

Laboratuvar Güvenliği: Plastik Yakıt Araştırmalarında Organik Kimya Uygulamaları

Mustafa Ceylan¹

Özet

Bu çalışma, plastik atıkların yakıt ve değerli kimyasallara dönüştürülmesi süreçlerinde laboratuvar ortamında karşılaşılan güvenlik risklerini ve organik kimya perspektifinden alınması gereken önlemleri kapsamlı biçimde incelemektedir. Plastik atıkların piroliz, katalitik parçalanma ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleriyle yakıtı dönüştürülmesi süreçleri, yüksek sıcaklık, basınç ve reaktif kimyasalların kullanımı nedeniyle çeşitli güvenlik riskleri içermektedir. Araştırmada, laboratuvar ortamında plastik yakıt dönüşüm süreçlerinde ortaya çıkan toksik gazlar, yanma ve patlama riski taşıyan kimyasallar, termal ve mekanik tehlikeler detaylı olarak ele alınmıştır. Organik kimya perspektifinden, plastik polimerlerin yapısal özellikleri, termal parçalanma mekanizmaları ve bu süreçlerde oluşan ara ürünlerin tehlike potansiyelleri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, risk değerlendirme metodolojileri, mühendislik kontrolleri, kişisel koruyucu ekipmanlar ve acil durum prosedürleri gibi güvenlik yönetimi stratejileri tartışılmıştır. Laboratuvar güvenliğinin yasal çerçevesi, ulusal ve uluslararası standartlar ışığında değerlendirilmiş, Türkiye'deki mevcut uygulamalar ve eksiklikler ortaya konmuştur. Sonuç olarak, plastik yakıt araştırmalarının sürdürülebilir ve güvenli biçimde yürütülebilmesi için bütünsel bir güvenlik yaklaşımının benimsenmesi, düzenli risk değerlendirmelerinin yapılması ve laboratuvar personelinin kapsamlı eğitimi önerilmektedir. Bu çalışma, plastik atıkların yönetiminde yenilikçi çözümler geliştiren araştırmacılar için güvenlik odaklı bir rehber niteliği taşımaktadır.

1 Prof.Dr.,Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, mustafac.ceylan@gop.edu.tr, 0000-0002-9184-4385

1. Giriş

1.1. Plastik Atık Sorunu ve Yakıt Dönüştürme Çalışmalarının Önemi

Dünya genelinde plastik atık miktarı hızla artmakta ve bu durum ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Plastik atıklar, kimyasal yapıları nedeniyle doğada kolayca çözünmez ve hem makro hem mikro boyutlarda tüm ekosistemi kirletir. Petrokimyasallardan üretilen plastikler, yaygın kullanımları ve düşük geri dönüşüm oranlarıyla en önemli kirleticilerden biridir. [1]. Plastik atıkların doğada parçalanması yüzlerce yıl sürebilmekte, bu süreçte mikrop plastikler oluşmakta ve gıda zincirine dâhil olmaktadır [2]. Bu nedenle, plastik atıkların etkin yönetimi ve değerli ürünlere dönüştürülmesi kritik önem taşımaktadır.

Plastik atıkların yakıtı dönüştürülmesi, atık yönetimi ve enerji üretimi açısından sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Piroliz, katalitik parçalanma ve gazlaştırma gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleri, plastik atıkların içerdii karbon ve hidrojen bakımından zengin yapıyı, sıvı yakıtlara, gaz ürünlere ve değerli kimyasallara dönüştürebilmektedir [3]. Bu yöntemler, mekanik geri dönüşümün uygun olmadığı karışık ve kontamine plastik atıklar için alternatif çözüm sunmaktadır.

1.2. Laboratuvar Güvenliğinin Plastik Yakıt Araştırmalarındaki Kritik Rolü

Plastik yakıt dönüşüm süreçleri, laboratuvar ortamında yüksek sıcaklık, basınç ve reaktif kimyasalların kullanımını gerektirmektedir. Bu koşullar, araştırmacılar için çeşitli sağlık ve güvenlik riskleri oluşturmaktadır. Kimya laboratuvarlarında meydana gelen kazaların büyük çoğunluğu tehlikeli kimyasalların kullanımı ve termokimyasal işlemlerden kaynaklanmaktadır [4]. Bu nedenle, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği, bilimsel ilerlemenin sürdürülebilirliği ve araştırmacıların sağlığı açısından hayati önem taşımaktadır.

Organik kimya, plastik polimerlerin yapısını, kimyasal davranışlarını ve termal parçalanma mekanizmalarını anlamamıza olanak sağlayarak, laboratuvar güvenliği için temel bir perspektif sunmaktadır. Polimerlerin ısı parçalanması sırasında oluşan ara ürünlerin tanımlanması, potansiyel tehlikelerin öngörülmesi ve uygun güvenlik önlemlerinin alınması için organik kimya bilgisi önemlidir [5].

Bu çalışma, plastik yakıt araştırmalarında organik kimya perspektifinden laboratuvar güvenliğini kapsamlı biçimde ele almaktadır. Çalışmada,

plastik türlerinin termal parçalanma mekanizmaları, laboratuvar ortamında karşılaşılan kimyasal, fiziksel ve biyolojik tehlikeler, risk değerlendirme metodolojileri ve güvenlik yönetimi stratejileri incelenmektedir. Ayrıca, Türkiye'deki ve dünyadaki laboratuvar güvenliği standartları, yasal düzenlemeler ve örnek vaka analizleri sunulmaktadır.

2. Plastik Yakıt Dönüşüm Süreçlerinin Temel Prensipleri

2.1. Plastiklerin Kimyasal Yapısı ve Termal Davranışları

Plastikler, esas olarak karbon ve hidrojen atomlarından oluşan, yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir ve endüstride en yaygın olarak kullanılan türler arasında polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET) ve polivinil klorür (PVC) yer almaktadır. Her bir plastik türü, kendine özgü kimyasal yapısı ve termal özellikleriyle farklılık gösterir; bu farklılıklar, güvenlik açısından da çeşitli risk profillerinin ortaya çıkmasına neden olur. Örneğin, polietilen doğrusal bir hidrokarbon zincirine sahipken, polipropilen zincirinde her ikinci karbon atomuna bağlı metil grupları bulunur. Polistirenin yapısında ana zincire bağlı benzen halkaları yer alırken, PET polimeri aromatik halka ve ester bağları içerir; PVC ise yapısında klor atomları barındırır. Bu yapısal çeşitlilik, plastiklerin termal bozunma sıcaklıklarını, bozunma mekanizmalarını ve oluşan ürünleri doğrudan etkiler.

Plastiklerin termal bozunması genel olarak üç temel mekanizma ile gerçekleşir: rastgele zincir kopması, zincir ucu kopması ve yan grup eliminasyonu. Rastgele zincir kopması, özellikle PE ve PP gibi polimerlerde zincirin rastgele noktalarından kırılmasıyla daha küçük moleküllerin oluşmasına yol açar. Zincir ucu kopması ise polimerin uç kısımlarından başlayarak monomer birimlerinin ayrılması şeklinde gerçekleşir ve bu mekanizma polistirenin termal bozunmasında baskındır. Yan grup eliminasyonu ise PVC gibi yan gruplar içeren polimerlerde, bu grupların ayrılmasıyla meydana gelir. Tüm bu mekanizmalar, plastiklerin termal davranışlarını ve çevresel etkilerini belirleyen temel faktörlerdir [6,7,8].

2.2. Piroliz Süreci ve Güvenlik Faktörleri

Piroliz, organik maddelerin oksijensiz bir ortamda ısı olarak parçalanması süreci olup, plastik atıkların pirolizi genellikle 400-600°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda pirolitik yağ olarak adlandırılan sıvı yakıt, gaz ürünler ve katı kalıntı elde edilir. Piroliz süreci, laboratuvar koşullarında yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmesi ile birlikte yanıcı ve patlayıcı ürünlerin oluşumu nedeniyle önemli güvenlik riskleri taşır.

Plastik pirolizinde güvenliği etkileyen başlıca faktörler arasında sıcaklık kontrolü, oksijen kontrolü, basınç yönetimi ve toksik emisyonların kontrolü bulunmaktadır. Sıcaklık kontrolünün sağlanamaması ani sıcaklık artışlarına ve kontrolsüz reaksiyonlara, dolayısıyla tehlikeli basınç yükselmelerine yol açabilir. Sisteme oksijen sızması, yanma reaksiyonlarının başlamasına ve patlama riskinin artmasına neden olurken, özellikle kapalı sistemlerde gaz ürünlerin birikmesi tehlikeli düzeyde basınç artışlarına sebep olabilir. Ayrıca, piroliz sırasında çeşitli toksik gazlar ve buharlar açığa çıkabileceğinden, bu emisyonların etkin bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Tüm bu faktörler, plastik pirolizi uygulamalarında güvenliğin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir [9,10].

2.3. Katalitik Dönüşüm Yöntemleri ve Kimyasal Etkileşimler

Katalitik dönüşüm, plastik pirolizinde reaksiyon sıcaklığını düşürmek, ürün seçiciliğini artırmak ve daha değerli kimyasal ürünler elde etmek amacıyla çeşitli katalizörlerin kullanıldığı süreçleri ifade eder. Bu amaçla en yaygın olarak zeolitler (örneğin ZSM-5 ve Y-zeoliti), metal oksitler (Al_2O_3 , Fe_2O_3), akışkan katalitik parçalama (FCC) katalizörleri ve destekli metal katalizörler tercih edilmektedir.

Katalitik süreçler, reaktif ara ürünlerin oluşumu, katalizörün rejenerasyonu sırasında karbon birikimi ve metal tuzlarının korozyif etkileri gibi ek güvenlik risklerini de beraberinde getirir. Özellikle asidik karaktere sahip katalizörler, korozyif özellikleri nedeniyle cilt ve solunum yolu tahrişine yol açabilir. Metal içeren katalizörler ise bazı koşullarda pirofosforik özellik gösterebilir ve hava ile temas ettiklerinde kendiliğinden tutuşma riski oluşturabilir. Bu nedenle, katalitik plastik dönüşüm süreçlerinde hem kimyasal hem de fiziksel güvenlik önlemlerinin titizlikle uygulanması gerekmektedir [11,12].

2.4. Gazlaştırma ve Hidrojenasyon Süreçleri

Gazlaştırma, plastik atıkların yüksek sıcaklıkta (800-1000°C) kısmi oksidasyonu ile sentez gazı (CO ve H_2) elde edilmesini sağlayan bir termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Hidrojenasyon ise, plastiklerin hidrojen atmosferinde parçalanarak daha değerli hidrokarbon ürünlerine dönüştürülmesini içermektedir.

Bu iki süreç, pirolize kıyasla daha yüksek sıcaklık ve basınç gereksinimleri, hidrojen gibi son derece yanıcı gazların kullanımı ve karbon monoksit gibi toksik gazların oluşumu nedeniyle önemli ölçüde artan güvenlik riskleri taşıır [13]. Özellikle hidrojen kullanılan işlemlerde, gaz sızıntılarının önlenmesi ve patlama riskine karşı uygun güvenlik ekipmanlarının kullanılması kritik öneme

sahiptir. Ayrıca, karbon monoksit gibi toksik gazların kontrolü ve ortamdan uzaklaştırılması da süreç güvenliği açısından dikkatle yönetilmelidir.

3. Laboratuvar Ortamında Karşılaşılan Kimyasal Tehlikeler

3.1. Plastik Türlerine Göre Piroliz Ürünleri ve Toksikolojik Etkileri

Farklı plastik türlerinin pirolizi sonucunda ortaya çıkan kimyasal bileşikler ve bunların toksikolojik özellikleri, süreç güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Polietilenin (PE) pirolizi sırasında çoğunlukla C₅-C₂₀ aralığında alifatik hidrokarbonlar, n-parafinler, α -olefinler ve dallı alkanlar oluşur; bu buharlar solunum yolu irritasyonu ve merkezi sinir sistemi depresyonu gibi etkilere yol açabilir, yüksek konsantrasyonlarda ise hipoksi ve asfiksi riski taşır.

Polipropilenin (PP) pirolizinde ise dallı olefinler, 2,4-dimetil-1-hepten gibi metil-süstitüe alkenler ve düşük oranda aromatik bileşikler oluşur; bu ürünler PE piroliz ürünlerine benzer toksikolojik etkilere sahip olmakla birlikte, daha yüksek reaktiviteye sahip olefinlerin oranı daha fazladır.

Polistirenin (PS) pirolizinde ise baskın olarak stiren monomeri, toluen, etilbenzen ve α -metilstiren gibi aromatik bileşikler meydana gelir; özellikle stiren, Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı tarafından Grup 2A olarak sınıflandırılmış olup, uzun süreli maruziyette karaciğer, böbrek ve merkezi sinir sistemi hasarına neden olabilmektedir.

Polietilen tereftalatın (PET) pirolizinde benzoik asit, tereftalik asit, benzen, toluen ve vinil benzoat gibi aromatik ve oksijenli bileşikler oluşur; bu maddeler solunum yolu ve göz irritasyonu, merkezi sinir sistemi etkileri ve uzun süreli maruziyette karaciğer ile böbrek hasarı riski taşır.

Polivinil klorürün (PVC) pirolizi ise en riskli süreçlerden biridir; düşük sıcaklıklarda hidrojen klorür (HCl) gazı açığa çıkarken, daha yüksek sıcaklıklarda klorlu aromatik bileşikler oluşur. HCl gazı şiddetli solunum yolu ve göz irritasyonuna yol açarken, klorlu aromatikler biyobirikime ve kalıcı toksik etkilere neden olabilmektedir. Tüm bu ürünlerin oluşumu ve potansiyel sağlık etkileri, plastik pirolizi sırasında alınacak güvenlik önlemlerinin belirlenmesinde temel rol oynamaktadır [15-17].

3.2. Toksik Gazlar ve Buharlar

Plastik pirolizi sırasında açığa çıkan başlıca toksik gazlar ve bunların sağlık üzerindeki etkileri, süreç güvenliği açısından büyük önem taşır. Karbon monoksit (CO), tüm plastik piroliz işlemlerinde farklı oranlarda

oluşabilen, hemoglobine oksijenden çok daha yüksek afiniteyle bağlanarak karboksihemoglobin oluşturur ve oksijen taşınmasını engeller; 50 ppm üzerindeki konsantrasyonlarda baş ağrısı, baş dönmesi ve bilinç kaybı gibi ciddi semptomlara yol açabilir.

Hidrojen klorür (HCl), özellikle PVC pirolizinde yüksek miktarda ortaya çıkar ve şiddetli solunum yolu irritanıdır; 35 ppm üzerindeki seviyelerde akciğer ödemi riski oluşturur ve aynı zamanda laboratuvar ekipmanlarında korozyona neden olabilir.

Hidrojen siyanür (HCN), azot içeren plastiklerin (örneğin poliamid, poliüretan, akrilonitril butadien stiren) pirolizinde oluşabilir ve 50 ppm üzerindeki konsantrasyonlarda hızla ölümcül etki gösterebilir.

Formaldehit ve asetaldehit gibi düşük molekül ağırlıklı aldehitler, çeşitli plastiklerin oksidatif parçalanması sırasında oluşur; formaldehit, Grup 1 kanserojen olarak sınıflandırılmış olup, düşük konsantrasyonlarda dahi göz ve solunum yolu irritasyonuna neden olur.

Benzen ve türevleri ise aromatik içerikli plastiklerin pirolizinde ortaya çıkar; benzen, Grup 1 kanserojen olarak kabul edilir ve uzun süreli maruziyet lösemi riskini artırır. Bu gazların oluşumu ve potansiyel sağlık etkileri, plastik pirolizi sırasında etkin havalandırma, gaz izleme ve kişisel koruyucu ekipman kullanımının gerekliliğini ortaya koymaktadır [18,19].

3.3. Yanıcı ve Patlayıcı Maddeler

Plastik pirolizi sırasında oluşan yanıcı ve patlayıcı ürünler, laboratuvar güvenliği açısından ciddi riskler oluşturur. Metan, etan, propan ve bütan gibi hafif alifatik hidrokarbonlar, düşük parlama noktalarına ve geniş patlama limitlerine sahip olmaları nedeniyle yüksek tehlike potansiyeli taşır; örneğin, metanın havadaki patlama limitleri % 5-15 arasında değişmektedir.

Hidrojen ise PE, PP ve PS pirolizinde oluşabilen, son derece yanıcı bir gazdır ve havada % 4-75 aralığında çok geniş bir patlama limitine sahiptir; düşük tutuşma enerjisi nedeniyle statik elektrik de dahil olmak üzere en küçük bir kıvılcım bile tutuşmasına yol açabilir.

Benzen, toluen ve ksilen gibi aromatik hidrokarbonlar da yanıcı olup, buharları hava ile patlayıcı karışımlar oluşturabilir; benzenin parlama noktası -11°C, toluenin ise 4°C'dir.

Stiren ise PS pirolizinde yüksek oranda oluşan bir bileşiktir ve parlama noktası 31°C'dir; ısı, kıvılcım ve açık alevden uzak tutulması gerekir. Ayrıca, stiren peroksit oluşturma eğilimi gösterdiğinden, bu durum ek bir patlama riski yaratır. Tüm bu özellikler, plastik pirolizi sırasında oluşan ürünlerin

dikkatli bir şekilde yönetilmesini ve uygun güvenlik önlemlerinin alınmasını zorunlu kılar [19-21].

3.4. Korozi ve Tahriş Edici Kimyasallar

Plastik piroliz süreçlerinde ortaya çıkan korozi ve tahriş edici kimyasallar, hem ekipman güvenliği hem de insan sağlığı açısından önemli riskler oluşturur. PVC pirolizinde oluşan hidrojen klorür (HCl), metal ekipmanlarda ciddi korozyona yol açarken, aynı zamanda cilt, göz ve solunum yollarında şiddetli tahrişe neden olabilir.

Organik asitler, özellikle asetik asit ve formik asit gibi karboksilik asitler, oksijenli plastiklerin pirolizinde oluşabilir ve düşük konsantrasyonlarda dahi mukoza zarlarında irritasyona sebep olabilir.

Fenol ve türevleri ise özellikle polistiren ve epoksi reçinelerin pirolizinde ortaya çıkar; fenol, güçlü cilt korozyonuna yol açabilen ve deriden hızla emilebilen bir bileşiktir. Bu kimyasalların varlığı, piroliz süreçlerinde uygun malzeme seçimi, kişisel koruyucu ekipman kullanımı ve etkin havalandırma sistemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır [22,23].

4. Fiziksel Tehlikeler

4.1. Yüksek Sıcaklık ve Basınç Riskleri

Plastik piroliz deneyleri genellikle 400-600°C sıcaklık aralığında gerçekleştirildiğinden, termal yanık riski oldukça yüksektir. Kapalı reaktör sistemlerinde piroliz sırasında gaz ürünlerin birikmesiyle basınç artışı meydana gelebilir; basınç tahliye sistemlerinin yetersiz veya hiç bulunmaması durumunda ise reaktör patlaması riski ortaya çıkar. Özellikle yüksek basınçlı hidrojenasyon reaktörlerinde bu risk daha da belirgindir.

Türkiye’de üniversite laboratuvarlarında meydana gelen kazaların birçoğu yüksek sıcaklık kaynaklı yanıklardan, ikinci olarak da basınç kaynaklı patlamalardan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Bu veriler, plastik piroliz ve benzeri termokimyasal süreçlerde sıcaklık ve basınç kontrolünün, güvenliğin sağlanmasında kritik rol oynadığını göstermektedir [24,25].

4.2. Elektrik Güvenliği

Laboratuvar ortamlarında kullanılan piroliz cihazları, yüksek güç tüketimi, ısıtma elemanları ve karmaşık kontrol sistemleri nedeniyle elektrik kaynaklı çeşitli riskler barındırır. Özellikle yanıcı ve patlayıcı gazların bulunduğu ortamlarda bu riskler daha da kritik hale gelir.

Kısa devreler ve aşırı yüklenme, topraklama eksiklikleri, statik elektrik birikimi ve deşarjı ile nem veya koroziif gazların elektrik sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri, başlıca elektriksels tehlikeler arasında yer alır. Yanıcı gazların bulunduğu laboratuvarlarda, patlama riskini en aza indirmek için ATEX (Atmosphères Explosibles) sertifikalı ekipmanların kullanılması büyük önem taşır. Bu tür ortamlarda, elektrikli cihazların düzenli bakımı, uygun topraklama ve statik elektrikten korunma önlemleri alınması, güvenliğin sağlanması temel gerekliliklerdendir [26].

4.3. Mekanik Tehlikeler

Piroliz ekipmanlarının tasarımı ve kullanımı sırasında çeşitli mekanik tehlikeler ortaya çıkabilir. Döner parçalar, keskin yüzeyler ve kenarlar, yüksek basınçlı hortum veya bağlantıların kopması ile ağır ekipmanların taşınması sırasında oluşabilecek ergonomik riskler, başlıca mekanik tehlikeler arasında yer alır.

Bu tür risklerin etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, ekipmanların düzenli bakımı, koruyucu muhafazaların kullanılması ve güvenli çalışma prosedürlerinin oluşturulup uygulanması gereklidir. Ayrıca, personelin uygun kişisel koruyucu donanım kullanması ve ekipmanların doğru şekilde taşınması da mekanik yaralanmaların önlenmesinde önemli rol oynar [27].

5. Biyolojik Tehlikeler ve Atık Yönetimi

5.1. Mikrobiyal Kontaminasyon Riskleri

Laboratuvara getirilen plastik atıklar, sıklıkla gıda artıkları, toprak veya diğer organik maddelerle kontamine olmuş olabilir ve bu durum özellikle ön işlem aşamasında mikrobiyal kontaminasyon riskini artırır. Kontamine plastiklerden kaynaklanabilecek biyolojik tehlikeler arasında bakteriyel ve fungal patojenler, endotoksinler ve mikotoksinler ile alerjik reaksiyonlara yol açabilecek biyolojik ajanlar bulunur.

Bu tür mikrobiyal risklerin en aza indirilmesi için, plastik numunelerin laboratuvara alınmadan önce uygun şekilde temizlenmesi, gerekirse sterilizasyon yöntemlerinin uygulanması ve kişisel hijyen kurallarına titizlikle uyulması gerekmektedir. Ayrıca, çalışma alanlarının düzenli olarak dezenfekte edilmesi ve koruyucu ekipman kullanımı da biyolojik tehlikelerin kontrolünde önemli rol oynar [28,29].

5.2. Atık Sınıflandırma ve Bertaraf

Plastik yakıt araştırmalarında oluşan atıklar, kimyasal kompozisyonları ve toksikolojik özellikleri nedeniyle tehlikeli atık sınıflandırmasına tabi olabilir ve spesifik bertaraf metodolojileri gerektirir. Atık yönetimi stratejisinde dikkate alınması gereken temel atık kategorileri şu şekilde sınıflandırılabilir:

Katı Atıklar:

Piroliz prosesi sonucunda oluşan karbonize kalıntılar, yapılarında adsorbe edilmiş toksik bileşikler ve ağır metaller içerebilir

Deactive olmuş katalizörler, özellikle metal içerikli olanlar, çevresel kontaminasyon potansiyeli taşır.

Organik ve inorganik kirleticilerle kontamine olmuş filtrasyon materyalleri olabilir.

Termal ve kimyasal strese maruz kalmış laboratuvar ekipmanları.

Sıvı Atıklar:

Karakterizasyon veya saflaştırma işlemlerine tabi tutulmamış pirolitik sıvı ürünler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve heterosiklik bileşikler içerebilir

Kondensasyon sistemlerinde biriken, yüksek konsantrasyonda organik bileşikler içeren sıvıları.

Ekipman dekontaminasyonunda kullanılan solventler ve temizleme çözeltileri.

Kromatografik ve spektroskopik analizlerden kaynaklanan organik çözücüler ve reaktifleri.

Gaz Fazı Atıklar:

Emisyon kontrol sistemlerinin tutma verimliliğini aşan uçucu organik bileşikler ve inorganik gazlar.

Analitik enstrümantasyondan salınan kalibrasyon ve taşıyıcı gazlar.

Bu atıkların yönetiminde, atığın fizikokimyasal karakterizasyonu temelinde uygun bertaraf metodolojileri seçilmelidir. Piroliz kalıntıları, özellikle halojenli plastiklerden elde edilenler, yüksek klor içeriği nedeniyle dioksin ve furan oluşturma potansiyeli taşıdığından, tehlikeli atık olarak değerlendirilmelidir.

Bilimsel literatürde önerilen atık bertaraf metodolojileri arasında şunlar bulunmaktadır:

Termal oksidasyon: Kontrollü koşullarda ($>850^{\circ}\text{C}$) organik bileşiklerin tam mineralizasyonu.

İleri fizikokimyasal arıtma teknikleri: Nötralizasyon, kimyasal presipitasyon, koagölasyon-flokölasyon ve membran filtrasyonu.

Stabilizasyon/solidifikasyon: Toksik bileşenlerin mobilizasyonunu azaltan kimyasal ve fiziksel immobilizasyon teknikleri.

Katalitik hidrojenasyon veya hidrodehalogenasyon: Halojenli bileşiklerin daha az toksik formlara dönüştürölmesi.

Bu atık yönetim stratejilerinin uygulanması, hem ekotoksikolojik risklerin minimizasyonu hem de araştırma faaliyetlerinin sürdürölabilirliği açısından kritik öneme sahiptir [30-32].

5.3. Çevresel Etki ve Sürdürölabilir Laboratuvar Uygulamaları

Plastik yakıt araştırmalarının çevresel etkilerini minimize etmek için, sürdürölabilir laboratuvar uygulamalarının benimsenmesi önemlidir. Bu yaklaşımlar şunları içerebilir:

Yeşil Kimya İlkelerinin Uygulanması:

Daha güvenli çözücülerin ve reaktiflerin seçilmesi

Reaksiyon veriminin artırılması ve atık miktarının azaltılması

Enerji verimli süreçlerin tasarlanması

İşlem sayısının minimize edilmesi

Atık Azaltma Stratejileri:

Mikro-ölçekli deneyler tasarlama

Reaktif ve çözücülerin geri kazanımı ve yeniden kullanımı

Kapalı döngü sistemlerin kullanımı

Atık ayrıştırma ve uygun etiketleme

Emisyon Kontrol Teknolojileri:

Etkili havalandırma sistemleri

Scrubber ve filtrasyon sistemleri

Emisyon izleme ve raporlama

Sürdürölabilir laboratuvar uygulamaları, hem çevresel etkileri azaltmakta hem de laboratuvar güvenliğini artırmaktadır. Örneğin, daha düşük

toksositeye sahip çözücülerin kullanımı, çalışanların maruz kalacağı tehlikeleri de azaltmaktadır [33].

6. Güvenlik Yönetimi ve Risk Değerlendirme

6.1. Sistematik Risk Değerlendirme Metodolojileri

Plastik yakıt araştırmalarında güvenlik yönetiminin temelini, sistematik risk değerlendirmesi oluştırmaktadır. Risk değerlendirmesi, potansiyel tehlikelerin tanımlanması, risklerin analizi ve kontrol önlemlerinin belirlenmesini içeren yapılandırılmış bir süreçtir [34, 35].

Tehlike Tanımlama Yöntemleri:

Kontrol Listeleri: Önceden hazırlanmış kapsamlı listeler kullanılarak potansiyel tehlikelerin belirlenmesi.

What-If Analizi: “Eğer bu olursa ne olur?” sorusuna dayalı sistematik bir beyin fırtınası yaklaşımı.

Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (HAZOP): İşlem parametrelerindeki sapmaların potansiyel sonuçlarının değerlendirilmesi.

Hata Modu ve Etki Analizi (FMEA): Ekipman ve süreç bileşenlerinin olası hata modlarının belirlenmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi.

Risk Analizi ve Değerlendirme: Risk seviyesi genellikle şu formülle belirlenir: Risk = Olasılık $\times$ Şiddet

Olasılık, tehlikenin gerçekleşme ihtimalini, şiddet ise gerçekleştiğinde yaratacağı zararın büyüklüğünü ifade eder. Risk matrisleri kullanılarak, riskler düşük, orta, yüksek ve kritik olarak sınıflandırılabilir.

Kontrol Önlemlerinin Hiyerarşisi:

Eliminasyon: Tehlikenin tamamen ortadan kaldırılması

İkame: Daha az tehlikeli bir süreç veya malzeme kullanımı.

Mühendislik Kontrolleri: Fiziksel bariyerler, havalandırma sistemleri, otomatik kontrol sistemleri.

İdari Kontroller: Güvenli çalışma prosedürleri, eğitim, rotasyon.

Kişisel Koruyucu Ekipmanlar: Son savunma hattı olarak uygun KKE kullanımı.

6.2. Laboratuvar Güvenlik Kùltürü Oluştırma

Güvenlik kùltürü, bir organizasyondaki güvenlikle ilgili ortak değerler, inançlar ve davranışlar bütünüdür. Güçlü bir laboratuvar güvenlik kùltürü, kazaların önlenmesinde kritik öneme sahiptir. Akademik araştırma ortamlarında güvenlik kùltürünün geliştirilmesi, hem çalışanların sağlığını korumakta hem de araştırma verimliliğini artırmaktadır.

Güvenlik Kùltürü Geliştirme Stratejileri:

Laboratuvar ortamları, çalışanların çeşitli kimyasal, biyolojik ve fiziksel risklerle karşı karşıya olduğu, iş sağlığı ve güvenliği açısından hassas alanlardır. Bu nedenle, güvenli bir çalışma ortamı sağlamak için yalnızca teknik önlemler almak yeterli değildir; aynı zamanda çalışanlarda güçlü bir iş sağlığı ve güvenliği kùltürü oluştırmak da gereklidir. Güvenlik kùltürü, çalışanların iş kazalarını önleme, riskleri tanıma ve güvenli davranışları benimseme konusundaki tutum ve alışkanlıklarını kapsar [37].

İş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesinde en önemli faktörlerden biri insan unsurudur. Çalışanların bilgi eksikliği, ilgisizlik veya güvenlik önlemlerine uyumsuzluğu, kazaların yaşanmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin yalnızca bilgi vermekle kalmayıp, çalışanların davranışlarına da yansımaları sağlanmalıdır. Güvenli çalışma kùltürünün yerleşmesi, hem çalışanların sağlığını korur hem de iş verimliliğini artırır.

Laboratuvarlarda güvenlik kùltürünün oluşturulması için, risklerin kaynağında ortadan kaldırılması, toplu ve kişisel koruyucu önlemlerin alınması, güvenlik ekipmanlarının etkin kullanımı ve düzenli eğitimlerin verilmesi gereklidir. Ayrıca, laboratuvar kurallarının ve güvenlik talimatlarının görünür şekilde asılması, çalışanların bu kurallara uyması için teşvik edici bir ortam yaratır. Yönetimin güvenliğe verdiği önem, çalışanların güvenlik konusundaki tutumlarını da olumlu yönde etkiler.

Laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliği kùltürünün oluşturulması, sadece yasal bir zorunluluk değil, aynı zamanda çalışanların sağlığını ve işletmenin sürdürülebilirliğini koruyan temel bir unsurdur. Güçlü bir güvenlik kùltürü, çalışanların güvenli davranışları benimsemesini sağlar ve iş kazalarının önlenmesine önemli katkı sunar.

6.3. Laboratuvar Tasarımı ve Mühendislik Kontrolleri

Plastik pirolizi gibi kimyasal dönüşüm süreçlerini içeren araştırmalarda, güvenlik altyapısının temelini laboratuvarın fiziksel tasarımı ve mühendislik kontrolleri oluştırur. Bu unsurlar, tehlikeleri kaynağında ortadan kaldırmak

veya izole etmek suretiyle proaktif bir koruma sağlar ve güvenli bir çalışma kültürünün fiziksel temelini atar. Amerikan Kimya Mühendisleri Enstitüsü'nün (AIChE) Kimyasal Proses Güvenliği Merkezi (CCPS) tarafından geliştirilen kılavuzlar, bu tür prosesler için risk tabanlı bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır [36].

Laboratuvar Tasarım İlkeleri

Güvenli bir laboratuvarın temelini oluşturan tasarım prensipleri, risklerin mekansal olarak yönetilmesini hedefler:

Çalışma Alanlarının Ayrılması: Yüksek tehlike potansiyeli taşıyan piroliz reaktörleri gibi ünitelerin bulunduğu alanlar, ofis ve analiz alanları gibi düşük riskli bölgelerden fiziksel olarak ayrılmalıdır. ABD'de bu konuda temel standart olan NFPA 45, laboratuvarların tehlike seviyelerine göre bölümlendirilmesini ve yangına dayanıklı yapılarla ayrılmasını şart koşar.

Acil Çıkışlar ve Tahliye Yolları: Acil durumlarda personelin hızlı ve güvenli bir şekilde tahliyesini sağlamak için çıkış yolları, ABD İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi'nin (OSHA), CFR standardında belirtilen tasarım ve yapı gerekliliklerine uygun olmalıdır. Bu yollar her zaman açık, engelsiz ve net bir şekilde işaretlenmelidir.

Malzeme Uyumluluğu: Laboratuvar yüzeyleri, tezgahlar ve zemin kaplamaları, piroliz işlemi sırasında ortaya çıkabilecek aşındırıcı veya çözücü kimyasallara karşı yüksek direnç göstermelidir. Bu, dökülme durumunda kolay temizlik ve uzun vadeli yapısal bütünlük sağlar.

Kimyasal Depolama: Kimyasalların güvenli depolanması, kazaları önlemede kritik bir adımdır. OSHA'nın Laboratuvar Standardı, her laboratuvarın, kimyasalların uyumluluklarına göre ayrılmasını ve güvenli bir şekilde saklanmasını detaylandıran bir Kimyasal Hijyen Planı'na sahip olmasını zorunlu kılar.

Mühendislik Kontrolleri

Mühendislik kontrolleri, tehlikeli maddelere maruziyeti en aza indirmek için tasarlanmış fiziksel sistemlerdir:

Havalandırma Sistemleri: Etkili havalandırma, hem genel ortam havasını temizler hem de tehlikeli buharları kaynağında yakalar. Çeker ocaklar için Avrupa standardı olan EN 14175, bu sistemlerin performans ve güvenlik kriterlerini belirler

Otomasyon ve Uzaktan Kontrol: Yüksek basınç ve sıcaklık gibi tehlikeli parametreler içeren piroliz süreçlerinin otomasyonu, operatörün tehlikeli

bölgede bulunma zorunluluğunu ortadan kaldırarak riski önemli ölçüde düşürür.

Güvenlik Duşları ve Göz Yıkama İstasyonları: Kimyasal sıçramalarına karşı acil müdahale için kritik olan bu ekipmanların yerleşimi ve performansı önemlidir.

Gaz Algılama Sistemleri: Piroлиз sonucu ortaya çıkabilecek yanıcı ve toksik gazları sürekli izleyen, sesli ve görsel alarmlarla donatılmış sabit gaz dedektörlerinin kurulumu hayati önem taşır.

Basınç Tahliye Sistemleri: Kimyasal reaktörlerde aşırı basınç birikmesini önlemek, katastrofik arızaları engellemenin anahtarıdır.

Bu mühendislik kontrollerinin sürdürülebilir etkinliği, düzenli denetim, test ve bakım programlarına bağlıdır. Türkiye’deki yerel mevzuatlar da, özellikle havalandırma sistemlerinin periyodik olarak yetkili kurumlarca kontrol edilip belgelendirilmesini gerektirmektedir [36-40].

7. Kişisel Koruyucu Donanımlar (KKD) ve Acil Durum Prosedürleri

7.1. Plastik Yakıt Araştırmalarına Özel KKD Gereksinimleri

Kişisel koruyucu donanım (KKD), mühendislik ve idari kontrollerin yetersiz kaldığı durumlarda, çalışanları tehlikelerden korumak için kullanılan son savunma hattıdır. Plastik yakıt araştırmalarında kullanılması gereken KKD’ler şunlardır [41]:

Göz ve Yüz Koruması:

Kimyasal Koruyucu Gözlükler: Sıçramalara karşı koruma sağlayan, yan siperleri bulunan gözlükler.

Yüz Siperleri: Özellikle reaktör açma, numune alma gibi işlemlerde tam yüz koruması için.

Tam Yüz Maskeleri: Hem göz hem solunum koruması gerektiren durumlar için.

Solunum Koruması:

Yarım Yüz Maskeler: Toz ve düşük toksisite gazları için P2/P3 filtreleri ile.

Tam Yüz Maskeler: Daha yüksek koruma gerektiren durumlar için.

Temiz Hava Beslemeli Sistemler: Yüksek konsantrasyonda toksik gazların bulunduğu ortamlar için.

Kaçış Maskeleri: Acil durumlarda kısa süreli koruma için.

El ve Kol Koruması:

Kimyasal Dirençli Eldivenler: Nitril, bütıl veya viton eldivenler (kullanılan kimyasallara göre seçilmeli).

Isıya Dayanıklı Eldivenler: Yüksek sıcaklık işlemleri için.

Uzun Kollu Laboratuvar Önlükleri: Kolların korunması için.

Vücut Koruması:

Laboratuvar Önlükleri: %100 pamuk veya alev geciktirici malzemeden.

Kimyasal Koruyucu Önlükler: Sıçrama riski yüksek işlemler için.

Tam Vücut Koruyucu Giysiler: Yüksek riskli işlemler ve acil durum müdahaleleri için.

Ayak Koruması:

Kapalı, Kimyasal Dirençli Ayakkabılar: Tercihen çelik burunlu.

Ayakkabı Kılıfları: Yüksek kontaminasyon riski olan alanlarda.

KKD seçiminde, plastik pirolizi sırasında oluşan spesifik kimyasalların özelliklerine dikkat edilmelidir. Örneğin, aromatik hidrokarbonlara karşı koruma için viton eldivenler tercih edilmelidir [41,42].

7.2. Acil Durum Planlaması ve Müdahale

Plastik yakıt araştırma laboratuvarlarında, potansiyel acil durumlar için kapsamlı planlar geliştirilmeli ve uygulanmalıdır [43-46].

Acil Durum Planı Bileşenleri:

Risk Değerlendirmesi: Potansiyel acil durumların belirlenmesi

Sorumluluklar ve Organizasyon: Acil durum ekibi, tahliye sorumluları, ilk yardım ekibi.

İletişim Prosedürleri: Acil durum bildirim zinciri, dış kurumlarla iletişim.

Tahliye Planları: Çıkış yolları, toplanma noktaları, engelli personel için özel düzenlemeler.

Acil Durum Ekipmanları: Yangın söndürücüler, ilk yardım malzemeleri, acil duş ve göz yıkama istasyonları, dökülme kitleri.

Eğitim ve Tatbikatlar: Düzenli eğitimler ve acil durum senaryolarının uygulamalı provaları.

Kimyasal Döküntü ve Sızıntılara Müdahale: Plastik piroliz ürünlerinin dökülmesi durumunda uygulanacak adımlar:

Alanı boşaltın ve havalandırmayı artırın.

Uygun KKE giyin (kimyasal dirençli eldiven, önlük, solunum koruması).

Yayılmayı önleyin (emici bariyerlerle çevreleme).

Uygun emici malzemelerle döküntüyü toplayın (organik emiciler).

Kontamine atıkları tehlikeli atık olarak etiketleyin ve bertaraf edin.

Alanı uygun çözücülerle temizleyin.

Yangın ve Patlama Durumları: Plastik piroliz ortamlarında yangın müdahalesi için öneriler:

Küçük yangınlar için uygun sınıf yangın söndürücü kullanın (B sınıfı: yanıcı sıvılar için).

Büyük yangınlarda alanı tahliye edin ve profesyonel yardım çağırın.

Mümkünse, güvenli bir şekilde ısı kaynaklarını ve yanıcı malzemeleri uzaklaştırın.

Piroliz ekipmanlarına bağlı gaz hatlarını kapatın.

Yangın söndürme çalışmalarını koordine edin ve yeniden alevlenme olasılığına karşı tetikte olun.

İlk Yardım Prosedürleri: Yaygın kimyasal maruziyetleri için ilk yardım:

Göz Teması: En az 15 dakika boyunca temiz suyla yıkayın, kontakt lensleri hemen çıkarın.

Cilt Teması: Kontamine giysileri çıkarın, etkilenen bölgeyi en az 15 dakika suyla yıkayın.

Soluma: Temiz havaya çıkarın, gerekirse oksijen verin, suni solunum uygulayın.

Yutma: Kusturmaya çalışmayın, ağız suyla çalkalayın, bol su içirin.

Tüm vakalarda tıbbi yardım alınmalı ve maruz kalan kimyasalın güvenlik bilgi formu (SDS) sağlık personeline iletilmelidir.

8. Yasal Düzenlemeler ve Standartlar

8.1. Türkiye’deki Laboratuvar Güvenliği Mevzuatı

Türkiye’de laboratuvar güvenliğini düzenleyen başlıca yasal çerçeve şunları içermektedir [47,48]:

6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (2012): İşyerlerinde iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için temel çerçeveyi oluşturur.

Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik (12.08.2013): Kimyasal maddelerle çalışılan işyerlerinde, çalışanların sağlık ve güvenliğini korumak için alınması gereken önlemleri belirler.

Kanserojen veya Mutajen Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik (06.08.2013): Kanserojen veya mutajen maddelerle çalışılan işyerlerinde özel koruyucu önlemleri tanımlar.

Tehlikeli Kimyasalların Yönetimi Yönetmeliği (11.12.2013): Tehlikeli kimyasalların envanteri, depolanması, etiketlenmesi ve güvenli kullanımı ile ilgili gereklilikleri belirler.

Atık Yönetimi Yönetmeliği (02.04.2015): Laboratuvar atıklarının sınıflandırılması, toplanması, taşınması ve bertaraf edilmesi ile ilgili kuralları düzenler.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (19.12.2007, son değişiklik 2020): Laboratuvarlar dahil binaların yangın güvenliği gerekliliklerini belirler.

Üniversite ve araştırma laboratuvarları için spesifik olarak, Türkiye’de üniversiteler için “Üniversite Laboratuvarlarında Güvenlik Kılavuzu” yayınlanmıştır ve bu kılavuz, iyi uygulama örneklerini ve minimum güvenlik gerekliliklerini içermektedir.

8.2. Uluslararası Standartlar ve Kılavuzlar

Plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği için uluslararası standartlar ve kılavuzlar şunları içerir [49,50]:

ISO 45001:2018: İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri standardı.

OECD Laboratory Safety Guidance (2022): Kimya laboratuvarlarında güvenli çalışma ilkeleri.

NFPA 45: Kimyasal laboratuvarların yangın koruması için standart.

NFPA 30: Yanıcı ve parlayıcı sıvılar kodu.

American Chemical Society (ACS) - Safety Guidelines for Chemical Laboratories (2020): Kapsamlı laboratuvar güvenliği rehberi.

Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS): Kimyasalların sınıflandırılması ve etiketlenmesi için küresel sistem.

Bu standartlar ve kılavuzlar, laboratuvar tasarımı, risk değerlendirmesi, güvenli çalışma prosedürleri, acil durum planlaması ve eğitim gereklilikleri için detaylı bilgiler sunmaktadır.

9. Vaka Analizleri ve Örnek Uygulamalar

9.1. Laboratuvar Kazaları ve Alınan Dersler

Plastik yakıt araştırmalarında meydana gelen kazaların sistematik analizi, benzer olayların önlenmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Bu analizler, teknik arızalar, prosedürel eksiklikler ve güvenlik kültürü zayıflıkları gibi kök nedenleri ortaya çıkararak, gelecekteki araştırmaların daha güvenli yürütülmesine katkıda bulunur [51].

Piroliz reaktörlerinde meydana gelen patlamalar genellikle basınç tahliye sistemlerinin tıkanması ve reaktörde biriken gazların basıncının artması sonucu olmaktadır. Bu tür kazalardan alınan dersler arasında, basınç tahliye sistemlerinin düzenli kontrolü ve temizliğinin kritik önemi, reaktör sistemlerinde yedekli güvenlik sistemlerinin bulundurulması ve yüksek riskli deneylerde uzaktan izleme ve kontrol sistemlerinin kullanılması yer almaktadır.

Laboratuvarlarda meydana gelen kimyasal yangınlar, çoğunlukla piroliz ürünlerinin analizi sırasında uçucu hidrokarbonların ısıtıcı gibi tutuşma kaynakları yakınında birikmesi ve tutuşması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tür olaylardan çıkarılan dersler, yanıcı sıvıların işlendiği alanlarda potansiyel tutuşma kaynaklarının kontrolü ve izolasyonunun önemi, yeterli havalandırmanın uçucu organik bileşiklerin birikmesini önlemedeki rolü ve uygun yangın söndürme ekipmanlarının kolay erişilebilir olmasının hayat kurtarıcı etkisi olarak özetlenebilir.

Toksik gaz maruziyetleri, özellikle klorlu plastiklerin pirolizi sırasında meydana gelen hidrojen klorür (HCl) gibi asidik gaz sızıntıları, laboratuvar personelinin sağlığını tehdit eden önemli risklerdendir. Bu tür olaylardan alınan dersler, halojenli polimerlerin pirolizinde özel önlemlerin alınması gerektiği (ön işlem, asit giderici ekleme gibi), gaz dedektörleri ve alarm sistemlerinin erken uyarı sağlamadaki önemi ve spesifik gazlara yönelik

solunum koruyucu ekipmanların bulundurulmasının gerekliliği olarak özetlenebilir.

9.2. İyi Uygulama Örnekleri

Plastik yakıt araştırmalarında güvenlik kültürünü başarıyla uygulayan kurumlar, proaktif yaklaşımlar ve sistematik güvenlik yönetimi ile öne çıkmaktadır. Bu kurumların ortak özellikleri arasında, her deney öncesi detaylı risk değerlendirmesi ve çalışma izni sistemi uygulamaları, yüksek riskli işlemlerin yapıldığı laboratuvarların ayrı binalarda konumlandırılması ve uzaktan izleme sistemleriyle donatılması, düzenli güvenlik tatbikatları ve ekipman kontrolleri, ve standardize edilmiş işletim prosedürleri ile kapsamlı dokümantasyon bulunmaktadır.

Başarılı güvenlik yönetimi uygulayan kurumlar genellikle ISO 45001 gibi uluslararası standartlara dayalı iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri kullanmakta, güvenlik performans göstergeleri belirleyerek düzenli değerlendirmeler yapmakta ve “ramak kala” olayların raporlanması ve analizi için teşvik sistemleri geliştirmektedir. Ayrıca, laboratuvar tasarımında en son güvenlik teknolojilerinin kullanımına önem vermektedirler.

İleri düzey araştırma merkezlerinde uygulanan güvenlik yaklaşımları arasında, risklerin minimize edilmesi için küçük ölçekli deneysel tasarım kullanılması, tam otomatik kontrol ve veri toplama sistemlerinin implementasyonu, katalizör ve reaksiyon koşullarının optimize edilmesi ile daha güvenli süreçlerin geliştirilmesi ve açık erişimli güvenlik veritabanı ve bilgi paylaşımı platformlarının oluşturulması yer almaktadır.

Bu iyi uygulama örnekleri, plastik yakıt araştırmalarında güvenlik kültürünün nasıl etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermekte ve diğer araştırma kurumları için model teşkil etmektedir. Güvenliğin bir öncelik olarak ele alınması, proaktif risk yönetimi, düzenli eğitim ve değerlendirme, ve bilgi paylaşımı, başarılı güvenlik programlarının ortak özellikleridir.

Plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin geliştirilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi ve yeşil kimya ilkelerinin benimsenmesiyle doğrudan ilişkilidir; bu bağlamda, yapay zeka destekli risk değerlendirme sistemleri, nano-biyokimya uygulamaları ve döngüsel ekonomi yaklaşımları, hem iş sağlığı ve güvenliğinin yeniden şekillendirilmesinde hem de çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır [51-54]

10. Sonuç ve Öneriler

Plastik atıkların yakıtı dönüştürölmesi, sürdürebilir atık yönetimi ve alternatif enerji kaynakları geliştirme açısından büyük potansiyel taşıyan bir araştırma alanıdır. Ancak, bu araştırmaların laboratuvar ortamında güvenli bir şekilde yürütölmesi, hem bilimsel ilerlemenin sürdürebilirliği hem de araştırmacıların sağlığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin çeşitli boyutları, organik kimya perspektifinden kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Plastik polimerlerin kimyasal yapısı ve termal davranışlarının anlaşılması, piroliz, katalitik dönüşüm ve gazlaştırma gibi termokimyasal süreçlerde ortaya çıkabilecek tehlikelerin öngörölmesi ve yönetilmesi için temel oluşturmaktadır. Farklı plastik türlerinin (PE, PP, PS, PET, PVC) pirolizi sonucunda oluşan ürünlerin kimyasal kompozisyonu ve toksikolojik özellikleri, alınması gereken güvenlik önlemlerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle, PVC gibi halojenli plastiklerin pirolizi sırasında oluşan hidrojen klorür gibi koroziv gazlar ve PS pirolizinde ortaya çıkan stiren gibi potansiyel kanserojenler, özel dikkat gerektirmektedir.

Laboratuvar ortamında karşılaşılan kimyasal tehlikeler, toksik gazlar ve buharlar, yanıcı ve patlayıcı maddeler ile koroziv ve tahriş edici kimyasallar olarak sınıflandırılabilir. Bu tehlikelerin etkin bir şekilde yönetilmesi, uygun mühendislik kontrolleri, idari önlemler ve kişisel koruyucu ekipmanların kullanımını içeren çok katmanlı bir güvenlik yaklaşımını gerektirmektedir. Özellikle, etkili havalandırma sistemleri, gaz dedektörleri, basınç tahliye sistemleri ve otomatik yangın söndürme ekipmanları gibi mühendislik kontrolleri, tehlikelerin kaynağında kontrol edilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Fiziksel tehlikeler arasında yer alan yüksek sıcaklık ve basınç riskleri, elektrik güvenliği ve mekanik tehlikeler, plastik piroliz ekipmanlarının tasarımı ve kullanımı sırasında dikkatle ele alınması gereken faktörlerdir. Bu risklerin yönetimi, ekipmanların düzenli bakımı, güvenlik sistemlerinin periyodik testleri ve personelin uygun eğitimi ile mümkündür.

Biyolojik tehlikeler ve atık yönetimi, plastik yakıt araştırmalarında genellikle göz ardı edilen ancak önemli güvenlik boyutlarıdır. Plastik atıkların mikrobiyal kontaminasyonu ve piroliz sonucunda oluşan atıkların uygun şekilde sınıflandırılması ve bertarafı, hem laboratuvar güvenliği hem de çevresel sürdürebilirlik açısından önemlidir.

Güvenlik yönetimi ve risk değerlendirmesi, laboratuvar güvenliğinin temelini oluşturmaktadır. Sistematik risk değerlendirme metodolojileri,

potansiyel tehlikelerin tanımlanması, risklerin analizi ve kontrol önlemlerinin belirlenmesini içeren yapılandırılmış bir süreçtir. Güçlü bir laboratuvar güvenlik kültürünün oluşturulması, liderlik taahhüdü, katılımcı yaklaşım, şeffaf iletişim, sürekli eğitim ve olumlu pekiştirme gibi stratejileri gerektirmektedir.

Laboratuvar tasarımı ve mühendislik kontrolleri, güvenlik altyapısının fiziksel temelini oluşturmaktadır. Çalışma alanlarının ayrılması, acil çıkışlar ve tahliye yolları, malzeme uyumluluğu ve kimyasal depolama gibi tasarım ilkeleri, güvenli bir laboratuvar ortamının oluşturulmasında kritik öneme sahiptir. Havalandırma sistemleri, otomasyon ve uzaktan kontrol, güvenlik duşları ve göz yıkama istasyonları, gaz algılama sistemleri ve basınç tahliye sistemleri gibi mühendislik kontrolleri, tehlikelerin kaynağında kontrol edilmesini sağlamaktadır.

Kişisel koruyucu ekipmanlar ve acil durum prosedürleri, mühendislik ve idari kontrollerin yetersiz kaldığı durumlarda, çalışanları tehlikelerden korumak için kullanılan son savunma hattıdır. Plastik yakıt araştırmalarına özel KKE gereksinimleri, göz ve yüz koruması, solunum koruması, el ve kol koruması, vücut koruması ve ayak koruması gibi unsurları içermektedir. Acil durum planlaması ve müdahale, potansiyel acil durumlar için kapsamlı planların geliştirilmesi ve uygulanmasını gerektirmektedir.

Yasal düzenlemeler ve standartlar, laboratuvar güvenliğinin yasal çerçevesini oluşturmaktadır. Türkiye'deki laboratuvar güvenliği mevzuatı, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve ilgili yönetmelikler ile düzenlenmektedir. Uluslararası standartlar ve kılavuzlar ise, laboratuvar tasarımı, risk değerlendirmesi, güvenli çalışma prosedürleri, acil durum planlaması ve eğitim gereklilikleri için detaylı bilgiler sunmaktadır.

Vaka analizleri ve örnek uygulamalar, laboratuvar kazalarından alınan dersleri ve başarılı güvenlik uygulamalarını içermektedir. Piroлиз reaktörlerinde meydana gelen patlamalar, kimyasal yangınlar ve toksik gaz maruziyetleri gibi kazalardan alınan dersler, benzer olayların önlenmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır. Entegre güvenlik yönetim sistemleri, akran güvenlik denetimleri, sanal gerçeklik tabanlı güvenlik eğitimleri ve otomasyon ve uzaktan izleme sistemleri gibi başarılı güvenlik uygulamaları, laboratuvar güvenliğinin sadece teknik önlemlerle değil, aynı zamanda organizasyonel ve kültürel faktörlerle de şekillendiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bulguları, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin çok boyutlu ve disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Organik kimya perspektifi, plastik polimerlerin

yapısını, kimyasal davranışlarını ve termal parçalanma mekanizmalarını anlamamıza olanak sağlayarak, laboratuvar güvenliği için temel bir bakış açısı sunmaktadır. Ancak, güvenlik yönetiminin etkinliği, teknik bilginin yanı sıra, güçlü bir güvenlik kültürü, etkili iletişim ve sürekli iyileştirme taahhüdü gibi organizasyonel faktörlere de bağlıdır.

Gelecekteki araştırmalar, plastik yakıt dönüşüm süreçlerinde güvenliği artırmak için yeni teknolojilerin ve yaklaşımların geliştirilmesine odaklanmalıdır. Özellikle, daha güvenli katalizörlerin ve reaksiyon koşullarının tasarlanması, proses yoğunlaştırma ve minyatürleştirme stratejileri, uzaktan izleme ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve yapay zeka destekli risk değerlendirme araçları, gelecek vadeden araştırma alanları arasında yer almaktadır.

Sonuç olarak, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliği, sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler geliştirirken, araştırmacıların sağlığını ve çevreyi korumak için vazgeçilmez bir unsurdur. Bu çalışmada sunulan kapsamlı güvenlik yaklaşımı, plastik atıkların değerli ürünlere dönüştürülmesi süreçlerinin güvenli, verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yürütülmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

11. Pratik Öneriler ve Yol Haritası

Plastik yakıt araştırmalarında güvenliği artırmak için araştırmacılara, laboratuvar yöneticilerine ve kurumlara yönelik pratik öneriler ve bir yol haritası aşağda sunulmuştur:

Araştırmacılar İçin Öneriler:

1. Her deney öncesinde kapsamlı bir risk değerlendirmesi yapın.
2. Kullanılan tüm kimyasalların güvenlik bilgi formlarını (SDS) okuyun ve anlayın.
3. Plastik türüne ve reaksiyon koşullarına göre oluşabilecek ürünleri ve bunların tehlikelerini önceden belirleyin.
4. Deneyleri mümkün olan en küçük ölçekte başlatın ve kademeli olarak ölçek büyütün.
5. Tüm güvenlik ekipmanlarının yerini ve kullanımını öğrenin.
6. Acil durum prosedürlerini düzenli olarak gözden geçirin ve tatbikatlara katılın.
7. “Ramak kala” olayları dahil tüm güvenlik endişelerini raporlayın.

8. Güvenli çalışma uygulamalarını meslektaşlarınızla paylaşın ve mentorluk yapın.

Laboratuvar Yöneticileri İçin Öneriler:

1. Kapsamlı bir laboratuvar güvenlik yönetim sistemi geliştirin ve uygulayın.
2. Düzenli risk değerlendirmeleri yapın ve kontrol önlemlerinin etkinliğini izleyin.
3. Tüm personel için düzenli ve uygulamalı güvenlik eğitimleri organize edin.
4. Güvenlik performansını ölçün ve iyileştirmeler için geri bildirim mekanizmaları oluşturun.
5. Güvenlik ekipmanlarının ve mühendislik kontrollerinin düzenli bakımını sağlayın.
6. Kimyasal envanter yönetimi ve atık bertaraf süreçlerini optimize edin.
7. Açık iletişim kanalları oluşturun ve güvenlik endişelerinin ifade edilmesini teşvik edin.
8. İyi uygulamaları belgelendirin ve standart işletim prosedürlerini güncel tutun.

Kurumlar İçin Öneriler:

1. Güvenliği stratejik bir öncelik olarak benimseyin ve gerekli kaynakları ayırın.
2. Laboratuvar tasarım ve yenileme projelerinde güvenlik faktörlerini ön planda tutun.
3. Kurum genelinde güvenlik kültürünü destekleyin ve olumlu davranışları ödüllendirin.
4. Diğer kurumlarla bilgi ve deneyim paylaşımı için işbirlikleri geliştirin.
5. Ulusal ve uluslararası güvenlik standartları ve kılavuzlarını takip edin.
6. Sigorta ve risk transfer stratejileri geliştirin.
7. Güvenlik konularında danışmanlık ve dış değerlendirme hizmetleri alın.
8. Güvenlik araştırmalarını ve yenilikçi güvenlik çözümlerini destekleyin.

Yol Haritası:

1. Kısa Vadeli Hedefler (0-6 ay):

Mevcut durumun değerlendirilmesi ve öncelikli risklerin belirlenmesi.

Acil güvenlik eksikliklerinin giderilmesi.

Temel güvenlik eğitimlerinin tamamlanması.

Acil durum prosedürlerinin güncellenmesi.

2. Orta Vadeli Hedefler (6-18 ay):

Kapsamlı güvenlik yönetim sisteminin geliştirilmesi ve uygulanması.

Mühendislik kontrollerinin iyileştirilmesi ve modernizasyonu.

İleri düzey güvenlik eğitim programlarının uygulanması.

Performans göstergelerinin belirlenmesi ve izlenmesi.

3. Uzun Vadeli Hedefler (18-36 ay):

Sürdürülebilir bir güvenlik kültürünün yerleştirilmesi.

İnovasyon ve sürekli iyileştirme mekanizmalarının oluşturulması.

Sektör lideri olarak güvenlik standartlarının belirlenmesi.

Bütünleşik sürdürülebilirlik ve güvenlik yaklaşımının benimsenmesi.

Bu yol haritası, plastik yakıt araştırmalarında laboratuvar güvenliğinin sistematik ve sürekli olarak geliştirilmesine yönelik bir çerçeve sunmaktadır.

Kaynakça

- [1] Yakışık, H. (2023). Plastik atıklar ve sürdürülebilirlik: Türkiye’de plastik atık yönetimi. Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 9(2), 36-55. <https://doi.org/10.46849/guiibd.1403473>
- [2] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- [3] Nanda, S., & Berruti, F. (2020). Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 123-148. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01094-7>
- [4] Mordoğan, D., & Şahin, E. (2021). Bir üniversitede bulunan laboratuvarlarda kullanılan kimyasal maddelere maruziyet riskinin değerlendirilmesi. *Journal of Medical Sciences*, 2(1), 30-40. <https://doi.org/10.46629/JMS.2021.33>
- [5] Ak, M., Soğancı, T., Gümüşay, O., & Çukurluoğlu, S. (2017). Yeşil kimya ile iletken polimer sentezi ve elektrokromik özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 753-758.
- [6] Budak, Y., & Keçeci, M. (2024). Sıfır atık ile yeşil dönüşüm: Türkiye’nin geleceği için çevre dostu kozmetik ve temizlik ürünleri. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13(3), 145–155.
- [7] Martins, M., Duque, J., Soares, K., & Orlando, M. (2021). Thermal Analysis of Recycled Plastics. *Composites Science and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3627-1_10
- [8] Ruscher, C., Rottler, J., Boott, C., MacLachlan, M., & Mukherji, D. (2019). Elasticity and thermal transport of commodity plastics. *Physical Review Materials*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.125604>
- [9] Han, W., Han, D., & Chen, H. (2023). Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *Polymers*, 15. <https://doi.org/10.3390/polym15071604>
- [10] Uddin, M. N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M. M., Rasul, M. G., Mahlia, T. M. I., & Ashrafur, S. M. (2018). Biyokütle piroliz teknolojilerindeki son gelişmelere genel bir bakış. *Energies*, 11(11), 3115. <https://doi.org/10.3390/en11113115>
- [11] Huang, J., Veksha, A., Chan, W., Giannis, A., & Lisak, G. (2022). Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111866>
- [12] Barnard, E., Arias, J., & Thielemans, W. (2021). Chemolytic depolymerisation of PET: a review. *Green Chemistry*, 23, 3765-3789. <https://doi.org/10.1039/D1GC00887K>

- [13] Rahman, M., Bhoi, P., & Menezes, P. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
- [14] Peng, Y., Wang, Y., Ke, L., Dai, L., Wu, Q., Cobb, K., Zeng, Y., Zou, R., Liu, Y., & Ruan, R. (2022). A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115243>
- [15] Gebre, S. H., Sendeku, M. G., & Bahri, M. (2021). Recent trends in the pyrolysis of non-degradable waste plastics. *ChemistryOpen*. <https://doi.org/10.1002/open.202100184>
- [16] Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadcem, I., Kalin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers in Chemistry*, 10, 960894. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>
- [17] Kayhan, E., & Demirer, A. (2016). Polimer işleme sektörlerindeki meslek hastalıkları, kazalar ve iş güvenliği. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 20(3), 497-507. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.40070>
- [18] Das, S. (2020). Toxic gases. In H. Ketha & U. Garg (Eds.), *Toxicology cases for the clinical and forensic laboratory* (pp. 387-396). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815846-3.00020-X>
- [19] Mevlevioğlu, U., Kadirgan, M. N., & Alev Çiftçiöğlu, G. (2019). Kimya Endüstrilerinde Patlama ve Yangınların Önlenmesi ve İlgili Vaka Çalışmaları. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 31(1), 36-46. <https://doi.org/10.7240/jcps.457561>
- [20] Sorgulu, F., Öztürk, M., Javani, N., & Dinçer, İ. (2022). Hidrojen ve Doğal Gaz Karışımının Evsel Cihazlarda Kullanımının DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi. *Cihannüma Teknoloji Fen Ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 1(1), 23-38. <https://doi.org/10.55205/joctensa.11202244>
- [21] Öner, A. (2009). Yanıcı/parlayıcı sıvı depolanan binalarda yangın güvenliği ve söndürme sistemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(1).
- [22] Yavuz, ř. (2020). Organik kimya laboratuvarında kullanılan kimyasalların iş sağlığı ve güvenliği açısından zararlarının incelenmesi. *İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi*, 3(3), 221-229. <https://doi.org/10.38213/ohsacademy.793954>
- [23] İlbasmış Tamer, S., & Erdoğan Orhan, İ. (2024). Kimyasal silahlara ve biyoteröre karşı tedavide kullanılan uygulamalar. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 48(2), 672-695. <https://doi.org/10.33483/jfpau.1363452>

- [24] Teke, H., & Çetin, D. (2024). Fen bilimleri eğitiminde laboratuvar güvenliğiyle ilgili araştırmaların incelenmesi. *Buca Eğitim Fakültesi Dergisi*, (62), 2883-2903.
- [25] Karabulut, M. (2016). Üniversitelerin kimya laboratuvarlarında çalışanların İSG risklerinin tespiti ve kimyasal maruziyetinin çözüm önerileri [Yüksek lisans tezi]. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.
- [26] Parlak Biçer, Z. Ö. (Ed.). (2024). Laboratuvar ve atölyelerde iş sağlığı ve güvenliği. Akademisyen Kitabevi. <https://doi.org/10.37609/akya.3354>
- [27] Kürkçü, E. A., Biçer, Ş., Sarıöz Ağca, İ., & Tayfur, D. (n.d.). Kimyasalların güvenli depolanması rehberi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Başkanlığı.
- [28] Taylan Özkan, A., Cansaran Duman, D., & Derici, K. (Eds.). (2019). Laboratuvar çalışanları için temel biyogüvenlik kuralları. Hipokrat Yayınevi.
- [29] Adar, E., & İlhan, F. (2018). Çevre Laboratuvarlarından Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetimi. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 322-332. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.321697>
- [30] Ergin, M., Erdoğan, S., & Erel, Ö. (2017). Biyokimya ve mikrobiyoloji laboratuvar personelinin tıbbi atık yönetimi konusundaki farkındalığı. *Türk Hijyen Ve Dencysel Biyoloji Dergisi*, 74(2), 129-138.
- [31] Ertaş, H., & Güden, M. A. (2019). Hastanelerde tıbbi atık yönetimi. *Sosyal Araştırmalar ve Yönetim Dergisi*, (1), 53-67. <https://doi.org/10.35375/sayod.541876>
- [32] Eze, W. U., Umunakwe, R., Obasi, H. C., Ugbaja, M. I., Uche, C. C., & Madufor, I. C. (2021). Plastics waste management: A review of pyrolysis technology. *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), 50-69. <https://doi.org/10.3934/ctr.2021003>
- [33] Garcia-Garcia, G., Martín-Lara, M. Á., Calero, M., & Blázquez, G. (2024). Environmental impact of different scenarios for the pyrolysis of contaminated mixed plastic waste. *Green Chemistry*, 26(7), 3853-3862. <https://doi.org/10.1039/D3GC04396G>
- [34] National Research Council. (2011). Prudent practices in the laboratory: Handling and management of chemical hazards: Updated version. National Academies Press.
- [35] Pasman, H. J., & Rogers, W. J. (2022). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 75, 104329. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423024000329>

- [36] National Research Council. (2011). Prudent practices in the laboratory: Handling and management of chemical hazards. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12654>
- [37] Gürkán, E. H. (2018). Sürdürülebilir laboratuvar güvenliği kültürü. Celal Bayar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(4), 224-230.
- [38] Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). Means of egress.
- [39] American National Standards Institute. (2020). ANSI/ISEA Z358.1-2014 (R2020): American national standard for emergency eyewash and shower equipment.
- [40] American National Standards Institute. (2022). ANSI/ASSP Z9.5-2022: Laboratory ventilation.
- [41] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (n.d.). Kişisel koruyucu donanımlar. https://kkdportal.csgb.gov.tr/media/kkd_kitabi
- [42] Eren, K. B., & Palaz, S. (2022). Kişisel Koruyucu Donanım Kullanımını Etkileyen Faktörlerin İmalat Çalışanları Açısından Araştırılması: Kesitsel Bir Çalışma. Sosyal Güvenlik Dergisi, 12(1), 167-186. <https://doi.org/10.32331/sgd.1135417>
- [43] Esin, M. T., & Yılmaz, F. (2023). Sağlık kurumları için afet ve acil durum planlama rehberi (G. İpek, Ed.). İstanbul Valiliği İstanbul Proje Koordinasyon Birimi.
- [44] American Chemical Society. (1995). Kimyasal sızıntı müdahale rehberi.
- [45] TÜYAK Yangın ve Teknolojileri Dergisi. (n.d.). TÜYAK Yangın ve Teknolojileri Dergisi. Teknik Dergiler Yayıncılık ve Organizasyon Ltd. Şti.
- [46] Murat, B., & Yılmaz, K. (2021). Depolarda iş sağlığı ve güvenliği bakımından risk faktörleri. International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (s. 411). Çanakkale, Türkiye.
- [47] Koşucu, F., Utlu, Z., & Eren, Ö. (2017). Laboratuvar çalışanlarının iş sağlığı ve güvenliği kültürü algısı. Sosyal Bilimler Dergisi, (15), 596-615. <https://doi.org/10.16990/SOBIDER.3801>
- [48] Canel, M., & Canel, E. (2016). Laboratuvar güvenliği. Gazi Kitabevi.
- [49] American Chemical Society. (2016). Guidelines for chemical laboratory safety in academic institutions.
- [50] International Organization for Standardization. (2025, January 22). ISO: The International Organization for Standardization. <https://www.iso.org>
- [51] Türkiye İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü. (2020). Laboratuvar kazaları analiz raporu. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
- [52] Aktürk-Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Doğal boyalarla sürdürülebilir gelecek: Yapay zeka, biyokimya ve yeşil dönüşümle iş sağlığı ve güvenliğinin yeniden şekillendirilmesi. İş Sağlığı ve Güvenliğinin Sosyal Politika

- İncelemeleri içinde (s. 5-28). Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub791.c3341>
- [53] Aktürk-Bozdemir, E., & Budak, Y. (2025). Nano-biyokimya ve yapay zeka ile çevresel dönüşüm: Yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar. Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler içinde (s. 3-3). Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub776.c3229>
- [54] Budak, Y., & Bozdemir, E. A. (2021). The hidden cost of cleanliness and beauty: How the microbiome impacts our health and the planet and solutions through green chemistry and the circular economy. *Turkish Journal of Science and Health*, 2(6), 116–132.

