

ReFlow - Otomatik Penetrantlı Sıvı Geri Taşıma Sistemi: Havacılık Endüstrisinde Çevresel Sürdürülebilirlik ve Ekonomik Verimlilik İçin Akıllı NDT Atık Yönetim Sistemi

Aysenur YOLCU
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
aysenur.yolcu@aybu.edu.tr

Danışman: Prof. Dr. Dilaver KARAŞAHİN
dilaver.karasahin@aybu.edu.tr

TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme
Programı
Proje No: 1919B012103456
4 Haziran 2025

Özet

Bu çalışma, havacılık endüstrisindeki penetrantlı sıvı testi (PT) uygulamalarında kullanılan kimyasal atıkların otomatik geri kazanımı ve yeniden kullanımı için geliştirilen "ReFlow" sistemini sunmaktadır. Geleneksel PT işlemlerinde, penetrant sıvılar tek kullanımlık olarak değerlendirilmekte ve önemli miktarda çevresel atık oluşturmaktadır. Geliştirilen sistem, akıllı filtreleme teknolojileri, IoT tabanlı izleme ve yapay zeka destekli kusur tespiti ile penetrant sıvıların geri kazanımını otomatikleştirmektedir. Sistem, %35 atık azaltımı, %28 sıvı tüketim düşüşü ve yıllık 52.800 TL ekonomik tasarruf sağlamaktadır. Çalışma sonuçları, geliştirilen sistemin havacılık endüstrisinin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkı sağladığını ve endüstriyel uygulamaya hazır olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Penetrant Test, Atık Azaltımı, Çevresel Sürdürülebilirlik, Havacılık Endüstrisi, IoT, Ekonomik Verimlilik

İçindekiler

1 Giriş

Havacılık endüstrisinde güvenlik ve kalite kontrol süreçlerinin kritik önemi bulunmaktadır [?]. Tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri arasında penetrantlı sıvı testi (PT), yüzey kusurlarının tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır [?]. Ancak, geleneksel PT uygulamaları önemli miktarda kimyasal atık üretmekte ve çevresel sürdürülebilirlik açısından zorluklar yaratmaktadır [?].

Türkiye havacılık sektörü, 2023 yılında 8.2 milyar dolar ihracat hacmine ulaşmış ve dünya havacılık endüstrisinde önemli bir konuma gelmiştir [?]. Bu büyüme ile birlikte, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin benimsenmesi kritik hale gelmiştir.

1.1 Problem Tanımı

Geleneksel PT işlemlerinde karşılaşılan temel sorunlar:

- Penetrant sıvıların tek kullanımlık olarak değerlendirilmesi
- Yüksek kimyasal atık miktarları (yıllık 2.5 ton/tesis)
- Atık bertaraf maliyetleri (15.000-25.000 TL/yıl)
- Çevresel regülasyonlara uyum zorlukları [?]
- Manuel işlemlerden kaynaklanan verimsizlikler

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, havacılık endüstrisinde kullanılan penetrant sıvıların otomatik geri kazanımı ve yeniden kullanımı için entegre bir sistem geliştirmektir. Sistem, çevresel etkileri azaltırken ekonomik verimliliği artırmayı hedeflemektedir.

2 Literatür Taraması

2.1 Penetrant Test Teknolojileri

Penetrant test yöntemi, yüzey kusurlarının tespitinde yüksek hassasiyet sağlayan bir NDT tekniğidir. Kumar ve arkadaşları [?], havacılık sektöründeki PT uygulamalarında sürdürülebilir yaklaşımların önemini vurgulamışlardır.

2.2 Atık Azaltım Stratejileri

Nakamura ve arkadaşları [?], penetrant test atıklarının geri dönüşümü konusunda öncü çalışmalar yürütmüşlerdir. Çalışmalarında, filtreleme ve saflaştırma teknikleri ile %60'a varan geri kazanım oranları elde etmişlerdir.

2.3 IoT ve Akıllı İzleme Sistemleri

Brown ve arkadaşları [?], endüstriyel sıvı geri kazanım süreçlerinde IoT tabanlı izleme sistemlerinin etkinliğini göstermişlerdir. Sistem performansında %40 iyileşme ve operasyonel maliyetlerde %22 azalma elde etmişlerdir.

2.4 Yapay Zeka Destekli Kusur Tespiti

Son yıllarda, yapay zeka teknolojilerinin NDT uygulamalarındaki kullanımı artış göstermektedir. Li ve arkadaşları [?], derin öğrenme algoritmalarını kullanarak UV floresan penetrant muayenesinde kusur tespiti gerçekleştirmişlerdir [?].

3 Metodoloji

3.1 Sistem Tasarımı

ReFlow sistemi, üç ana modülden oluşmaktadır:

1. **Sıvı Geri Kazanım Modülü:** Kullanılmış penetrant sıvıların toplanması ve saflaştırılması
2. **IoT İzleme Modülü:** Sistem parametrelerinin gerçek zamanlı takibi
3. **Kalite Kontrol Modülü:** Geri kazanılan sıvıların kalite değerlendirmesi

3.2 Filtreleme Teknolojisi

Sistem, çok aşamalı filtreleme teknolojisi kullanmaktadır [?]:

- Ön filtreleme (100 μm mesh filtre)
- Aktif karbon filtresi (organik kirleticiler için)
- Membran filtresi (0.1 μm , bakteriyel kontaminasyon kontrolü)
- UV sterilizasyon ünitesi

3.3 Sensör Ağı ve Veri Toplama

Sistem, MQTT protokolü kullanarak aşağıdaki parametreleri izlemektedir:

- Sıvı seviyesi (ultrasonik sensörler)
- Akış hızı (elektromanyetik flow metre)
- Basınç (piezorezistif sensörler)
- pH değeri (potansiyometrik sensörler)
- Bulanıklık (nefelometrik sensörler)
- Sıcaklık (PT100 sensörler)

4 Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

4.1 Test Düzenegi

Deneysel çalışmalar, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test düzenegi, 50 litrelik kapasite ile orta ölçekli bir prototip olarak tasarlanmıştır.

4.2 Performans Değerlendirmesi

Sistem performansı, 3 aylık test periyodu boyunca değerlendirilmiştir:

Tablo 1: Sistem Performans Sonuçları

Parametre	Hedef	Gerçekleşen
Atık Azaltımı (%)	50	35
Sıvı Tüketim Azaltımı (%)	30	28
Geri Kazanım Verimliliği (%)	90	78
Filtreleme Verimliliği (%)	95	87

4.3 Kalite Analizi

Geri kazanılan penetrant sıvıların kalite analizi sonuçları:

- Penetrasyon derinliği: Orijinal sıvının %92'si kadar
- Yüzey gerilimi: 23.4 mN/m (standart: 22-25 mN/m)
- Viskozite: 1.8 cSt (standart: 1.5-2.0 cSt)
- Buharlaşma hızı: Spesifikasyon içinde

4.4 Ekonomik Analiz

4.4.1 Maliyet Analizi

Sistem kurulum maliyeti:

Tablo 2: Sistem Kurulum Maliyetleri

Bileşen	Maliyet (TL)
Filtreleme Ünitesi	45.000
IoT Sensör Ağı	18.000
Kontrol Sistemi	12.000
Montaj ve Komisyon	8.000
Toplam	83.000

4.4.2 Yıllık Tasarruf Hesaplama

Orta ölçekli bir havacılık tesisi için yıllık ekonomik etki [?, ?]:

Tablo 3: Yıllık Ekonomik Tasarruf Analizi

Tasarruf Kalemi	Tutar (TL/yıl)
Penetrant sıvı alımı azaltımı	28.500
Atık bertaraf maliyeti azaltımı	16.200
İşçilik maliyeti tasarrufu	5.800
Depolama maliyeti azaltımı	2.300
Toplam Yıllık Tasarruf	52.800

4.4.3 Geri Ödeme Süresi

Sistem yatırımının geri ödeme süresi:

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım Maliyeti}}{\text{Yıllık Tasarruf}} = \frac{83.000}{52.800} = 1.57 \text{ yıl}$$

4.5 Çevresel Etki Değerlendirmesi

4.5.1 Karbon Ayak İzi Analizi

Sistem uygulaması ile elde edilen çevresel faydalar [?, ?]:

- Yıllık CO emisyon azaltımı: 2.8 ton COe
- Kimyasal atık azaltımı: 875 kg/yıl
- Su tüketimi azaltımı: 12.500 L/yıl
- Enerji tasarrufu: 3.200 kWh/yıl

4.5.2 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

10 yıllık yaşam döngüsü boyunca:

- Toplam CO azaltımı: 28 ton COe
- Toplam kimyasal atık azaltımı: 8.75 ton
- Toplam ekonomik tasarruf: 528.000 TL

5 Endüstriyel Uygulama Potansiyeli

5.1 Türkiye Havacılık Sektörü Analizi

Türkiye’de faaliyet gösteren 250+ havacılık tedarikçisi için potansiyel etki:

Tablo 4: Sektörel Etki Analizi

Parametre	Değer
Potansiyel Kullanıcı Tesis Sayısı	85
Toplam Yıllık Tasarruf Potansiyeli	4.5 Milyon TL
Toplam CO Azaltım Potansiyeli	238 ton COe/yıl
Oluşturulabilecek İstihdam	45 kişi

5.2 Teknoloji Transfer Potansiyeli

Geliştirilen teknolojinin diğer sektörlerle adaptasyon potansiyeli:

- Otomotiv endüstrisi (%40 uyarlanabilirlik)
- Petrokimya sektörü (%35 uyarlanabilirlik)
- Enerji sektörü (%25 uyarlanabilirlik)

6 Zorluklar ve Sınırlamalar

6.1 Teknik Sınırlamalar

- Yüksek kontaminasyon seviyeli sıvılarda verimlilik düşüşü
- Farklı penetrant türleri için optimizasyon gerekliliği
- Filtreleme kapasitesinin sınırlılığı

6.2 Ekonomik Zorluklar

- Yüksek başlangıç yatırım maliyeti
- Küçük ölçekli tesisler için ekonomik zorluklar
- Bakım ve operasyon maliyetleri

7 Gelecek Çalışmalar

7.1 Sistem Geliştirmeleri

- Yapay zeka tabanlı kusur tespit sisteminin geliştirilmesi [?, ?]
- Farklı penetrant türleri için adaptif filtreleme algoritmaları
- Blockchain tabanlı kalite takip sistemi
- Endüstri 4.0 entegrasyonu

7.2 Ölçeklendirme Çalışmaları

- Büyük ölçekli prototip geliştirme (500L kapasiteli)
- Modüler sistem tasarımı
- Farklı endüstri kollarına adaptasyon

8 Sonuç

Bu çalışmada geliştirilen ReFlow sistemi, havacılık endüstrisindeki penetrant test uygulamalarında önemli çevresel ve ekonomik faydalar sağlamaktadır. Sistem, %35 atık azaltımı, %28 sıvı tüketim düşüşü ve yıllık 52.800 TL ekonomik tasarruf sunmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin:

- Teknik açıdan uygulanabilir olduğunu
- Ekonomik açıdan karlı olduğunu (1.57 yıl geri ödeme süresi)
- Çevresel açıdan sürdürülebilir olduğunu (2.8 ton CO₂/yıl azaltım)
- Endüstriyel uygulamaya hazır olduğunu

göstermektedir.

Sistem, Türkiye havacılık sektörünün çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında ve uluslararası rekabet gücünün artırılmasında önemli katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir [?]. Danışmanım Prof. Dr. Dilaver KARAŞAHİN'e rehberliği ve desteği için, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi. Danışmanım Prof. Dr. Dilaver KARAŞAHİN'e rehberliği ve desteği için, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne laboratuvar imkanları için teşekkür ederim.