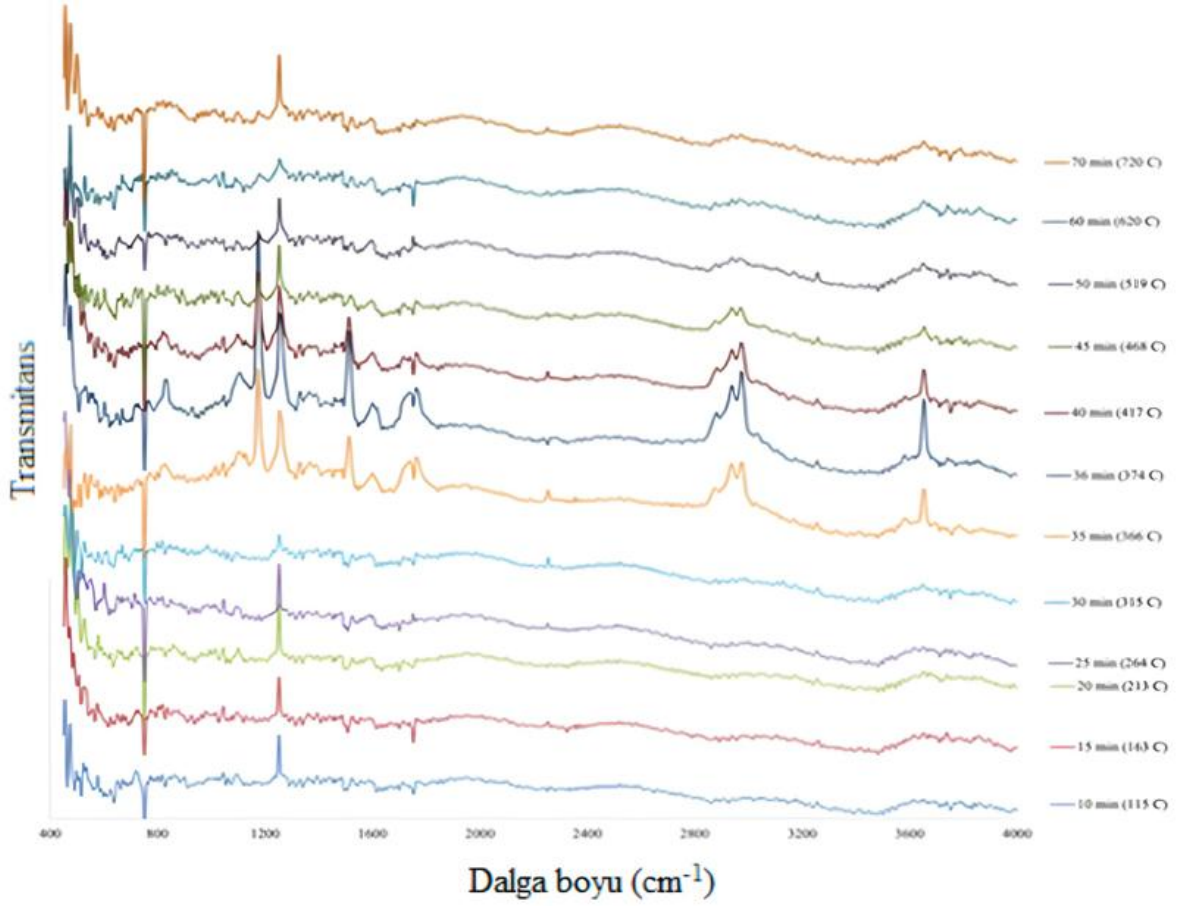
| | T _{onset} (°C) | T _{pik} (°C) | T _{offset} (°C) | T _{end} (°C) | DTG _{max} (%/dak) | Dönüşüm (%) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------|
| ATK Numune 1 | 350.3 | 392 | 420.3 | 723.4 | 13.23 | 39.8 |
| ATK Numune 2 | 352 | 391.5 | 422 | 724.7 | 13.01 | 39.7 |
| ATK Numune 3 | 341.5 | 387.7 | 420 | 732 | 11.29 | 38.4 |

Piroliz uçucularına ait FTIR spektrumları Şekil 6.4.'de verilmiştir. Titreşim gerilimlerinin tanımlanabilmesi için Tablo 6.4. oluşturulmuştur. Termogravimetrik analiz sonuçlarına göre gaz çıkışı nedeniyle kütle kaybının en fazla olduğu sıcaklık aralığı 366°C - 417°C'dir. ATK'nın pirolizi sırasında oluşan uçucuların FTIR analizi, termal bozunma ürünlerine ilişkin öngörü yapılmasını sağlayan birçok farklı titreşim gerilmeleri göstermiştir. 1040 cm⁻¹'deki pikler alkollerin varlığını göstermektedir ve bu pik 720 °C'ye kadar görülmekte olup, 366-468 °C'de

daha yoğun gözlenmektedir. 366 °C ve 720 °C sıcaklıkları arasında, ester gruplarındaki C=O gerilme titreşimi 1170 cm⁻¹'de gözlenmekte olup, bu pikin yoğunluğu 366 °C ve 374 °C'de çok yüksektir. Tüm sıcaklıklarda, 1250 cm⁻¹'de C-O gerilmesi (genellikle reçine bileşeninden kaynaklanan ester ve eterlerde bulunur) gözlenmiştir, bu gerilme titreşimi 374-519°C arasındaki sıcaklıklarda yoğundur, en yoğun olduğu sıcaklık ise 374 °C'dir. Fenolik yapılar veya aromatik bileşiklere işaret eden aromatik C=C gerilme titreşimi 1520 cm⁻¹ ve 1600 cm⁻¹'de görülmüştür. Bu titreşim 366-417°C arasındaki sıcaklıklarda çok yoğundur. 1730-1760 cm⁻¹'deki pikler, genellikle karbonil gruplarıyla ilişkilendirilen C=O gerilmesinin karakteristiğidir ve 374 °C'de çok yoğundur. 2880-2963 cm⁻¹ bölgesinde gözlenen titreşimler, alifatik hidrokarbonlardaki C-H gerilmesiyle tanımlanır. Bu titreşimler 366°C ile 468 °C arasında görülmüş olup, en yoğun olduğu sıcaklık ise 374°C'dir. 3650 cm⁻¹'deki gerilme titreşimi, muhtemelen fenolik veya alkol bileşenlerindeki hidroksil gruplarından kaynaklanan -OH gerilmesiyle ilişkilidir. Bu pik 366 °C'den sonra ortaya çıkmaktadır ve en yoğun 374°C'de görülmüştür.

Tablo 6.4. Temel foksiyonel gruplara ait FTIR absorpsiyon bantları, [70, 81, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104]

| Bant tanımlaması | Dalga boyu (cm ⁻¹) |
|---|--------------------------------|
| O-H gerilmesi | 4000-3400 |
| C-H asimetric gerilmesi (-CH ₃) | 3000-2850 |
| C-H asimetric gerilmesi (=CH ₂) | 2935-2915; 2865-2845 |
| C=C gerilmesi (aromatik halka) | 1680-1620 |
| C-O gerilmesi (fenoller) | 1800-1260 |
| C-O gerilmesi (alkoller) | 1260-1000 |
| C-O-C gerilmesi (eterler) | 1275-1020 |
| C-H düzlem dışı bükülme (aromatik halka) | 900-675 |
| C=O gerilmesi (karboksilik asitler, aldehidler, esterler) | 1760-1720 |
| C-O gerilmesi (alifatik esterler) | 1210-1163 |
| C-O gerilmesi (CO) | 2250-2100 |
| C=O gerilmesi (CO ₂) | 2400-2240, 667-670 |
| C-H bükülme (CH ₄) | 1480-1300 |
| C-H gerilme (CH ₄) | 3020-2845 |

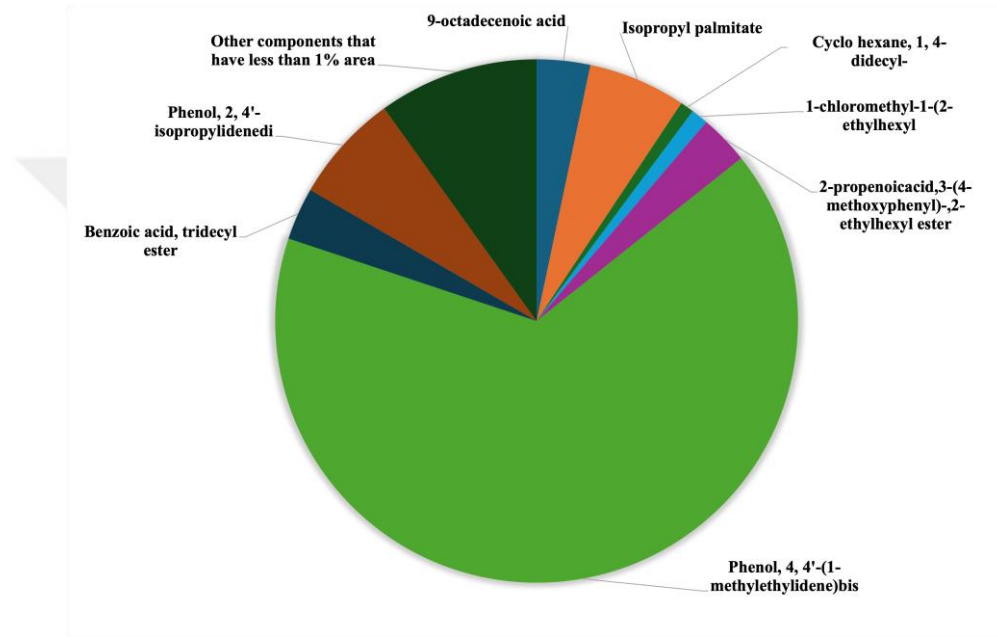


Şekil 6.4. Piroliz uçularına ait FTIR spektrumları

ATK'nın 600 °C'de hızlı pirolizine ait ürünlerin pik alanları esaslı dağılımı Şekil 6.5.'de verilmiştir. Rüzgar türbini kanatları tipik olarak cam elyaflarla birleştirilmiş termoset reçinelerden yapıldığı için bu malzemenin pirolizi, Bisfenol A, 2-4'-Bisfenol A, izopropil palmitat, 9-oktadekenoik asit ve trideasil benzoat dahil olmak üzere çeşitli organik bileşiklerin oluşumuyla sonuçlanmıştır. Epoksi reçineleri yaygın olarak Bisfenol A bazlı olduğundan [105], piroliz yağında yüksek oranda Bisfenol A (%65,78) ve 2-4'-Bisfenol A (%6,75) olması beklenen bir sonuçtur [38, 81, 106, 107]. Katkı maddelerinden veya kaplamalardan gelebilen izopropil palmitat ise pik alanlarının %6,04'ünü oluşturmaktadır. Balsa ağacındaki ligninin termal bozunma ürünlerinin anhidritlerle reaksiyona girerek esterler oluşturduğu piroliz koşullarında izopropil palmitatın oluşması da olasıdır. Rüzgar türbini kanatlarındaki polietilen tereftalat köpüğünün termal bozunmasından oluşan benzoatlar [108], piroliz yağında %3,25 oranında trideasil benzoat olarak bulunmuştur.

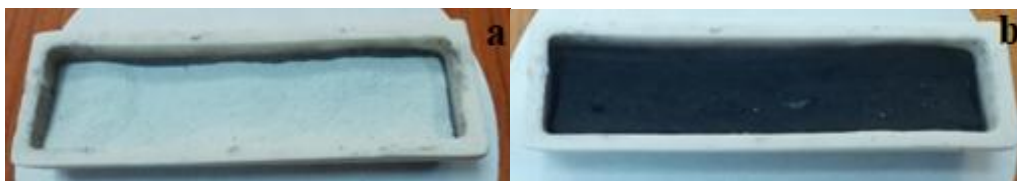
Bu çalışmada, piroliz yağında azot içeren bileşikler tespit edilmemiştir. Bu gözlem, Ge ve diğ. [109], Åkesson ve diğ. [82] tarafından yapılan önceki araştırmalarla çelişmektedir. Bu çalışmalarda, piroliz yağında azotlu bileşenlerin varlığı rüzgar türbini kanatlarında yaygın bir

malzeme olan poliüretanın bozunmasıyla açıklanmıştır. ATK piroliz yağında azotlu bileşenler bulunmaması iki faktöre bağlanabilir. İlk olarak, piroliz uçucularını doğrudan analiz eden Py-GC/MS kullanımı, GC-MS ile analiz edilen piroliz yağlarında tespit edilebilen daha ağır veya daha az uçucu azot içeren bileşikleri yakalayamayabilir. İkinci olarak, bu çalışmada kullanılan rüzgar türbini kanat numunesinin spesifik bileşimi farklı olabilir, potansiyel olarak poliüretan veya diğer azot içeren malzemelerden yoksun olabilir ve bu da azot içeren piroliz ürünlerinin yokluğuna neden olabilir. ATK'nın element analizi (Tablo 6.1.) ATK'nın düşük N içeriğini yansıtarak azot içeren malzemelerin kanat yapısındaki düşük miktarını desteklemektedir.



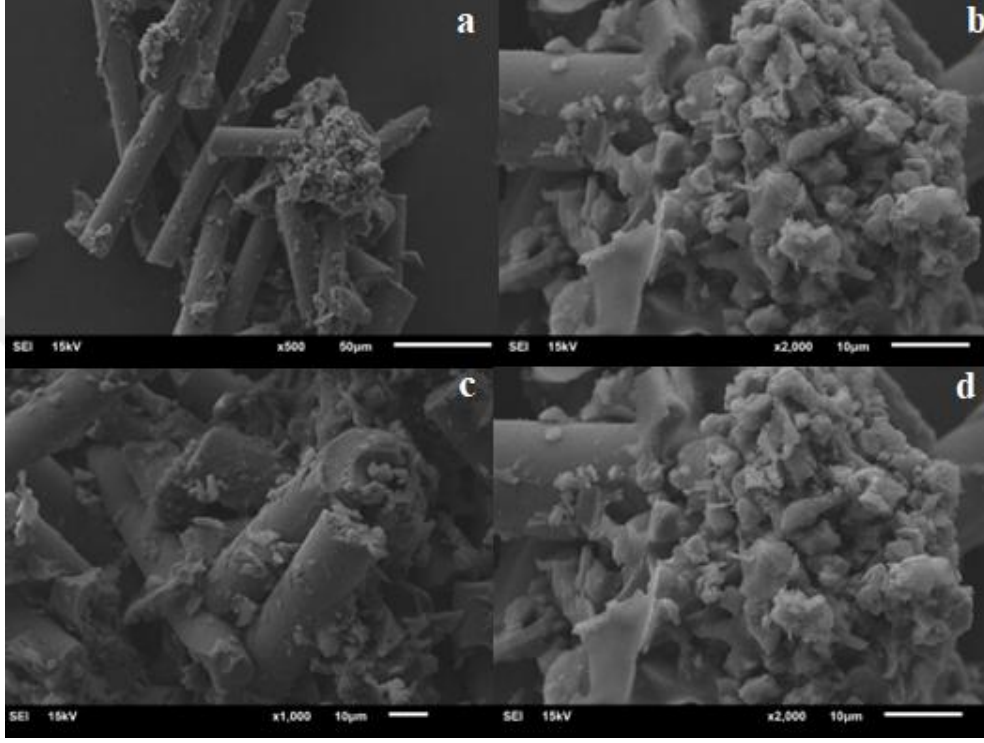
Şekil 6.5. ATK numunelerinin hızlı pirolizine ait ürünlerin bağlı pik alanları

ATK'a ait pirokoklar, ATK'nın kuru azot ortamı altında, 10 °C/dk hızla 600 °C 'ye kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta 1 saat tutulmasıyla elde edilmiştir. Şekil 6.6.'da pirokokun görünümü verilmiştir. Üç tekrar halinde yapılan piroliz işleminde ortalama pirokok verimi %61,73'tür. Pirokoklar, sırasıyla ağırlıkça %7,36 karbon, %0,34 hidrojen, %0,07 kükürt ve %0,33 azot içermektedir. Yüksek cam elyaf içeriği nedeniyle pirokokların kül içeriği yüksektir (ağırlıkça %90,6).

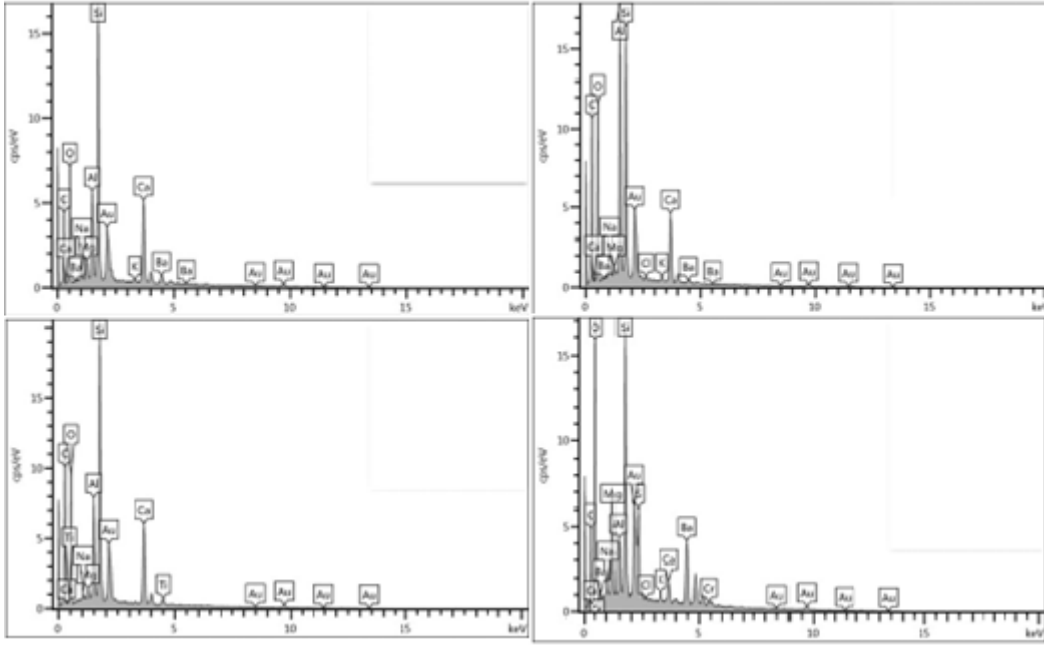


Şekil 6.6. ATK numunesi (piroliz öncesi) (a), ATK'a ait pirokok (b)

Şekil 6.7.'de verilmiş olan SEM görüntüleri ATK'nın pirokoklarına aittir. Cam elyafların yüzeylerine tutunmuş topaklar veya agregalar dikkat çekmektedir. Bu, piroliz sırasında yarıkok ve cam elyaflar arasında önemli bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Şekil 6.8. ve Tablo 6.5.'deki EDS sonuçları, pirokokların esas olarak C, Si ve O'den oluştuğunu, Ca, Al ve Ba gibi elementlerin az bir oranda katkı sağladığını doğrulamaktadır.



Şekil 6.7. ATK'nın pirokonuna ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK'nın pirokonuna ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (b), ATK'nın pirokonuna ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme) (c), ATK'nın pirokonuna ait SEM görüntüsü (x2000 büyütme) (d)



Şekil 6.8. Pirokok EDS analizi sonuçları

Tablo 6.5. ATK pirokokuna ait SEM/EDS analizine göre yüzey elementlerinin dağılımı (%)

| Element | | | | |
|---------|------|------|------|------|
| C | 37,3 | 47,2 | 43,5 | 27,9 |
| O | 31,8 | 31 | 32,8 | 31,7 |
| Si | 12,4 | 7,3 | 10,6 | 8,3 |
| Ca | 9,1 | 4,9 | 7,9 | 1,4 |
| Al | 3,9 | 7,5 | 3,7 | 1,8 |
| Ba | 3,7 | 0,9 | 0 | 19,4 |
| Mg | 0,9 | 0,2 | 0,4 | 3,7 |
| Na | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,5 |
| K | 0,3 | 0,4 | 0 | 0,6 |
| Cl | 0 | 0,2 | 0 | 0,2 |
| Ti | 0 | 0 | 0,9 | 0 |
| S | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Cr | 0 | 0 | 0 | 0,6 |

Yousef ve diğ. [101] yapmış olduğu piroliz çalışmasında, türbin kanadı numunesini azot ortamı altında (60 mL/dk N₂) 20 °C/dakika ısıtma hızıyla sırasıyla 500, 550 ve 600 °C'ye ısıtmıştır. Çalışmada elde etmiş olduğu sonuçlar Tablo 6.6.'da verilmiştir. ATK ile elde edilen sonuçlar, Yousef ve diğ. çalışmasına ait sonuçlarla uyumludur [101].

Tablo 6.6. Atık rüzgar türbin kanadının farklı sıcaklıklardaki piroliz ürün yüzdeleri [101]

| Piroliz ürünleri | 500°C | 550°C | 600°C |
|------------------|-------|-------|-------|
| Piroliz yağı (%) | 44,54 | 41,39 | 39,45 |
| Katı ürün (%) | 55,03 | 58,02 | 60,42 |
| Gazlar (%) | 0,43 | 0,59 | 0,13 |

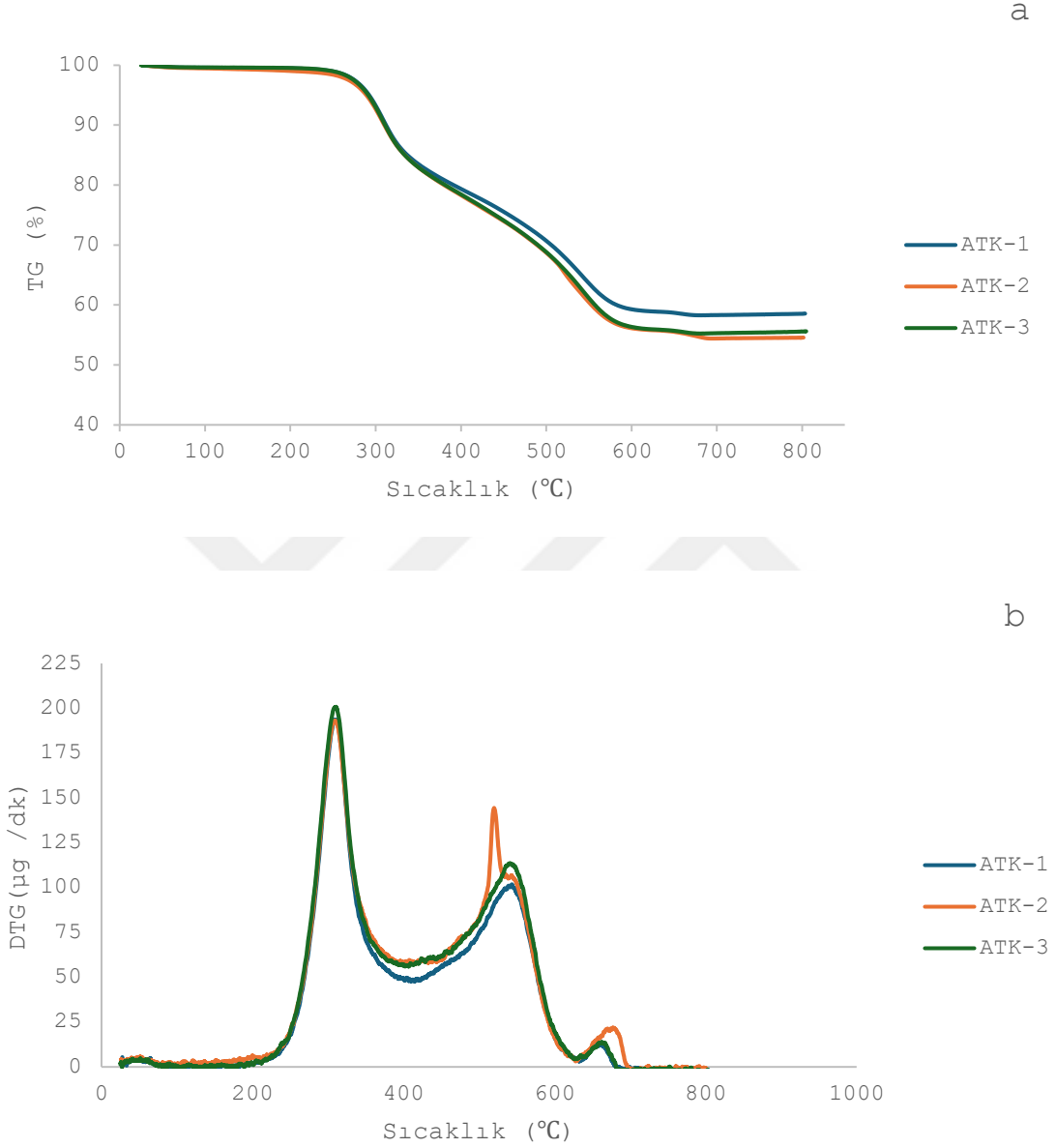
Yun ve diğ. çalışmasında [85], CETP (cam lifleri ve polimer bileşenlerinden oluşan termostatik bir plastik), 500°C'den 900°C'ye kadar 5°C/dakika hızla ısıtılarak piroliz özellikleri analiz edilmiştir. Ağırlık kaybı en fazla 230-430°C arasında gözlemlenmiş, aktivasyon enerjisi ise 41,4 kJ/mol ile 78,4 kJ/mol arasında değişmiştir.

Karbon elyaf takviyeli ve yapısında doymamış polyester reçine bulunan bir kanat atığının kullanıldığı çalışmada ise numune 600°C'ye kadar ısıtılan bir reaktörde piroliz işlemine maruz bırakılmıştır. Doymamış polyester reçine fraksiyonu sıvı ve gaz fazlarına ayrılırken, karbon elyaf kalıntı olarak kalmıştır. Piroliz sonuçları, 500°C'nin doymamış polyester reçinenin stiren açısından zengin yağa ve gaz ürünlerine ayrışması için yeterli olduğunu göstermiş ve sırasıyla %15,23 yağ ürün %6,83 oranında ise gaz ürün verimi sağladığını, aynı zamanda %77,93 oranında karbon elyaf içeren bir kalıntı bıraktığını göstermiştir [110]. Leeds Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, statik yatak reaktörü kullanılarak poliyesterin 450°C'de tamamen ayrıştığı, diğer polimerlerin (epoksi, fenolik reçine, polipropilen, polietilen, vinil ester) ise 500–550°C aralığında ayrıştığı sonucuna varılmıştır; verimler nihai sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, 500°C'de kalsiyum karbonat, alüminyum tri-hidrat dolgu maddeleri ve cam elyaf içeren poliyester matris bir örnek, %45,8 katı, %45,7 yağ ve %8,5 gaz ürün verimi sağlamaktadır [111].

6.3. Yanma Profili

ATK numunelerinin hava ortamında termal bozunmasına ait termogravimetrik eğriler Şekil 6.9.'da gösterilmiş olup, yanma karakteristiklerine ait detaylar Tablo 6.7.'de verilmiştir. Hava ortamında gerçekleşen termal bozunma üç belirgin aşama sergilemiştir. 200 °C ile 400 °C arasında gerçekleşen ilk aşama, en reaktif aşama olup, ağırlık kaybı hızının maksimum olduğu sıcaklık 309,6 °C - 310,5 °C aralığında gözlemlenmiştir. Yaklaşık %21,7 ağırlık kaybına neden olan bu aşama, muhtemelen bu sıcaklık aralığında bozulan epoksi reçinesi gibi organik matris bileşenlerinin ayrışmasıyla ilişkilidir. 400 °C ile 642 °C arasındaki ikinci aşamada %21,43 ağırlık kaybı görülmüştür. Bu aşamadaki pik, 520 °C ile 543,2 °C arasındadır. Bu aşama muhtemelen kalan karbonlu yapının oksidasyonuna karşılık gelmektedir. 642 °C'den 683 °C'ye kadar olan üçüncü aşamada, yapıdaki karbonatlı yapıların (katkı malzemesi olarak kullanılan

CaCO₃ gibi bozunmasına ait minimal ağırlık kaybı (%0,6) görülmüştür. ATK numunelerinin ortalama tutuşma sıcaklığı 274 °C olup, tükenme sıcaklığı 700 °C olarak bulunmuştur.



Şekil 6.9. ATK'nin yanma-TG eğrisi (a), ATK'nin yanma-DTG eğrisi (b)

Yanabilirlik indeksi (S), kütle kaybı oranları, tutuşma sıcaklığı (T_i) ve tükenme sıcaklığına (T_b) bağlı olarak, Yanabilirlik indeksi şu şekilde tanımlanabilir:

$$S=(dm/dt)_{\max} \cdot (dm/dt)_{\text{ort}} / T_i^2 \cdot T_b \quad (2)$$

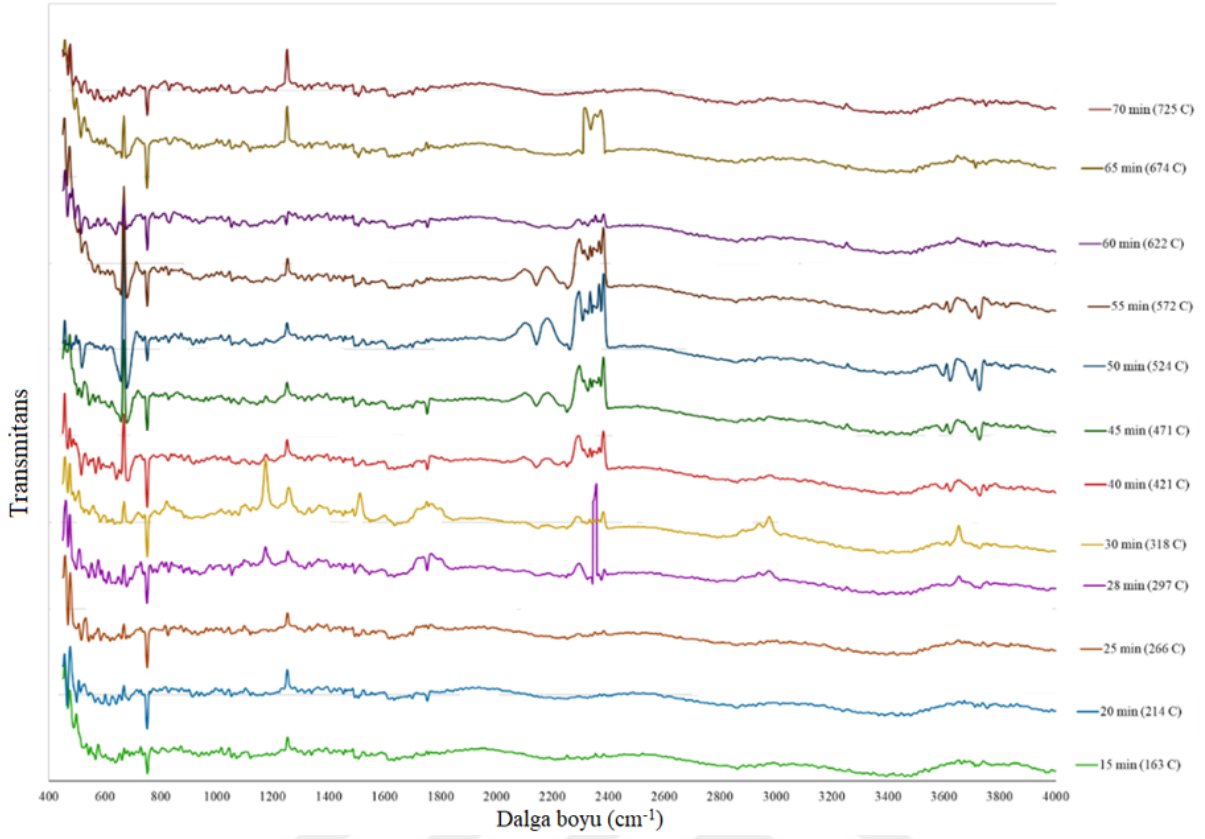
Burada, (dm/dt)_{max} ve (dm/dt)_{ort} sırasıyla maksimum kütle kaybı hızı (%/dak) ve ortalama kütle kaybı hızıdır (%/dak). Tutuşma sıcaklığı kesişme metodu ile TG-DTG eğrilerinin beraber

kullanılmasıyla bulunur. Tükenme sıcaklığı ise dönüşümün sabit kaldığı sıcaklığa karşılık gelmektedir. Verimli bir yanma, yüksek kütle kaybı oranları ve düşük tutuşma ve tükenme sıcaklıklarını gerektirir.

Tablo 6.7. ATK'nın yanma karakteristiğine ait parametreler

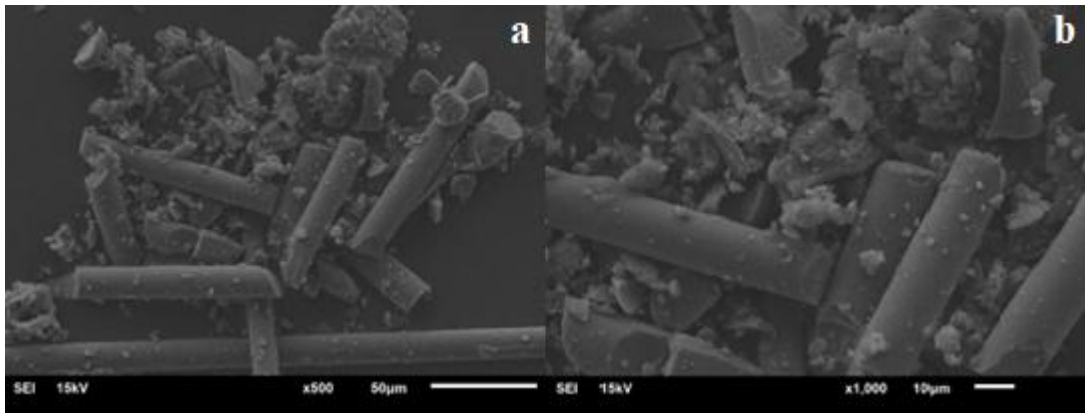
| | Dönüşüm (%) | T _{pik} (°C) | T _i (°C) | T _b (°C) | (dm/dt) _{max} (µg/dak) | (dm/dt) _{max} (%/dak) | S (% ² /dak ² x °C ³) |
|--------------|-------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| ATK Numune 1 | 44.4 | 310.5 | 277 | 681 | 200.82 | 6.16 | 3.9 x 10 ⁻⁷ |
| ATK Numune 2 | 45.4 | 309.6 | 274 | 696.7 | 193.13 | 5.87 | 4 x 10 ⁻⁷ |
| ATK Numune 3 | 41.4 | 309.7 | 277 | 681.7 | 193.64 | 6.05 | 3.7 x 10 ⁻⁷ |

ATK numunelerinin yanma emisyonlarına ilişkin bilgi TG-FTIR analizi ile sağlanmıştır (Şekil 6.10.). CO₂'ye karşılık gelen 670 cm⁻¹'deki titreşim, 214 °C'den 674 °C'ye kadar tespit edilmiş olup, en yoğun pik 421 °C ile 572 °C arasındadır. Yapıdaki karbonlu bileşenlerin oksitlenmesi nedeniyle geniş bir sıcaklık aralığında CO₂ çıkışı görülmüştür. Ek olarak, ester gruplarında bulunan C=O gerilmesi, 297 °C ile 421 °C arasında 1163 cm⁻¹'de gözlemlenmiştir. En yoğun pik, 318 °C 'de olup, reçinedeki ester bağlarının bozunduğunu göstermektedir. Aromatik yapılarıdaki gerilmeyi gösteren pik (1520 cm⁻¹), 318 °C'de en yoğundur, polimer matrisindeki aromatik grupların ayrıştığını göstermektedir. 421 °C ile 572 °C arasında, 2100 cm⁻¹ ve 2170 cm⁻¹'de CO gerilmesi gözlenmiştir, pikler 524 °C ve 572 °C 'de yoğunlaşmıştır. Oluşan su buharı nedeniyle görülen OH gerilme titreşimi (3600 cm⁻¹-3760 cm⁻¹), 471 °C ile 572 °C arasında gözlenmiştir.

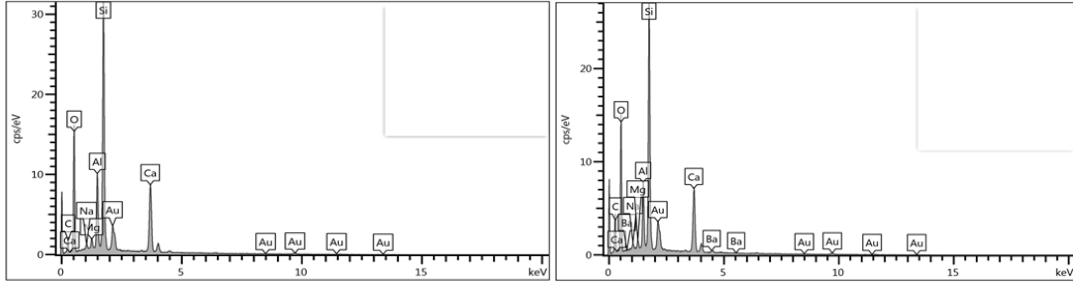


Şekil 6.10. Yanma gazlarına ait FTIR grafiği

ATK külüne ait SEM görüntüsü Şekil 6.11.'de verilmiştir. Kül parçacıklarıyla çevrili, belirgin ve uzun cam elyafları görmek mümkündür. Kül, elyafların etrafına dağılmış, elyaf yüzeylerine görünür şekilde bağlanmamıştır. Bu, yanma sırasında kül oluşturan bileşenlerin cam elyaflarını kaynaştırmak yerine onlardan ayrıldığını göstermektedir. Cam elyaflar pürüzsüz yüzeylerini korurken, granüler ve düzensiz görünen kül parçacıkları ayrı ayrı yerleşmiştir. Şekil 6.12.'de verilen EDS sonuçlarına göre de kül ağırlıklı olarak O, Si, Ca, Al ve Mg bulundurmaktadır.



Şekil 6.11. ATK külüne ait SEM görüntüsü (x500 büyütme) (a), ATK külüne ait SEM görüntüsü (x1000 büyütme) (b)



Şekil 6.12. ATK külüne ait EDS analizinin sonuçları

Tablo 6.8. ATK külüne ait SEM/EDS analizine göre yüzey elementlerinin dağılımı (%)

| Element | | |
|---------|------|------|
| O | 43,7 | 47 |
| C | 23,3 | 12,5 |
| Si | 16,3 | 19,9 |
| Ca | 10,3 | 13,3 |
| Al | 4,2 | 5,8 |
| Ba | 1,1 | 0 |
| Mg | 0,6 | 0,9 |
| Na | 0,5 | 0,5 |



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, kullanım ömrü dolmuş rüzgar türbin kanatlarının ya da diğer bir ifadeyle atık türbin kanatlarının yönetimiyle ilgili zorlukları ele almış olup, tez kapsamında önce yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım seçenekleri incelenmiş, daha sonra yakma ve piroliz metotları deneysel olarak çalışılmıştır. Sürdürülebilir geri dönüşüm stratejilerinin geliştirilmesini desteklemeyi amaçlayan tezin sonuçları şunlardır:

- ATK'nın ortalama ağırlıkça %29.5'i karbon, %3.5'si hidrojen, %7.54'ü oksijen ve %58'i külden oluşmaktadır. ATK numunelerinin ortalama üst ısıl değeri 11949.5 kJ/kg olarak belirlenmiştir.
- Atık türbin kanatlarının pirolizi 225 °C ile 525 °C arasında belirgin bir termal bozunma davranışı göstermiştir. 625 °C ile 675 °C aralığında da çok az bir miktarda termal bozunmaya ait kütle azalması dikkat çekmektedir. Piroliz gazlarının büyük bir kısmı olan alkoller, esterler, aromatik bileşikler ve karbonil grupları gibi çeşitli uçucu bileşikler yapıyı 366°C ile 417°C arasında terk etmiştir. Piroliz yağı, Bisfenol A açısından zengin olup, daha küçük oranlarda esterler ve benzoatlar içermektedir. Piroliz yağı içerisinde azotlu bileşenlere rastlanmamıştır. Ortalama pirokok verimi %61,73 olarak bulunmuştur. Kanatlardaki yüksek miktardaki cam elyaf nedeniyle pirokokun kül içeriği %90,6'dır. Pirokokun ağırlıkça %7,36'sı karbondur. Pirokoktaki cam elyafı geri kazanmak için oksidasyon yapılması gereklidir. Ya da pirokok içindeki karbon ve cam elyaf eş zamanlı olarak geri kazanılabilir. (Örneğin porselen üretimi gibi)
- Atık türbin kanatlarının yanma prosesi üç aşamadan oluşur ve 200 °C ile 400 °C arasındaki sıcaklık aralığında belirgin bir kütle kaybı gözlemlenmiştir. Ortalama tutuşma sıcaklığı ve tükenme sıcaklığı sırasıyla 274°C ve 697°C'dir. Yanabilirlik indeksi ortalaması $4,10 \cdot 10^{-7} \%^2/\text{dak}^2 \cdot ^\circ\text{C}^3$ olup, diğer referans malzemelere kıyasla orta düzeyde bir yanma verimliliğini göstermektedir. Atık türbin kanatlarının organik bileşenlerinin oksidasyonu sırasında 214 °C ile 674°C arasındaki süre boyunca CO₂ oluşumu gözlemlenmiş, en yoğun olduğu sıcaklık ise 421°C ile 572°C arasında gerçekleşmiştir. Emisyonlarda, CO ve su buharının en yoğun olduğu sıcaklık aralığı 524°C ile 572°C arasındadır. Atık türbin kanatlarının külü incelendiğinde, külün cam elyaflara yapışmamış olduğu, aralarında sınırlı bir etkileşim olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışma, atık türbin kanatlarının ekonomik ve çevresel değerini maksimize etmek için gelişmiş yaklaşımların gerekliliğini vurgulamaktadır. Diğer bir ifadeyle, kanatların tek bir yöntemle etkin bir şekilde yönetilmesinin zor olduğu, bunun yerine farklı çok-kademeli

Çözümlerin uygulanması gerektiği düşünülmektedir. Böyle bir yaklaşım, enerji geri kazanımı kadar madde geri kazanımına da imkan verecek ve sürdürülebilir ekonomiye katkı sağlayacaktır.

Kanat üretiminde standart bileşim olmaması (kanat üreticilerine göre farklılık göstermesi) ve kökten uca bileşimin ve yapının değişmesi atık kanadın geri kazanılmasında zorluk çıkarıcı bir unsurdur. Bu hususta yapılacak en iyi yaklaşım kanadın sökümünden sonra belirli yerlerinden parçalanarak, bu yapıların bileşimlerine uygun geri dönüşüm ya da geri kazanım metotlarını irdelemek olabilir.



KAYNAKLAR

- [1] IEA, International Energy Agency, «Integrating Solar and Wind Global experience and emerging challenges,» IEA, International Energy Agency, European Union, 2024.
- [2] IRENA, «Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [3] A. M. Cunliffe, N. Jones ve P. T. Williams, «Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis: thermo-gravimetric and bench-scale investigations,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 70, no. 2, pp. 315-338, 2 December 2003.
- [4] J. Jensen ve K. Skelton, «Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 97, pp. 165-176, 2018.
- [5] R. Fonte ve G. Xydis, «Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials,» *Journal of Environmental Management*, cilt 287, p. 112269, 2021.
- [6] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan ve S. Zafar, «A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 215, no. 108768, 2021.
- [7] J. Beauson, A. Laurent, D. Rudolph ve J. . P. Jensen, «The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 155, no. 111847, 2022.
- [8] M. J. Leon, «Recycling of wind turbine blades: Recent developments,» *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, cilt 39, no. 100746, 2023.
- [9] V. Sommer ve G. Walther, «Recycling and recovery infrastructures for glass and carbon fiber reinforced plastic waste from wind energy industry: A European case study,» *Waste Management*, cilt 121, pp. 265-275, 2021.
- [10] H. Jeswani, C. Krüger, M. Russ, M. Horlacher, F. Antony, S. Hann ve A. Azapagic, «Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery,» *Science of the Total Environment*, cilt 769, no. 144483, 2021.
- [11] T. M. Letcher, «Why Wind Energy?,» %1 içinde *Wind Energy Engineering*, South Africa, University of KwaZulu-Natal, Durban, 2017.
- [12] Statista Research Department, «Statista- Energy & Environment»Energy,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.statista.com/statistics/273273/world-electricity-generation-by-energy-source/>. [Erişildi: 4 October 2024].

- [13] IEA, «International Energy Agency,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.iea.org/>. [Erişildi: 2 10 2021].
- [14] World Wind Energy Association, «WWEA Annual Report 2023,» World Wind Energy Association, Bonn, Germany, 2024.
- [15] G. L. Johnson, WIND ENERGY SYSTEMS, Manhattan, KS: Englewood Cliffs: Prentice-Hall., 2006.
- [16] R. W. Righter, «Brush's Mammoth Dynamo.» In *Wind Energy in America*, 1996, pp. 42-58.
- [17] Z. Shahan, «Renewabl Energy World,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/history-of-wind-turbines/>. [Erişildi: 21 11 2014].
- [18] By Windmills Tech Editor, «Windmills Tech,» [Çevrimiçi]. Available: <https://windmillstech.com/an-overview-of-some-historic-wind-turbines-part-1/>. [Erişildi: 1 12 2015].
- [19] J. Layton, «Evrım Ağacı,» [Çevrimiçi]. Available: <https://evrimagaci.org/ruzgar-enerjisi-nedir-bir-ruzgar-turbini-nasil-enerji-uretir-9817>. [Erişildi: 1 Ocak 2021].
- [20] İ. Yavuz ve H. Özbay, «Rüzgar Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği,» *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, cilt 2, no. 2, pp. 58-68, 2020.
- [21] T. Letcher, *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Hollanda: Elsevier, 2023.
- [22] S. Fakirov, «Composite materials – is the use of proper definitions important?,» *Materials Today*, cilt 18, no. 10, pp. 528-529, 2015.
- [23] F. Yastımoğlu ve A. Özkan, «Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının,» *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt 5, no. 1, pp. 56-66, 2017.
- [24] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind*, New York: Routledge, 2015.
- [25] S. KARABAĞ, «RÜZGÂR TÜRBİNİ KANADI İMALATI,» %1 içinde *İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi*, İzmir, 2011.
- [26] M. Yağlıkçı ve M. S. Çeliktaş, «Kompozit Rüzgâr Türbin Kanatlarının Yorulma Ömrüne ve Dayanımına Bağlı Olarak Malzeme Seçimi ve Gelecek Projeksiyonu,» *Mühendis ve Makina*, cilt 59, no. 690, pp. 27-44, 1 Ocak 2018.
- [27] M. L. Jay, «Composites Manufacturing,» [Çevrimiçi]. Available: <https://compositesmanufacturingmagazine.com/2022/08/biocomposites-in-wind-energy/2/>. [Erişildi: 2 August 2022].

- [28] S.-J. Park ve M.-K. Seo, «Element and Processing,» %1 içinde *Interface Science and Technology*, South Korea, Department of Chemistry, Inha University, 2011, pp. 431-499.
- [29] M. Effing, «Expert insights in Europe's booming composites market,» *Reinforced Plastics*, cilt 62, no. 4, pp. 219-223, 2018.
- [30] A. Aldalbahi, M. . E. El-Naggar, M. H. El-Newehy, M. Rahaman, M. R. Hatshan ve T. A. Khattab, «Effects of Technical Textiles and Synthetic Nanofibers on Environmental Pollution,» *Polymers*, cilt 13, no. 155, 2021.
- [31] D. Fecko, «High strength glass reinforcements still being discovered being discovered,» *Reinforced Plastics*, cilt 50, no. 4, pp. 40-44, 2006.
- [32] L. Mishnaevsky, K. Branner, J. Beauson, M. McGugan, B. F. Sørensen ve H. Nørgaard Petersen, «Materials for Wind Turbine Blades: An Overview,» *Materials*, cilt 10, no. 1285, 2017.
- [33] A. v. Oudheusden, *Recycling of composite materials*, 2019.
- [34] S.-J. Park ve M.-K. Seo, «Types of Composites,» %1 içinde *Interface Science and Technology*, South Korea, Department of Chemistry, Inha University, 2011, pp. 501-629.
- [35] D. A. Baker ve T. . G. Rials, «Recent advances in low-cost carbon fiber manufacture from lignin,» *Journal of Applied Polymer Science*, cilt 130, no. 2, pp. 711-728, 2013.
- [36] H. G. Willett, «Characterisation of composites for wind turbine blades,» *Reinforced Plastics*, cilt 56, no. 5, pp. 34-36, 2012.
- [37] F. Arias, *Assessment of Present/Future Decommissioned Wind Blade Fiber-Reinforced Composite Material in the United States*, City College of New York – City University of New York Department of Civil Engineering , 2016.
- [38] J. Yang, L. Cheng, J. Gu, S. Tian, J. Yang, T. Huhe, H. Yuan ve Y. Chen, «Upcycling of epoxy resin from waste wind turbine blades: Pyrolysis-methylation tandem reaction to methylated phenols and hexamethylbenzene,» *Journal of Cleaner Production*, cilt 445, p. 140987, 2024.
- [39] A. Kandelbauer, G. Tondi, O. . C. Zasko ve S. . H. Goodman, «Unsaturated polyesters and vinyl esters,» %1 içinde *Handbook of Thermoset Plastics*, William Andrew, 2022, pp. 97-158.
- [40] F.-L. Jin, X. Li ve S.-J. Park, «Synthesis and application of epoxy resins: A review,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, cilt 29, pp. 1-11, 2015.
- [41] M. . R. Khosravani, «Composite Materials Manufacturing Processes,» *Applied Mechanics and Materials*, cilt 110, pp. 1361-1367, 2011.

- [42] P. K. Balguri, D. H. Samuel ve U. Thumu, «A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites,» *Materials Today: Proceedings*, cilt 44, pp. 346-355, 2021.
- [43] Epoxy Resin Committee, *Epoxy resins in wind energy applications*, Assessment of potential BPA emissions, 2015.
- [44] S. Mali ve P. Garrett, «Life Cycle Assessment of electricity production from an Onshore V150-4.2MW wind plant, version: 1.3,» Vestas, Aarhus (Denmark), 2022.
- [45] G. Lichtenegger, A. A. Rentizelas, N. Trivyza ve S. Siegl, «Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050,» *Waste Management*, cilt 106, pp. 120-131, 2020.
- [46] W. Zhang , H. Yu, B. Yin, A. Akbar ve K. Liew, «Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling,» *Journal of Cleaner Production*, cilt 426, no. 139184, 2023.
- [47] İzmir Kalkınma Ajansı, «İzmir İli Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm Tesisi Ön Fizibilite Raporu,» İzmir Kalkınma Ajansı, İzmir, 2021.
- [48] Official Journal of the European Union, «Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives,» [Çevrimiçi]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>. [Erişildi: 19 November 2008].
- [49] B. Owens, J. Weber, B. . F. Yancey, L. Zhuang ve R. Talreja, «Sustainability Assessment of a Wind Turbine Blade: An Engineering Framework,» %1 içinde *Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Boston, Massachusetts, 2013.
- [50] B. Öktem , «Atık Yönetiminde Entegre Uygulama,» *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi; Cilt 6 Sayı 2/1*, cilt 6, no. 2, pp. 135-147, 2016.
- [51] N. Wang, Y. Bai, Z. Guo, Y. Fan ve F. Meng, «Synergies between the circular economy and carbon emission reduction,» *Science of The Total Environment*, cilt 951, no. 175603, 2024.
- [52] WindEurope, Cefic and EuCIA, «Accelerating Wind Turbine Blade Circularity,» WindEurope, 2020.
- [53] B. Dunbar, «Technology readiness levels demystified,» NASA, NASA, 29, 2022., 2017.
- [54] G. Korkmaz, «Savunma Bilimleri Dergisi,» *Savunma Projelerinin Başarısında Teknoloji Hazırlık Seviyesinin Rolü: Vaka Analiz Çalışması*, pp. 75-96, 2023.
- [55] Y. Hu, Y. Zhang, Y. Li, Y. Wang, G. Li ve X. Liu, «Wind turbine blade recycling: A review of the recovery and high-value utilization of decommissioned wind turbine blades,» *Resources, Conservation and Recycling*, cilt 210, no. 107813, 2024.

- [56] W. Yang, K.-H. Kim ve J. Lee, «Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis,» *Journal of Cleaner Production*, cilt 376, no. 134292, 2022.
- [57] A. Ramos, F. Magalhães, D. Neves, N. Gonçalves, A. Baptista, T. Mata ve N. Correia, «Wind energy sustainability in Europe—A review of knowledge gaps, opportunities and circular strategies,» *Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering*, cilt 5, no. 4, pp. 562-602, 2023.
- [58] B. Fu, K. Liu, J. Chen ve J. Teng, «Concrete reinforced with macro fibres recycled from waste GFRP,» *Construction and Building Materials*, cilt 310, no. 125063, 2021.
- [59] S. Pickering, «Recycling technologies for thermoset composite materials—current status,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, cilt 37, no. 8, pp. 1206-1215, 2006.
- [60] G. Oliveux, L. . O. Dandy ve G. A. Leeke, «Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties,» *Progress in Materials Science*, cilt 72, pp. 61-99, 2015.
- [61] V. Revilla-Cuesta, J. Manso-Morato, N. Hurtado-Alonso, M. Skaf ve V. Ortega-López, «Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component,» *Journal of Building Engineering*, cilt 82, no. 108383, 2024.
- [62] M.-x. Xu, H.-w. Ji, Y.-c. Wu, X.-x. Meng, J.-y. Di, J. Yang ve Q. Lu, «Recovering glass fibers from waste wind turbine blades: Recycling methods, fiber properties, and potential utilization,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 202, no. 114690, 2024.
- [63] W. Dang, M. Kubouchi, H. Sembokuya ve K. Tsuda, «Chemical recycling of glass fiber reinforced epoxy resin cured with amine using nitric acid,» *Polymer*, cilt 46, no. 6, p. 1905–1912, 2005.
- [64] R. P. Hernanz, J. G. Serna, C. Dodds , J. Hyde, M. Poliakoff, M. J. Cocero, S. Kingman, S. Pickering ve E. Lester, «Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions,» *The Journal of Supercritical Fluids*, cilt 46, no. 1, p. 83–92, 2008.
- [65] H. U. Sokoli, M. E. Simonsen, R. P. Nielsen, K. R. Arturi ve E. G. Søgaaard, «Conversion of the matrix in glass fiber reinforced composites into a high heating value oil and other valuable feedstocks,» *Fuel Processing Technology*, cilt 149, p. 29–39, 2016.
- [66] C. Mattsson, A. André, M. Juntikka, T. Tränkle ve R. Sott, «Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL,» %1 içinde *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Chicago, 2020.
- [67] R. Muzyka, H. Mumtaz, S. Sobek, S. Werle, J. Adamek, D. Semitekolos, C. A. Charitidis , T. Tiriakidou ve M. Sajdak, «Solvolysis and oxidative liquefaction of the end-of-life composite wastes as an element of the circular economy assumptions,» *Journal of Cleaner Production*, cilt 478, no. 143916, 2024.

- [68] C. Branfoot, H. Folkvord, M. Keith ve G. Leeke, «Recovery of chemical recyclates from fibre-reinforced composites: A review of progress,» *Polymer Degradation and Stability*, cilt 215, no. 110447, 2023.
- [69] H. Mumtaz, S. Werle, R. Muzyka, S. Sobek ve M. Sajdak, «Oxidative Liquefaction, an Approach for Complex Plastic Waste Stream Conversion into Valuable Oxygenated Chemicals,» *Energies*, cilt 17, no. 5, 2024.
- [70] H. Mumtaz, S. Sobek, M. Sajdak, R. Muzyka ve S. Werle, «An experimental investigation and process optimization of the oxidative liquefaction process as the recycling method of the end-of-life wind turbine blades,» *Renewable Energy*, cilt 211, pp. 269-278, 2023.
- [71] R. Muzyka, S. Sobek, A. Korytkowska-Wałach, Ł. Drewniak ve M. Sajdak, «Recycling of both resin and fibre from wind turbine blade waste via small molecule-assisted dissolution,» *Scientific Reports volume*, cilt 13, no. 9270, 2023.
- [72] W. A. W. Mahari, E. Azwar, S. Y. Foong, A. Ahmed, W. Peng, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, Y.-K. Park, C. Sonne ve S. S. Lam, «Valorization of municipal wastes using co-pyrolysis for green energy production, energy security, and environmental sustainability: A review,» *Chemical Engineering Journal*, cilt 421, p. 129749, 2021.
- [73] J. Lee, A. K. Sarmah ve E. E. Kwon, «Chapter 1 - Production and Formation of Biochar,» %1 içinde *Biochar from Biomass and Waste*, Elsevier, 2018, pp. 3-18.
- [74] D. Neves, H. Thunman, A. Matos, L. Tarelho ve A. Gómez-Barea, «Characterization and prediction of biomass pyrolysis products,» *Progress in Energy and Combustion Science*, cilt 37, pp. 611-630, 2011.
- [75] A. Torres, I. d. Marco, B. Caballero, M. Laresgoiti , J. Legarreta , M. Cabrero, A. González , M. Chomón ve K. Gondra, «Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained,» *Fuel*, cilt 79, no. 8, pp. 897-902, 2000.
- [76] S. Liu, J. Guo ve C. Wu, «Improving the pozzolanic reactivity of recycled powders from retired wind turbine blades by removing the polymer phase through thermal treatment,» *Journal of Building Engineering*, cilt 96, no. 110387, 2024.
- [77] R. S. Ginder ve S. Ozcan, «Recycling of Commercial E-glass Reinforced Thermoset Composites via Two Temperature Step Pyrolysis to Improve Recovered Fiber Tensile Strength and Failure Strain,» *Recycling*, cilt 4, no. 2, 2019.
- [78] S. Naqvi, H. M. Prabhakara, E. Bramer, W. Dierkes, R. Akkerman ve G. Brem, «A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy,» *Resources, Conservation and Recycling*, cilt 136, pp. 118-129, 2018.
- [79] S. Yousef, J. Eimontas, N. Striūgas ve M. A. Abdelnaby, «Synthesis of value-added aromatic chemicals from catalytic pyrolysis of waste wind turbine blades and their

- kinetic analysis using artificial neural network,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 177, no. 106330, 2024.
- [80] R. Othman, . N. I. Ismail, M. A. A. H. Pahmi, M. H. M. Basri, H. Sharudin ve A. R. Hemdi, «APPLICATION OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY: A REVIEW,» *Journal of Mechanical Manufacturing*, cilt 1, pp. 144-154, 2018.
- [81] M.-x. Xu, H.-w. Ji, Y.-c. Wu, J.-y. Di, X.-x. Meng, H. Jiang ve Q. Lu, «The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 251, p. 110493, 2023.
- [82] D. Åkesson, Z. Foltynowicz ve M. Skrifvars, «Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, cilt 31, no. 17, 2012.
- [83] A. M. Cunliffe ve P. T. Williams, «Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis,» *Fuel*, cilt 82, no. 18, pp. 2223-2230, 2003.
- [84] F. López, M. Martín, F. Alguacil, J. M. Rincón, T. Centeno ve M. Romero, «Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass–ceramic material,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 93, pp. 104-112, 2012.
- [85] Y. M. Yun, M. W. Seo, G. H. Koo, H. W. Ra, S. J. Yoon, Y. K. Kim, J. G. Lee ve J. H. Kim, «Pyrolysis characteristics of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) under non-isothermal conditions,» *Fuel*, cilt 137, pp. 321-327, 2014.
- [86] Y. M. Yun, M. W. Seo, H. W. Ra, G. H. Koo, J. S. Oh, S. J. Yoon, Y. K. Kim , J. G. Lee ve J. H. Kim, «Pyrolysis characteristics of glass fiber-reinforced plastic (GFRP) under isothermal conditions,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 114, pp. 40-46, 2015.
- [87] L. Giorgini, L. Mazzocchetti, C. Leonardi, G. Zattini, M. Cavazzoni, I. Montanari, C. Tosi ve T. Benelli, «Pyrolysis of fiberglass/polyester composites: Recovery and characterization of obtained products,» *FME Transactions*, cilt 44, no. 4, pp. 405 - 414, 2016.
- [88] J. A. Onwudili, N. Miskolczi, T. Nagy ve G. Lipóczy, «Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 91, pp. 154-161, 2016.
- [89] Q. Ren, Z. Lei, S. Hu, Y. Ding, L. He , S. Su, Y. Wang, L. Jiang, J. Xu ve J. Xiang , «Novel photothermal pyrolysis on waste fan blade to generate bisphenol A,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 169, no. 105828, 2023.

- [90] D. Royuela, J. D. Martínez, J. M. López, M. S. Callén, T. García, R. Verdejo, R. Murillo ve A. Veses, «Pursuing the circularity of wind turbine blades: Thermochemical recycling,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 181, p. 106657, 2024.
- [91] X. Xiong, L. Li, F. Chen, J. Zhang ve H. Tan, «Typical pollutant species evolution behaviors study in retired wind turbine blade and coal thermal conversion process,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 168, p. 105771, 2022.
- [92] A. K. Schindler, S. R. Duke ve W. B. Galloway, «Co-processing of end-of-life wind turbine blades in portland cement production,» *Waste Management*, cilt 182, pp. 207-214, 2024.
- [93] V. Liberatore, B. Ghadimi, M. Rosano, R. Ceravolo ve S. Russo, «Microstructural analysis of GFRP failure mechanisms after compressive load and temperature duress,» *Composite Structures*, cilt 203, pp. 875-885, 2018.
- [94] Z. Guo, Q. Zhu, W. Wu ve Y. Chen, «Research on bond–slip performance between pultruded glass fiber-reinforced polymer tube and nano-CaCO₃ concrete,» *Nanotechnology Reviews*, cilt 9, no. 1, pp. 637-649, 2020.
- [95] M. Rajaei, N. Kim, S. Bickerton ve D. Bhattacharyya, «A comparative study on effects of natural and synthesised nano-clays on the fire and mechanical properties of epoxy composites,» *Composites Part B: Engineering*, cilt 165, pp. 65-74, 2019.
- [96] L. TranVan, V. Legrand ve F. Jacquemin, «Thermal decomposition kinetics of balsa wood: Kinetics and degradation mechanisms comparison between dry and moisturized materials,» *Polymer Degradation and Stability*, cilt 110, pp. 208-215, 2014.
- [97] S. Abdolmohammadi, S. Siyamak, N. A. Ibrahim, W. M. Z. W. Yunus, M. Z. A. Rahman, S. Azizi ve A. Fatehi, «Enhancement of Mechanical and Thermal Properties of Polycaprolactone/Chitosan Blend by Calcium Carbonate Nanoparticles,» *International Journal of Molecular Sciences*, cilt 13, no. 4, pp. 4508-4522, 2012.
- [98] S. Yousef, J. Eimontas, N. Striūgas, M. Praspaliauskas ve M. A. Abdelnaby, «Pyrolysis Kinetic Behaviour of Glass Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composites Using Linear and Nonlinear Isoconversional Methods,» *Polymers*, cilt 13, no. 1543, 2021.
- [99] R. K. Singh, D. Pandey, T. Patil ve A. N. Sawarkar, «Pyrolysis of banana leaves biomass: Physico-chemical characterization, thermal decomposition behavior, kinetic and thermodynamic analyses,» *Bioresource Technology*, cilt 310, no. 123464, 2020.
- [100] D. Zhou, X. Chen, J. Liang, X. Wei, C. Wu, Y. He ve L. Wang, «Combustion kinetics and fuel performance of tackifying resins by TG-FTIR and DFT analysis,» *Fuel*, cilt 330, no. 125656, 2022.
- [101] S. Yousef, J. Eimontas, K. Zakarauskas ve N. Striūgas, «Recovery of styrene-rich oil and glass fibres from fibres-reinforced unsaturated polyester resin end-of-life wind turbine blades using pyrolysis technology,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 173, p. 106100, 2023.

- [102] L. Tian, K. Lin, Y. Zhao, C. Zhao, Q. Huang ve T. Zhou, «Combustion performance of fine screenings from municipal solid waste: Thermo-kinetic investigation and deep learning modeling via TG-FTIR,» *Energy*, cilt 243, p. 122783, 2022.
- [103] Z. Ma, L. Cheng, Q. Wang, L. Li, G. Luo ve W. Zhang, «Co-combustion characteristics and CO₂ emissions of low-calorific multi-fuels by TG-FTIR analysis,» *Energy*, cilt 252, p. 123919, 2022.
- [104] H. C. Ong, W.-H. Chen, Y. Singh, Y. Y. Gan, C.-Y. Chen ve P. L. Show , «A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach,» *Energy Conversion and Management*, cilt 209, p. 112634, 2020.
- [105] V. Lavaux ve J. Lalevée , «Epoxy curing in mild and eco-friendly conditions: Towards bisphenol A-free systems,» *Progress in Polymer Science*, cilt 157, p. 101873, 2024.
- [106] W. Chen, M. Ye, M. Li, B. Xi, J. Hou, X. Qi, J. Zhang, Y. Wei ve F. Meng, «Characteristics, kinetics and product distribution on pyrolysis process for waste wind turbine blades,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 169, p. 105859, 2023.
- [107] L. Ge, C. Xu, H. Feng, H. Jiang, X. Li, Y. Lu , Z. Sun, Y. Wang ve C. Xu, «Study on isothermal pyrolysis and product characteristics of basic components of waste wind turbine blades,» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 171, p. 105964, 2023.
- [108] Y. Yao, Y. Cao, M. Rao, R. Shan ve J. Zhang, «Fast co-pyrolysis characteristics of polyethylene terephthalate and epoxy resin from waste wind turbine blades,» *Journal of the Energy Institute*, cilt 117, p. 101841, 2024.
- [109] L. Ge, X. Li, H. Feng, C. Xu, Y. Lu, B. Chen, D. Li ve C. Xu, «Analysis of the pyrolysis process, kinetics and products of the base components of waste wind turbine blades (epoxy resin and carbon fiber),» *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, cilt 170, p. 105919, 2023.
- [110] S. Yousef, J. Eimontas, I. Stasiulaitiene, K. Zakarauskas ve N. Striūgas, «Recovery of energy and carbon fibre from wind turbine blades waste (carbon fibre/unsaturated polyester resin) using pyrolysis process and its life-cycle assessment,» *Environmental Research*, cilt 245, p. 118016, 2024.
- [111] A. M. Cunliffe, . N. Jones ve P. T. Williams, «Pyrolysis of composite plastic waste,» *Environmental Technology*, cilt 24, no. 5, pp. 653-663, 2008.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2015 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünden 2020 yılında mezun oldu. 2022 yılında Yalova Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2020-2022 yılları arasında AVENS Havalandırma Sistemleri A.Ş. ’de Satış Mühendisi olarak çalışmıştır. Mayıs 2024’te Systemair Türkiye şirketinde Satış Destek Mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Şenlik, A., & Başakçılardan Kabakcı, S. (2024). Ömrünü Tamamlamış Rüzgar Türbini Kanatlarının Yönetimi: Piroliz. 12. Ulusal Katı Atık Yönetimi (UKAY’2024) Kongresi 11-13 Aralık 2024 (Sözlü sunum ve özet yayını için kabul edildi)

DİĞER YAYIN VE ESERLER

YILMAZOĞLU, M., TİMOÇİN, A., ŞENLİK, A., AL, K. & ÜNVER, Ü. (2021). Enerji Verimli Binalar İçin Yakıt Pili Kojenerasyon Sistemlerinin İncelenmesi. ElCezeri, 8(2), 766-781, doi:10.31202/ecjse.875033