



Maya Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Farklı Dekoloran ve PAK Kombinasyonlarının Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Bilgehan İlker HARMAN¹ Mert Minaz^{2*} Hasan KÖSEOĞLU¹ Nevzat Özgü YİĞİT¹ Mehmet KİTİŞ¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

²Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Rize, Türkiye

Geliş Tarihi: 28.03.2025

Kabul Tarihi: 27.07.2025

Basım Tarihi: 31.07.2025

Atıf yapmak için: Harman, B.İ., Minaz, M., Köseoğlu, H., Yiğit, N.Ö., & Kitiş, M. (2025). Maya endüstrisi atıksularının arıtımında farklı dekoloran ve PAK kombinasyonlarının etkinliğinin değerlendirilmesi. *Anadolu Çev. Hay. Bil. Derg.*, 10(4), 521-532. <https://doi.org/10.35229/jaes.1667490>

How to cite: Harman, B.İ., Minaz, M., Köseoğlu, H., Yiğit, N.Ö., & Kitiş, M. (2025). Evaluation of the efficiency of different decolorant and PAC combinations in the treatment of yeast industry wastewater. *J. Anatol. Env. Anim. Sci.*, 10(4), 521-532. <https://doi.org/10.35229/jaes.1667490>

<https://orcid.org/0000-0003-1189-2289>
 <https://orcid.org/0000-0003-1894-9807>
 <https://orcid.org/0000-0003-0183-208X>
 <https://orcid.org/0000-0003-1564-0222>
 <https://orcid.org/0000-0002-6836-3129>

***Sorumlu yazar:**

Mert MINAZ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Rize, Türkiye

✉: mert.minaz@erdogan.edu.tr

Öz: Maya endüstrisi, geniş çapta kullanılan mikrobiyal fermentasyon süreçleri ile yüksek biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) içeren atıksular üretmektedir. Bu atıksular, yüksek organik madde, renk verici bileşikler ve askıda katı maddeler içerdiğinden, uygun ve etkili arıtım stratejileri gerektirmektedir. Bu çalışmada, maya endüstrisi atıksularının arıtımına yönelik farklı dekoloran dozlarının ve Polialüminyum Klorür (PAK) kullanımının etkinliği karşılaştırılmıştır. Çalışmada, beş farklı dekoloran (farklı konsantrasyonlardaki A, B, C, D ve E kimyasalı) ve çeşitli PAK (F kimyasalı) dozları test edilerek, bu kimyasalların renk (Pt-Co), bulanıklık ve KOİ giderimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, dekoloranlar arasında en iyi giderim performansının C kimyasalı ile sağlandığını göstermiştir. PAK ise tek başına kullanıldığında dahi oldukça yüksek giderim verimi sağlamıştır. Bununla birlikte, çalışmada PAK'ın, en iyi performans gösteren dekoloran (C kimyasalı) ve ticari bir flokülant ile kombinasyonunun daha yüksek arıtım verimi sağladığı belirlenmiştir. Bu kombinasyon, maya endüstrisi atıksularının renk, bulanıklık ve KOİ gideriminde etkili yöntem olarak öne çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma, maya endüstrisi atıksularının arıtımında PAK ve dekoloran kombinasyonlarının etkinliğini ortaya koyarak hem akademik literatüre hem de özel sektör paydaşlarına önemli bir rehber niteliği taşımaktadır. Elde edilen veriler, endüstriyel ölçekte uygulanabilecek yeni nesil arıtım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel atıksu arıtımı, dekoloran, flokülasyon, koagülasyon, maya endüstrisi.

Evaluation of the Efficiency of Different Decolorant and PAC Combinations in the Treatment of Yeast Industry Wastewater

Abstract: The yeast industry generates wastewater with high biochemical oxygen demand (BOD) and chemical wastewaters contain high organic matter, color-inducing compounds, and suspended solids, necessitating appropriate treatment strategies. In this study, the effectiveness of different decolorant doses and Poly Aluminium Chloride (PAC) applications in yeast industry wastewater treatment was compared. Five different decolorants (chemicals A, B, C, D, and E at varying concentrations) and various PAC (chemical F) doses were tested, and their effects on color removal (Pt-Co), turbidity, and COD reduction were analyzed. The results indicated that chemical C exhibited the highest removal performance among the tested decolorants. PAC, even when used alone, provided a significantly high removal efficiency. Furthermore, combining PAC with the best-performing decolorant (chemical C) and a commercial flocculant enhanced treatment efficiency. This combination emerged as the most effective method for removing color, turbidity, and COD from yeast industry wastewater. Ultimately, this study provides valuable insights into the efficiency of PAC and decolorant combinations in yeast industry wastewater treatment, serving as an important reference for both academic research and industrial stakeholders. The findings contribute to developing next-generation treatment strategies that can be implemented on an industrial scale.

Keywords: Industrial wastewater treatment, decolorant, flocculation, coagulation, yeast industry.

GİRİŞ

Maya endüstrisi, bira, şarap, ekmek, ekşi maya ürünleri ve biyoyakıt üretimi gibi çeşitli sektörlerde kullanılan temel bir biyolojik katalizör olan mayanın üretimiyle ilgilidir (Faria-Oliveira vd., 2013). Endüstriyel fermentasyon süreçlerinin hızla gelişmesi ve artan üretim

kapasitesi, bu sektörde önemli ekonomik fırsatlar yaratırken, beraberinde çevresel sorunları da getirmektedir. Özellikle, maya üretimi sırasında ortaya çıkan atıksular, yüksek organik yük, renkli çözünen maddeler ve çeşitli kimyasal kirleticiler içermesi nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından risk oluşturabilmektedir (Blonskaja ve Zub, 2009). Atıksuların uygun şekilde arıtılmaması, su ekosistemlerinde

oksijen tüketimini artırarak biyolojik dengenin bozulmasına ve su kaynaklarının kirlenmesine yol açabilmektedir (Metcalf & Eddy, Inc., 2014). Maya üretim süreçlerinde, fermentasyon sırasında oluşan yan ürünler yalnızca çözelti formunda değil, aynı zamanda yüksek yoğunluklu askıda katı madde (AKM), protein ve renkli bileşikler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Bu atıksuların arıtımı için geleneksel mekanik ve biyolojik arıtma yöntemlerinin ötesinde, kimyasal arıtım uygulamalarının da devreye alınması gerekmektedir. Son yıllarda yapılan biyolojik arıtım çalışmaları, maya endüstrisi kaynaklı atıksulardan koagülasyon, biyofilm ve membran reaktör sistemleri ile yüksek oranda organik madde (KOİ/BOİ) giderimi sağlanabileceğini göstermiştir. Örneğin, anaerobik + aerobik süreçlerin birleşimi ile KOİ gideriminde %65 oranında başarı elde etmiş, ancak renk (melanoidin vb.) bileşenlerin giderimi için tamamlayıcı kimyasal işlemler gerekliliğini vurgulamıştır (Gladchenko vd., 2004). Sonuç olarak, biyolojik yöntemlerin organik madde gideriminde etkili olsa da renk gideriminde sınırlı kaldığını ve kimyasal arıtma adımlarıyla entegrasyona ihtiyaç olduğunu açıkça göstermektedir. Diğer taraftan maya atıksularını mikro-, ultra- ve nano-filtrasyon sistemlerinden geçirerek renk gideriminde %89, KOİ azaltımında %72'ye ulaşmıştır (Mutlu vd., 2002). Endüstriyel atıksuların özellikleri, kullanılan hammadde, fermentasyon süreci ve üretim ölçeği gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden, arıtma stratejilerinin de bu çeşitliliği göz önünde bulundurarak optimize edilmesi önemlidir (Metcalf & Eddy, Inc., 2014).

Endüstriyel atıksuların arıtımında özellikle renk giderimi önemli bir yer tutmaktadır. Renk, sadece estetik bir sorun olmakla kalmayıp, aynı zamanda suyun biyolojik arıtım aşamalarında verimliliği olumsuz etkileyebilecek bir parametre olarak değerlendirilir. Tekstil ve boya endüstrilerinde olduğu gibi, maya endüstrisinde de renkli atıksuların giderilmesinde dekoloranlar etkili bir çözüm sunmaktadır (Khristoskova, 1984; Kurade vd., 2019). Dekoloranlar, atıksularda bulunan renk verici organik bileşiklerin yapısını bozarak, bu maddelerin çöktürülüp sistemden uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Yapılan bir çalışmada, dekoloran kullanımının suyun genel kalitesini artırarak biyolojik arıtım süreçlerini olumlu etkilediği gösterilmiştir (Robinson vd., 2001). Bu çalışmalar, dekoloranların doğru doz ve uygulama yöntemleriyle kullanıldığında, atıksuların renk gideriminde yüksek başarı sağladığını göstermektedir. Maya endüstrisine özgü atıksular, çoğunlukla bira üretimiyle birlikte anılan mayadan kaynaklı yan ürünlerle benzer özellikler taşımaktadır. Bira üretiminde ortaya çıkan yan ürünlerden biri olan bira mayası, yüksek organik madde ve renk yoğunluğuna sahip atıksular üretmektedir (Karlovic vd., 2020). Bira üretiminden kaynaklanan atıksuların, özellikle yüksek renk ve organik yük nedeniyle geleneksel arıtma yöntemleriyle tam olarak

arıtılamadığı, dolayısıyla ek kimyasal müdahalelere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır (Mussatto, 2014). Bu bağlamda, maya endüstrisinde de ortaya çıkan atıksular için benzer bir arıtım stratejisi geliştirilmesi gerekmektedir.

Kimyasal arıtımın arka planında, dekoloranların yanı sıra PAK (Polialüminyum klorür) ve flokülantların kullanımı önemli yer tutmaktadır. PAK, suyun içerisindeki askıda bulunan partiküllerin homojen dağılımını sağlayarak, bu partiküllerin flokülasyon sürecini kolaylaştırır (Zhang et al., 2018). Flokülantlar ise, küçük partiküllerin bir araya gelerek daha büyük floklar oluşturmaya olanak tanır. Bu floklar daha sonra çökeltme tanklarında veya filtreleme sistemlerinde daha rahat bir şekilde ayrılabilir. Organik polielektrolitlerin ve benzeri flokülantların, su arıtımında partikül giderim verimliliğini arttırdığı ifade edilmiştir (Bolto ve Gregory, 2007). Bu yöntemler, özellikle yüksek organik ve renk yüküne sahip atıksuların arıtımında önemli avantajlar sunmaktadır.

Literatürde, farklı dekoloran türlerinin ve kimyasal arıtım maddelerinin atıksu arıtımındaki performansını değerlendiren çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bir derleme çalışmada, tekstil endüstrisinde kullanılan dekoloranların ve biyolojik yöntemlerle entegre uygulamaların, renk giderimi ve organik madde azaltımında etkili olduğu belirtilmiştir (Banat vd., 1996). Bu çalışmalar, maya endüstrisine özgü atıksuların arıtımında da benzer stratejilerin uygulanabileceğini göstermektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, dekoloranların suyun renksizleştirilmesi üzerindeki etkisinin yanı sıra, sonrasında uygulanacak biyolojik arıtım yöntemlerinin verimliliğini de arttırdığını ortaya koymuştur. Atıksu arıtımında kullanılan yöntemler genellikle çok aşamalı bir yaklaşım gerektirmektedir. İlk aşamada, mekanik filtrasyon ve AKM giderimiyle büyük partiküllerin uzaklaştırılması; ikinci aşamada, kimyasal arıtım uygulamalarıyla renk, organik yük ve AKM'nin azaltılması; üçüncü aşamada ise biyolojik arıtım yöntemlerinin entegre edilmesi söz konusudur. Bu entegre yaklaşım, suyun yeniden kullanım potansiyelini arttırırken, çevresel kirliliğin de önemli ölçüde azaltılmasını sağlamaktadır. Bira atıksularının anaerobik membran biyoreaktör (AnMBR) kullanılarak arıtımında, kimyasal ön işlemlerin sonrasındaki biyolojik arıtımın verimliliği arttırdığı ve arıtılmış suyun kalitesinin yükseldiği belirtilmiştir (Li vd., 2016).

Maya endüstrisi gibi yüksek üretim kapasitesine sahip sektörlerde, atıksu miktarının artmasıyla birlikte arıtma süreçlerinin de ölçeklenebilir ve ekonomik olması büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel atıksuların arıtımında kullanılan kimyasal maddelerin doğru kombinasyonu, hem arıtım maliyetlerinin düşürülmesi hem de suyun kalitesinin iyileştirilmesi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Sürdürülebilir çevre politikaları ve artan çevresel duyarlılık, atıksu arıtım teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir

itici güç olmuştur. Geleneksel arıtım yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda, kimyasal arıtım maddelerinin entegrasyonu, atıksulardaki kirleticilerin giderilmesinde daha etkili sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Özellikle, maya endüstrisi atıksularında yüksek renk ve organik yük oranları, kimyasal arıtım yöntemlerinin kritik önem kazanmasına neden olmaktadır. Atıksuların içerisindeki renkli bileşenlerin giderilmesinde dekokloranların, suyun fizikokimyasal özelliklerini iyileştirerek biyolojik arıtım öncesi hazırlık aşamasında etkili olduğu gösterilmiştir. Dekoloranların yanı sıra, PAK ve flokülantların kullanımı, askıda bulunan katı maddelerin ve organik partiküllerin verimli bir şekilde çöktürülmesini sağlayarak, suyun berraklığını artırmaktadır. Bu yaklaşımlar, hem laboratuvar hem de pilot ölçekli çalışmalarla desteklenmekte olup, atıksu arıtımında sinerjik etkiler yaratarak uygulama verimliliğini artırmaktadır (Bolto & Gregory, 2007; Robinson et al., 2001).

Son yıllarda yayımlanan bazı çalışmalarda, maya atıksularında kimyasal koagülasyon, elektrokoagülasyon ve membran filtrasyon tekniklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmalarda, özellikle biyolojik arıtım öncesi kimyasal uygulamaların renk ve KOİ giderimindeki katkısı vurgulanmıştır (Alavijeh vd., 2022). Ayrıca 2024 yılında yapılan bir başka çalışmada ise melanoidin gibi renkli bileşiklerin giderimi için koagülasyonun biyolojik arıtım öncesi kritik rolü olduğu ortaya konmuştur (Akhlaghi vd., 2024). Bu güncel araştırmalar, mevcut çalışmanın bilimsel katkısını daha güçlü bir şekilde temellendirmektedir.

Bu bağlamda, mevcut araştırmalar ve uygulamalardan yola çıkarak, maya endüstrisine özgü atıksuların arıtımında kimyasal yöntemlerin, biyolojik arıtım öncesi ön işlemlerle entegre edilmesinin büyük bir potansiyel taşıdığı görülmektedir. Endüstriyel ölçekte gerçekleştirilen pilot uygulamalar, suyun yeniden kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sonuçlar verecektir. Bu kapsamda, mevcut çalışma beş farklı dekokloran, bir PAK ve bir flokülantı dikkate alarak maya atıksuyunun arıtımı için en etkili yöntemi ortaya koymuştur. Bu çalışmanın özgün yönü, maya endüstrisine ait yüksek renk ve KOİ içeriğine sahip atıksuların arıtımında, beş farklı ticari dekokloran kimyasalının detaylı doz-yanıt ilişkisiyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ve bu kimyasalların PAK ile kombinasyonlarının ayrı ayrı test edilmesidir. Literatürde maya endüstrisi atıksuları için bu kadar çeşitli bir kimyasal kombinasyonun sistematik biçimde incelendiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, elde edilen veriler sadece laboratuvar koşullarına özgü kalmayıp, uygulamaya dönük optimum dozaj önerileri ile birlikte, endüstriyel tesisler için pratik arıtım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem

bilimsel literatüre hem de saha uygulamalarına değer katmayı hedeflemektedir.

MATERYAL VE METOT

Atıksu Karakterizasyonu: Bu çalışmada kullanılan atıksu, Türkiye’de faaliyet gösteren ticari bir maya üretim tesisinden doğrudan temin edilmiştir. Numuneler, üretim sürecinin ardından hiçbir kimyasal veya fiziksel ön işleme tabi tutulmadan, doğal haliyle laboratuvara getirilmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Numunelerde öncelikle atıksu karakterizasyonunu belirlemek için analizler yapılmıştır. Atıksu karakterizasyonu karıştırılmış (çökelmemiş) ve 3 saat çökelmeye tabi tutulmuş numuneler üzerinde yapılmıştır. Çökelmiş numune karakterizasyonu atıksu arıtma tesisindeki mevcut çökeltilimin renk ve KOİ giderimine etkisinin simüle edilmesi ve dolayısıyla bu çalışmada uygulanan kimyasalların gerçek arıtma performansının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Her iki atıksu numunesinin fiziko-kimyasal karakteristiği Tablo 1’de verilmiştir. Çökelmemiş ve 3 saat çökelmeye bırakılmış numunelere ait renk farkı, renk ölçümü öncesinde numunelerin filtreden geçirilmemesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, çökelmemiş örneklerde askıda katı madde ve bulanıklıktan kaynaklanan ışık absorpsiyonu, renk değerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur. Çökelme sonrası bu partiküllerin dibe çökmesiyle birlikte, gerçek renk ölçümüne katkı yapan etmenler azalmış ve Pt-Co değeri düşmüştür. Bu durum, ölçüm sonuçlarındaki farkı açıklamaktadır.

Tablo 1. Çökelmemiş ve çökelmiş numunelerin fiziko-kimyasal karakteristiği.

Table 1. Physicochemical characteristics of unsettled and settled samples.

Parametre	Çökelmemiş Orijinal Numune ^a	3 Saatlik Çökelme Sonrası Orijinal Numune
pH	7,17	7,17
KOİ (mg/L)	1512	1446
RES ^b -436 nm (m ⁻¹)	83,39	66,46
RES-525 nm (m ⁻¹)	57,79	42,36
RES-620 nm (m ⁻¹)	45,47	31,02
Pt-Co (Pt-Co Renk Birimi)	3220	2650
İletkenlik (microS/cm)	5010	5020
Tuzluluk (%)	2,6	2,6
Bulanıklık (NTU)	231	155
Askıda katı madde (mg/L)	680	192
Nitrat azotu (NO ₃ -N) (mg/L)	-	14,4
Nitrit azotu (NO ₂ -N) (mg/L)	-	0,052
Amonyum azotu (NH ₄ -N) (mg/L)	-	60,5
Toplam azot (TN) (mg/L)	-	143
Toplam fosfor (TP) (mg/L)	-	11,3
Sülfat (SO ₄ ²⁻) (mg/L)	-	60

^a Analiz yapılmadan önce numune homojen hale gelecek şekilde karıştırılmıştır.

^b RES: Renklilik sayısı.

Kullanılan Dekoloranlar ve Jar Testi: Atıksu karakterizasyon belirleme aşamasının ardından, numuneler üzerinde dekokloran maddeler ve PAK ilavesi ile sırasıyla koagülasyon, flokülasyon ve çökeltilme proseslerini izleyen arıtılabilirlik çalışmaları yapılmıştır. Toplam yedi farklı flokülant kullanılmıştır. Test edilen dekokloranların, PAK’ın ve flokülantın fiziko-kimyasal özellikleri Tablo 2’de sunulmuştur. Çalışmada uygulanan deneysel plan ise Tablo 3’de verilmiştir. Jar testlerinde kullanılan kimyasal doz aralıkları belirlenirken, araştırma ekibinin benzer endüstriyel atıksu arıtımı konularında edindiği laboratuvar ve saha

deneyimleri ile üretici firmaların kimyasallara ilişkin önerdiği uygulama doz aralıkları dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda belirlenen doz aralıkları, her bir kimyasal için

optimum performansın gözlemlenmesine olanak sağlayacak şekilde geniş tutulmuştur.

Tablo 2. Test edilen kimyasalların fiziko-kimyasal özellikleri.
Table 2. Physicochemical properties of tested chemicals.

Kimyasalın Kodu	Tip	Yoğunluk (gr/cm ³ , 20°C sıcaklıkta)	Viskozite (cP, 23°C sıcaklıkta)	Formu	İçerik	pH
A	Dekoloran	1,07±0,05	<10	Sıvı	DMA-Epiklorohidrin, katyonik, %50 polimer, %50 su	5,5±0,5
B	Dekoloran	1,06±0,05	1000-3000	Sıvı	Polidadamac, katyonik, %40 polimer, %60 su	4±0,5
C	Dekoloran	1,20±0,05	30-1000	Sıvı	Katyonik, %50 polimer, %50 su	3,5±0,5
D	Dekoloran	1,25±0,1	-	Sıvı	Katyonik, %50 polimer, %50 su	3,0±0,5
E	Dekoloran	1,12	-	Sıvı	Poliamidik polimer, katyonik, %48 polimer, %52 su	4,0-5,0
F	PAK	1,40±0,01	<50	Sıvı	Polialüminyum klorür hidroksit, Al ₂ O ₃ cinsinden %17'lik. 1 ton PAK 90 kg (%9,0) Al ³⁺ içerir.	3,0±0,5
G	Flokülant	-	-	Toz	Yüksek moleküler ağırlıklı orta katyoniklikte flokülant	-

Tablo 3. Jar testi deneyleri matrisi.

Table 3. Matrix of jar test experiments.

Kullanılan Kimyasal	Uygulanan Dozlar (mg/L)
A	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000
B	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000
C	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 800, 850, 900, 950, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
D	200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
E	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
F	50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000
KOM1 (F+C)	100+100, 100+200, 100+400, 100+800, 100+1600, 200+100, 200+200, 200+300, 200+400, 200+500, 200+800, 300+100, 300+200, 300+300, 300+400, 300+500, 300+800
KOM2 (F+G)	300+10, 300+20, 300+40, 300+60, 300+80, 300+100, 300+120, 300+140, 300+160, 300+180, 300+200, 300+250, 300+300

Tüm jar testi deneylerinde, her bir deney seti için 300 mL hacminde atıksu numunesi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle numunede renk ve KOİ giderimleri göz önüne alınarak dekoloran, PAK kimyasallarının doz tespiti atıksuyun orijinal pH değerinde yapılmıştır. Tüm testlerde koagülasyon ve flokülasyon işlemleri, Selecta ve Stuart marka jar test düzeneklerinde gerçekleştirilmiştir. Koagülasyon jar test cihazında kimyasalın eklenmesinin ardından 100 RPM'de 30 saniye boyunca karıştırılarak, daha sonra flokülasyon ise 35 RPM'de 10 dakika süresince yavaş karıştırmaya tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Yavaş karıştırmadan sonra oluşan flokların çökmesi için numune 60 dakika çökeltme bırakılmıştır. Flokülasyon, koagülasyon ve çökeltme süreçlerinde uygulanan süre ve karıştırma hızları, literatürde yer alan önceki protokollerle uyumlu şekilde gerçekleştirilmiştir (Amuda & Amoo, 2007). Çökeltme bırakılan numunelerin üst kısmından alınan su örneklerinde renk, KOİ, bulanıklık, pH ve iletkenlik parametrelerinin ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmada her kimyasal için optimum doz belirlenirken, öncelikli olarak Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde sınır değeri bulunan KOİ ve renk parametreleri esas alınmıştır. Bu iki parametrede en yüksek giderimin sağlandığı ve aynı zamanda kullanılan doz miktarının ekonomik açıdan minimumda tutulduğu doz, "optimum doz" olarak değerlendirilmiştir. pH, bulanıklık ve iletkenlik gibi diğer su kalite parametreleri ise ikincil düzeyde değerlendirme ölçütü olarak dikkate alınmıştır.

Dekoloran amaçlı kullanılan PAK (F kimyasalı) ile arıtılabilirlik çalışmalarında uygulanan dozlar Al³⁺ cinsinden hesaplanmıştır. Diğer dekoloran dozları ise katı polimer cinsinden hesaplanarak gerekli konsantrasyonlardaki çözelti hazırlanmış ve atıksuya dozlanmıştır. Dekoloranların ve PAK'ın optimum doz belirleme aşamalarının ardından renk ve KOİ giderimlerini

daha da arttırmak amacıyla en fazla giderimlerin bulunduğu kimyasal türleri (F ve C dekoloranı) birbirleri ile kombine edilerek ek testler gerçekleştirilmiştir. G kimyasalı flokülant olarak kullanılmaktadır. Bu kimyasalın renk ve KOİ giderimine olan etkilerini belirlemek amacıyla farklı dozlardaki (10-300 mg/L) G flokülantı 300 mg/L dozundaki PAK (F kimyasalı) ile kombine edilmiştir. F+G kombine testinde G flokülantı yavaş karıştırma (flokülasyon) sırasında dozlanmıştır. PAK'ın diğer dekoloranlarla birlikte kullanıldığı kombine doz testlerinde üretici firmanın önerisi doğrultusunda öncelikle F dozlanmış, ardından diğer ilgili kimyasal (C kimyasalı) dozlanmıştır. Test edilen kimyasalların maksimum doz aralıkları belirlenirken, her bir kimyasalın viskozitesi, polimer yoğunluğu ve aktif madde içeriği dikkate alınmıştır.

Analitik Ölçümler: Testler sonunda toplanan numunelerde gerçekleştirilen analizler, kullanılan cihaz isimleri ve ilgili standart metotlar çerçevesinde detaylı olarak uygulanmıştır. Çöktürme işlemi sonrasında elde edilen üst faz, herhangi bir filtrasyon işlemine tabi tutulmadan analiz edilmiştir. Özellikle renk ve bulanıklık parametrelerinin, askıda katı maddelerden etkilenebileceği dikkate alınarak, tüm deneylerde çöktürme süresi (3 saat), hacim ve ortam koşulları sabit tutulmuş ve analizler aynı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, deneyler arası sistematik farklılık oluşmaması sağlanmıştır. İletkenlik ve tuzluluk ölçümleri, WTW Inolab Cond Level 1 iletkenlik ölçer kullanılarak; pH tayini ise WTW 340i model pH metre ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin bulanıklık değerleri, WTW marka Turb 550 model bulanıklık ölçer ile NTU cinsinden ölçülürken, sülfat (SO₄²⁻) analizi Hach DR2500 spektrofotometre ile Standart Metot 4500 SO₄²⁻-E'ye uygun olarak tayin edilmiştir. KOİ analizi, Hach DR5000 spektrofotometresi üzerinde Lange LCK 1014 kiti

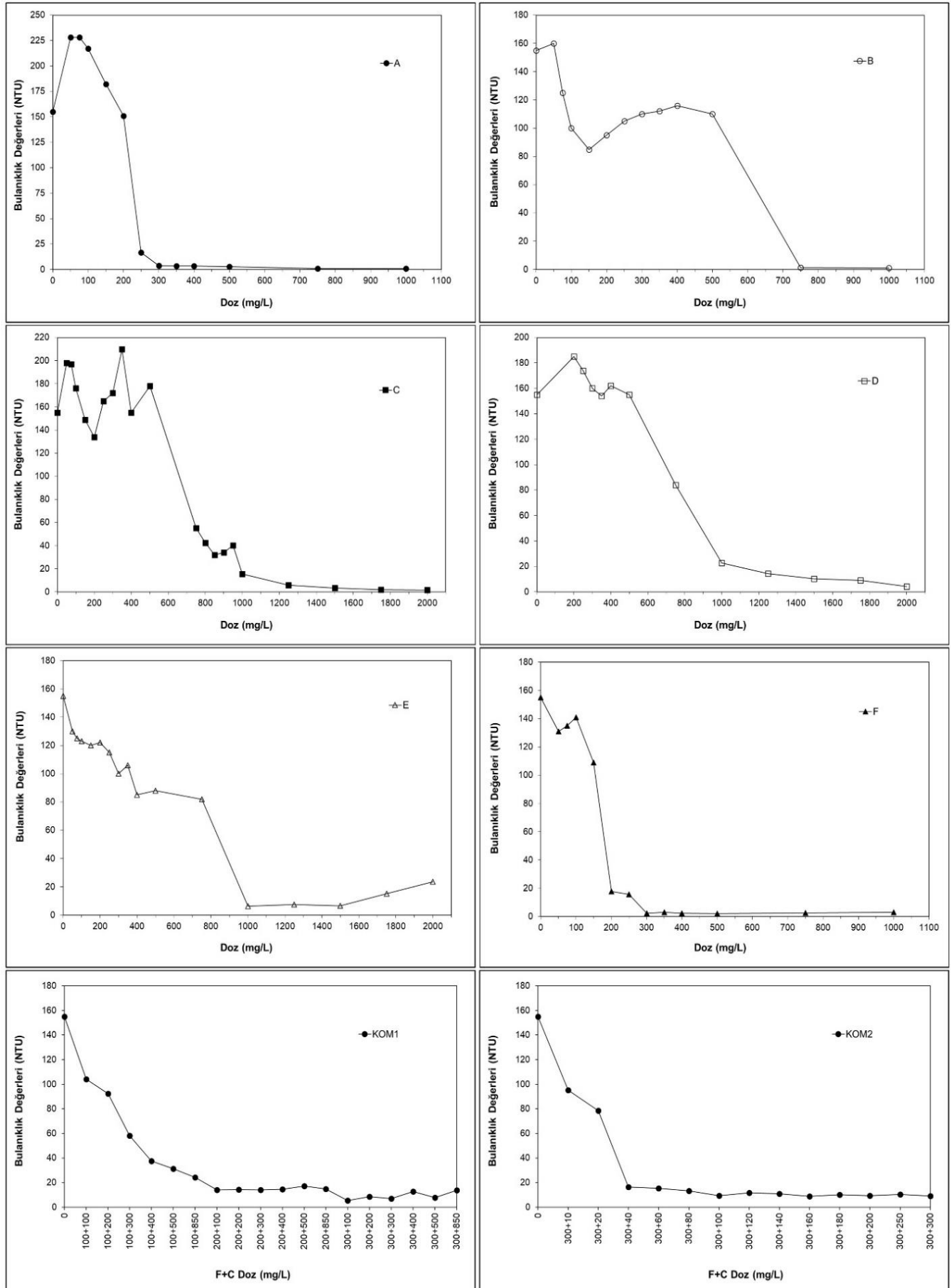
ve metodu kullanılarak, Standart Metot 5220-D'ye eşdeğer şekilde yapılmıştır. Toplam AKM analizi için numune sabit tartıma getirilmiş, 0,45 µm cam elyaf filtre kağıdından süzölmüş, 103 °C'de bir saat süreyle etüvde kurutulup desikatörde oda sıcaklığına soğutulularak tartılmış ve Standart Metot 2540'a göre tayin edilmiştir. Nitrat azotu ($\text{NO}_3\text{-N}$) analizi kadmiyum indirgenme metoduyla, DR2000 Hach spektrofotometrede 500 nm dalga boyunda Hach DR2000 kitleri kullanılarak, Standart Metot 4500 $\text{NO}_3\text{-E}$ 'ye uygun şekilde ölçülürken; nitrit azotu ($\text{NO}_2\text{-N}$) analizi ise diazotizasyon metodu ile, DR2000 cihazda 507 nm dalga boyunda ve Hach DR2000 kitleri yardımıyla, Standart Metot 4500 $\text{NO}_2\text{-B}$ 'ye eşdeğer olarak tayin edilmiştir. Amonyum azotu ($\text{NH}_4\text{-N}$) analizi (LANGE LCK 303) ise amonyum iyonunun sodium nitroprusside'in katalizörlüğünde, pH 12,6'da hipoklorit ve salisilat iyonları ile reaksiyona girerek indofenol mavisinin oluşumuna dayanan prensip çerçevesinde; 0,2 ml numune ilave edildikten sonra tüp kapatılarak karıştırılmış, 15 dakikalık bekleme süresinin ardından Hach DR5000 cihazında 694 nm'de ölçüm yapılmış ve Standart Metot 4500 $\text{NH}_3\text{-F}$ 'ye eşdeğer şekilde uygulanmıştır. Toplam azot (LANGE LCK 338) ve toplam fosfor (LANGE LCK 350) analizleri de sırasıyla Hach DR5000 spektrofotometresi üzerinde ilgili kit ve metotlar kullanılarak tayin edilmiştir. Ayrıca, arıtılabilirlik çalışmaları kapsamında renk analizi için Pt-Co metodu kullanılarak Hach DR5000 spektrofotometrede ölçüm yapılmıştır.

BULGULAR

Toplam beş farklı dekoloran ve bir adet PAK'ın bireysel olarak ve G flokülantı ile kombinasyonunun farklı konsantrasyonlara göre bulanıklık giderimleri Şekil 1'de sunulmuştur. Buna göre artan konsantrasyonun bulanıklık seviyesini azalttığı dikkat çekmektedir. A dekoloranı için en düşük bulanıklık seviyesi 0,94 NTU ile 1000 mg/L dozunda gözlenmiştir. Fakat 250-300 mg/L dozunda bulanıklık seviyesinde ani bir düşüş gerçekleşmiştir. B dekoloranında da en düşük bulanıklık 1000 mg/L dozda gözlenmiş olup, 750 mg/L dozda ise belirgin bir düşüş meydana gelmiştir. C dekoloranında uygulanan doza göre kademeli bir düşüş gözlenmiştir ve en düşük bulanıklık 2000 mg/L'de 1,74 NTU'dur. D dekoloranı içinde benzer bir senaryo dikkat çekmektedir. E dekoloranı için en düşük bulanıklık dozu 6,57 NTU ile 1500 mg/L'dir. 750 mg/L'lik dozdan 1000 mg/L'lik doza geçişle birlikte bulanıklık değerinde kayda değer bir azalma gözlemlenmiştir. PAK için 1000 mg/L'ye kadar farklı dozlar test edilmiştir ve en düşük bulanıklık seviyesi 500 mg/L dozunda 2,15 NTU'dur. Ayrıca, 200 mg/L PAK kullanımı bulanıklığın önemli seviyede azaldığı dozdur. KOM1 için 18 farklı kombinasyon karşılaştırılmıştır. Bunlar arasında en düşük

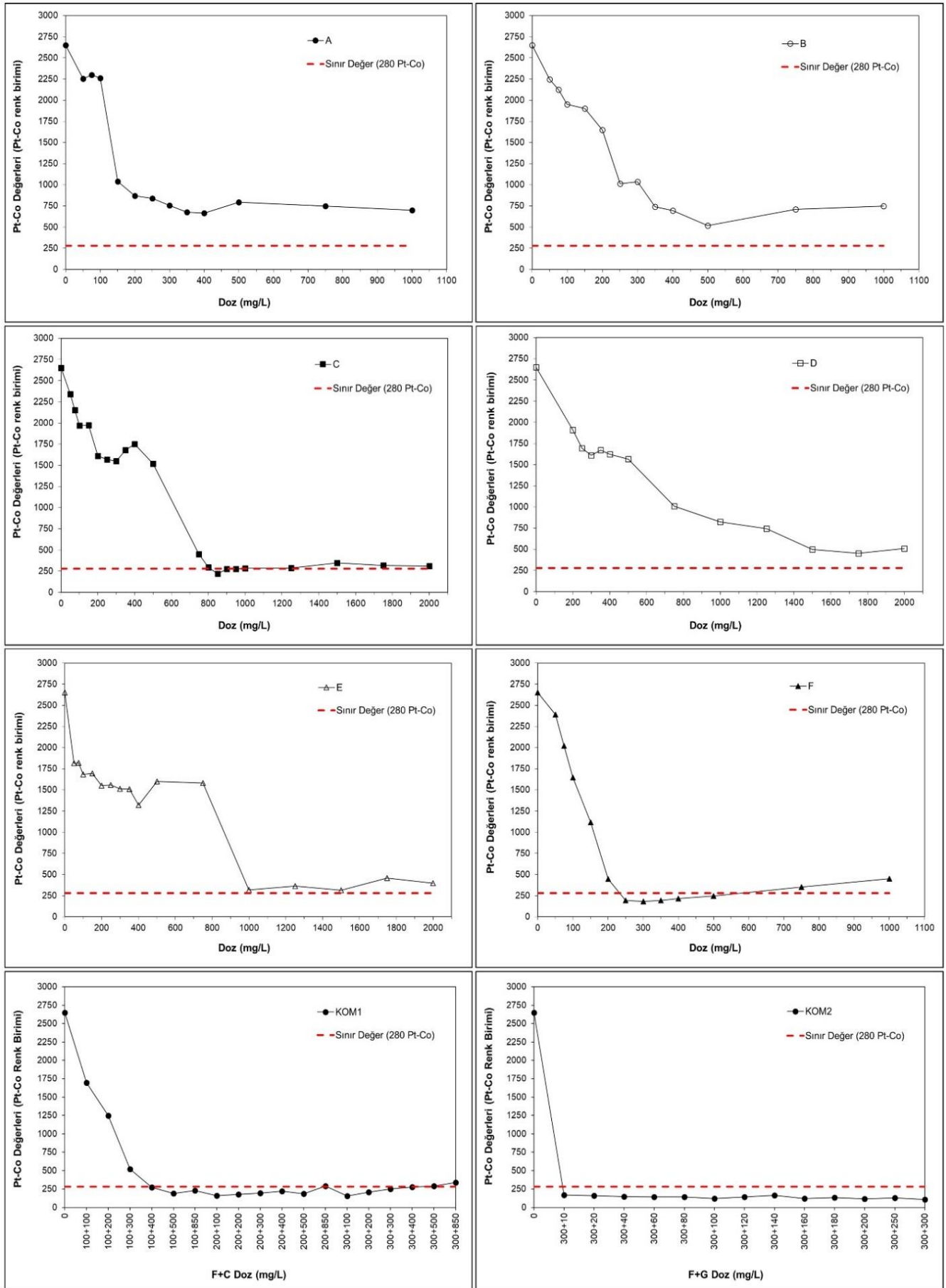
bulanıklık gösteren senaryo 300 mg/L F marka PAK ve 100 mg/L C marka dekoloran kombinasyonudur. Bu kombinasyonun bulanıklık değeri 5,4 NTU'dur. Diğer taraftan KOM2 grubuna ait F marka PAK ve G marka flokülant kombinasyonu için 13 farklı senaryo değerlendirilmiştir. F marka PAK için sabit 300 mg/L ve G flokülantı için 10-300 mg/L arasında toplam 13 farklı doz kombinasyonu denenmiştir. Bu tasarıma göre en iyi bulanıklık giderimi gösteren kombinasyon 300 mg/L F ve 160 mg/L G karışımıdır. Bu kombinasyonun bulanıklık değeri 8,9 NTU'dur.

Çökeltim sonrasında farklı dekoloranlar ve her bir dekolorana ait farklı konsantrasyon gruplarında üst sudan alınan örneklerde Pt-Co metoduna göre yapılan renk ölçümlerinin sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Ölçülen renk değerleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğindeki sınır olan 280 Pt-Co değeri dikkate alınarak değerlendirilmiştir (SKK, 2004). A dekoloranı için en düşük renk değeri (665 Pt-Co), 400 mg/L dozunda ölçülmüştür. Uygulanan 150 mg/L dekoloran dozunda hızlı bir renk giderimi görüldü dahi ölçülen en iyi renk değeri dahi deşarj sınır değerinin 2,37 kat üzerindedir. B dekoloranı da benzer şekilde sınır değerinin üzerinde kalmıştır. En düşük renk değeri 500 mg/L doz için 518 Pt-Co'dur. C dekoloranı 750 mg/L dozu için renk gideriminde önemli bir azalma göstererek 850 mg/L dozda en düşük renk seviyesi olan 220 Pt-Co değerine ulaşmıştır. Bu sonuç, C dekoloranının renk seviyesini sınır değerlerin altına çekebildiğini göstermesi anlamında önemlidir. D dekoloranı, artan konsantrasyonla birlikte kademeli bir renk azalması göstermiş olsa dahi bu değerler hiçbir doz için kabul edilebilir sınır değerinin altına düşmemiştir. E dekoloranı 1000 mg/L dozunda renk seviyesini önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak sınır değerlere yakın sonuçlar elde edilmesine rağmen, tüm değerler sınırın üzerinde kalmıştır (en düşük 317 Pt-Co). F marka PAK ilk 250 mg/L doza kadar hızlı bir renk giderimi göstermiştir. En düşük renk 181 Pt-Co ile 300 mg/L'lik dozdur. Ayrıca renk açısından sınır değerinin altına oldukça etkili bir şekilde etki eden PAK artan dozlara bağlı olarak renk seviyesini tekrar arttırmıştır. F marka PAK ve C marka dekoloranın kombinasyonu renk giderimini arttırmıştır. Renk açısından PAK'ın 100 mg/L kullanımı, C dekoloranının yüksek kullanımıyla telafi edilebilmiştir. Fakat PAK'ın 200 mg/L kullanımı ile düşük C dekoloran kullanımı dahi renk giderimi sağlamıştır. Her ikisininde yüksek konsantrasyonlarda kullanımı ise renk giderimini azaltan bir strateji olarak dikkat çekmektedir. KOM2 için 300 mg/L PAK kullanımına ek olarak G flokülantının en düşük dozu dahi renk giderimini kabul edilebilir seviyelerin altına çekmektedir.

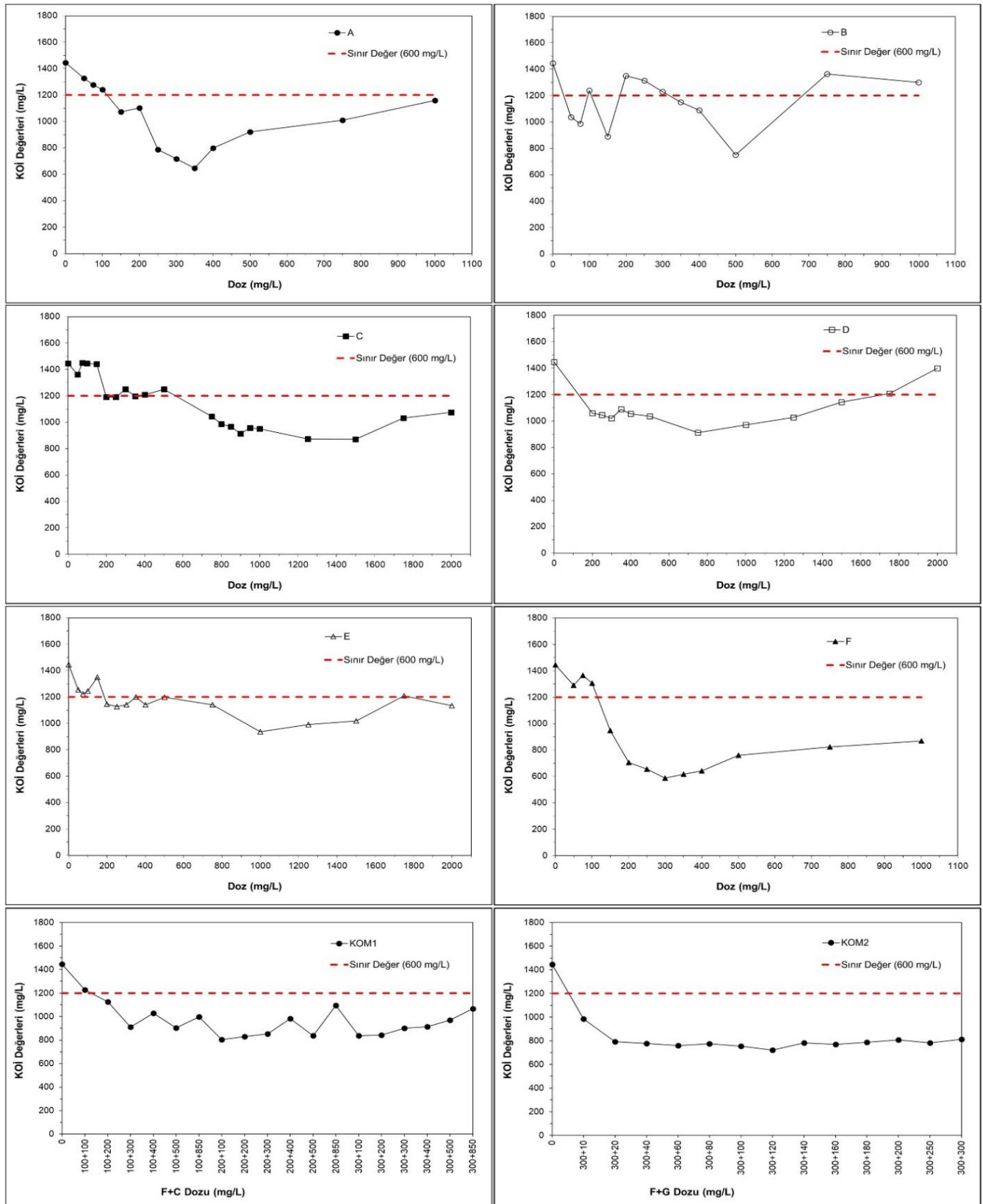


Şekil 1. Uygulanan dekoloran kimyasalları için doza bağlı bulanıklık (NTU) değişimi.

Figure 1. Dose-dependent turbidity (NTU) variation for applied decolorant chemicals.



Şekil 2. Uygulanan dekoloran kimyasallar için doza bağlı renk (Pt-Co) değişimi
 Figure 2. Dose-dependent color (Pt-Co) variation for applied decolorant chemicals



Şekil 3. Uygulanan dekoloran kimyasallar için doza bağlı KOİ (mg/L) değişimi.

Figure 3. Dose-dependent COD (mg/L) variation for applied decolorant chemicals.

Maya endüstrisi atıksu arıtımı için uygulanan farklı stratejilere dair KOİ giderimleri Şekil 3'de sunulmuştur. Artırılabilirlik çalışmalarında elde edilen A dekoloranına (400 mg/L doz için) ait en düşük KOİ değeri

646 mg/L olarak elde edilmiştir. Bu değer ise ilgili bakanlığın Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği gıda sanayii maya üretimi sektörü için belirlenen atıksuların alıcı ortama deşarj sınır değerinin (1200 mg/L) oldukça

altındadır. A dekoloranı için 400 mg/L doz sınır değeri olmakla beraber dozun artması KOİ konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. Bu durumun ilgili dekoloranın yapısal özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir. B dekoloranı için en düşük KOİ değeri 750 mg/L değeri iken bu konsantrasyona düşüren dekoloran dozu 500 mg/L'dir. C dekoloranında ilk 600 mg/L doza kadar KOİ seviyeleri istenen düzeye düşmemiştir ve KOİ'nin 1200 mg/L'nin altına düştüğü ilk doz 800 mg/L ile nispeten diğer dekoloranlara göre daha yüksek sarfiyatı temsil etmektedir. Benzer durum E dekoloranı için de gözlenmiştir. Diğer taraftan, C, D ve D dekoloranları için en düşük KOİ konsantrasyonları 914, 911 ve 936 mg/L ile nispeten yüksek seviyededir. F marka PAK için KOİ giderimi 150 mg/L ile istenen seviyelerin altına inmeye başlamıştır. En düşük KOİ konsantrasyonu 300 mg/L PAK kullanımında 587 mg/L olarak gözlenmiştir. Devamındaki konsantrasyonlarda KOİ seviyeleri tekrar bir artış trendine geçmiştir. PAK ve C dekoloranının birlikte kullanımında, daha yüksek PAK dozları KOİ giderimi açısından daha etkili sonuçlar vermiştir. PAK ve G marka flokülantın eşzamanlı kullanımında KOİ giderimi istenilen seviyelerin altına etkili bir şekilde gelmiştir. Bununla birlikte 20 mg/L flokülant kullanımı KOİ giderimi için yeterli görülmektedir. Daha yüksek dozlarda flokülant kullanımı ekstra bir giderim sağlamamaktadır. Sadece PAK (~600 mg/L) kullanımının KOİ giderimindeki etkisi flokülant (~800 mg/L) ile kullanımına kıyasla daha yüksektir. Bu durum, flokülant kullanımına gerek kalmadan, KOİ gideriminde PAK'ın etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan tüm senaryolar için pH, iletkenlik, KOİ, renk ve bulanıklık açısından optimum dozları belirlenmiştir (Tablo 4). Bu kapsamda, her bir kimyasalın optimum doz uygulaması sonrası elde edilen su kalitesi parametreleri, başlangıçtaki ham su değerleriyle

aynı tablo üzerinde sunularak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, özellikle KOİ, Pt-Co ve bulanıklık parametrelerinde arıtma sonrası su kalitesinde anlamlı bir iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. A dekoloranı için iki farklı optimum doz tercih edilmiştir. Bu dozlar sırasıyla 350 ve 400 mg/L'dir. 350 mg/L en iyi KOİ giderimini sağlarken 400 mg/L'lik dozda en iyi renk giderimi gözlenmiştir. B marka dekoloran için 500 mg/L doz en uygun dozu temsil etmektedir. Çünkü B kimyasalı için belirlenen 500 mg/L doz değeri, KOİ ve renk açısından en uygun ve kabul edilebilir sınırların altındaki sonuçları sağlaması nedeniyle optimum olarak seçilmiştir. C, D ve E için optimum dozlar diğer dekoloranlara göre nispeten daha yüksek olacak şekilde sırasıyla 850, 1750 ve 1000 mg/L'dir. F marka PAK için ise iki farklı doz tercih edilmiştir. Bunlar sırasıyla 250 ve 300 mg/L'dir. 300 mg/L dozu en iyi KOİ, renk ve bulanıklık seviyelerini sağlamıştır. 250 mg/L'de ise bu parametreler daha yüksek olsa dahi kabul edilebilir sınır değerler altındadır ve 300 mg/L'ye göre daha düşük sarfiyat oluşturmaktadır. F marka PAK ve C marka dekoloran kombinasyonları için iki farklı senaryo tercih edilmiştir. Bunlardan ilki 200 mg/L PAK ve 100 mg/L C dekoloranı kullanılmasıdır. Bu daha düşük PAK kullanımı ve daha düşük KOİ sağlamaktadır. Diğer kombinasyon olan 300 mg/L ve 100 mg/L dekoloran ise daha düşük renk ve bulanıklık sağlamaktadır. KOM2 için de benzer şekilde iki farklı kombinasyon önerilmiştir. Bunlardan ilki 300 mg/L PAK'a 100 mg/L G marka flokülant eklenmesidir. Bu kombinasyon daha yüksek KOİ giderimi sağlamıştır. Diğer kombinasyon ise 300 mg/L PAK ve 300 mg/L flokülantın eşzamanlı kullanımınıdır. Bu senaryoda ise renk giderimi daha yüksektir. Tüm deneylerde iletkenlikte gözlenen sınırlı değişimin nedeni, kullanılan kimyasalların düşük iyonik katkıya sahip olması ve uygulama dozlarının atıksu hacmine oranla düşük tutulmasıdır.

Tablo 4. Dekoloran ve kombinasyonları deneylerinin optimum dozlarında elde edilen renk (Pt-Co), KOİ, pH ve bulanıklık değerleri.

Table 4. Color (Pt-Co), COD, pH, and turbidity values obtained at optimal doses of decolorants and their combinations.

Kimyasal	Optimum Doz (mg/L)	pH	İletkenlik (µS/cm)	KOİ (mg/L)	Pt-Co (Pt-Co Renk Birimi)	Bulanıklık (NTU)
Ham Su		7,17	5010	1512	3220	231
A	350	7,12	5110	646	675	3,55
	400	7,11	5125	798	665	3,55
B	500	7,36	5080	750	518	110,00
C	850	5,88	5500	966	220	32,00
D	1750	7,14	5420	1208	452	8,94
E	1000	7,07	5040	936	320	6,37
F	250	5,00	5610	656	193	15,60
	300	4,82	5830	587	181	2,32
KOM1	200+100	5,33	5550	805	160	13,9
	300+100	4,75	5910	838	154	5,40
KOM2	300+100	4,80	5870	753	122	9,20
	300+300	4,78	5750	812	107	8,97

TARTIŞMA

Mevcut çalışmada beş farklı dekoloran ile bir adet PAK kullanımının ve PAK'ın hem en ideal dekoloran hem de ticari bir flokülantla kullanımının maya endüstrisi atıksu arıtımındaki potansiyeli değerlendirilmiştir. Maya üretim süreçleri, yüksek organik yük ve renk içeriğine sahip atıksuların oluşmasına neden olur. Bu atıksular, yüksek

KOİ, AKM ve renk verici bileşikler içerir (Öztürk vd., 2019). Bu nedenle, bu tür atıksuların arıtımı, çevresel yönetmeliklere uyum ve su kaynaklarının korunması için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, PAK (F kimyasalı) kullanımının diğer dekoloranlara kıyasla üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu kimyasalın, C kimyasalı ve bir flokülant ile

kombinasyonunun renk ve KOİ gideriminde hızlı ve etkili sonuçlar sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, literatürde mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında, çalışmanın sektörde uygulanabilir ve optimize edilmiş bir arıtma yöntemi sunduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, koagülasyon-temelli yöntemlerin maya endüstrisi atıksularının arıtımında yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Zhou vd. (2008) alüminyum sülfat ile maya atıksularının renk ve KOİ giderimini incelediği çalışmasında, optimal pH ve koagülant dozu ile %72 KOİ ve %90 renk giderimi elde etmiştir. Benzer şekilde, Koby ve Delipinar (2008) elektrokoagülasyon yöntemiyle maya atıksularını arıtmış ve optimal şartlarda %71 KOİ giderimi sağlandığını ifade etmiştir. Ancak, bu çalışmalar, yalnızca tek bir koagülant veya yöntem kullanımını ele almış, farklı dekoloran ve flokülant kombinasyonlarını kapsamamıştır.

Maya endüstrisi atıksularının arıtımına yönelik son çalışmalar, kimyasal ve elektrokoagülasyon gibi ileri arıtma teknolojilerinin verimliliğini değerlendirmiştir. Örneğin, Alavijeh vd. (2022), elektrokoagülasyon ile kimyasal koagülasyonun entegre kullanımını değerlendirerek, KOİ gideriminde %11,2 ile %16,1 oranında artış sağlandığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, Dereli vd. (2017), maya endüstrisi atıksularının evaporasyon prosesi ile arıtımını inceleyerek, KOİ ve toplam Kjeldahl azotu gideriminde sırasıyla %53 ve %66 oranında iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, farklı kimyasal ve fiziksel yöntemlerin kombinasyonlarının arıtma verimini artırabileceğini göstermektedir.

Atıksu arıtımında renk ve organik madde giderimi için koagülasyon-flokülasyon süreçleri yaygın olarak kullanılır. Bu süreçlerde, dekoloranlar (renk gidericiler) ve flokülantlar, partikül ve çözünmüş organik maddelerin agregasyonunu teşvik ederek çökelmelerini sağlar. Polialüminyum Klorür (PAK), yüksek koagülasyon verimliliği ve geniş pH aralığında etkili olması nedeniyle atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan bir koagülanttır. PAK'ın, geleneksel alüminyum ve demir tuzlarına göre daha düşük çamur üretimi ve daha iyi renk giderimi sağladığı bildirilmiştir (Koyuncu vd., 2012). Bu çalışmanın sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, PAK (F kimyasalı) kullanımının tek başına bile çok iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu kimyasalın bir başka dekoloran (C kimyasalı) veya bir flokülant ile kombinasyonu, giderim verimini etkin bir şekilde arttırmıştır. Bu bulgu, Gengec vd. (2012) tarafından yürütülen ve maya endüstrisi atıksularının membran filtrasyon teknikleriyle arıtılmasını inceleyen çalışma ile de desteklenmektedir. Söz konusu çalışma, koagülasyon ve elektrokoagülasyon proseslerinin kombinasyonunun KOİ gideriminde belirgin bir iyileşme

sağladığını göstermiştir. Benzer şekilde, Jiang vd. (2017), maya endüstrisi atıksularında melanoidin giderimi üzerine yaptıkları çalışmada, kimyasal koagülantlar ile elektrokoagülasyonun birlikte kullanımının renk ve KOİ giderimi açısından önemli ölçüde daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, çalışmamızın sunduğu yeni bulgular, koagülantların uygun kombinasyonlarının sinerjistik bir etki yaratarak maya endüstrisi atıksularının arıtımında önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Kimyasal arıtım proseslerinde önemli miktarda çamur oluşumu kaçınılmazdır. Bu çalışmada kullanılan koagülant ve dekoloranlar sonucu oluşan çamur, renkli organik maddeler ve askıda katı maddeleri içermektedir. Oluşan çamur, içeriği bakımından organik madde yönünden zengin, ancak düşük toksisite düzeyine sahip olarak değerlendirilmiştir. Benzer nitelikteki endüstriyel çamurlar için en yaygın bertaraf yöntemleri arasında mekanik susuzlaştırma sonrası düzenli depolama, çimento fırınlarında alternatif yakıt olarak kullanma ve stabilize edilerek yapı malzemesi üretiminde değerlendirme gibi seçenekler yer almaktadır (Zhou et al., 2008; Gengec et al., 2012). Ayrıca, biyolojik olarak kararlılığı yüksek olan bu tür çamurların tarımsal topraklara uygulanmadan önce ileri düzey stabilizasyon süreçlerinden geçirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Bu çalışmanın literatüre en önemli katkılarında biri de, farklı dekoloran ve flokülant kombinasyonlarının maya endüstrisi atıksularının renk ve KOİ giderimi üzerine etkisini kapsamlı bir şekilde belirleyerek, endüstriyel uygulanabilirliği yüksek bir sistem sunmasıdır. Özellikle, F kimyasalının tek başına etkinliğinin yüksek olması, ancak C kimyasalı ve bir flokülant ile kombine edildiğinde bu etkinliğin daha da artırılması, yeni nesil arıtma sistemlerinin kurgusunda önemli bir yol gösterici olmaktadır. Bununla birlikte, PAK kullanımı sırasında pH'da belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Özellikle F, KOM1 ve KOM2 senaryolarında pH'nın 5 civarına kadar düştüğü deneysel verilerle desteklenmektedir. Bu durum, PAK'ın hidrolizi sonucu açığa çıkan H⁺ iyonlarının sistemdeki alkaliniteyi azaltmasıyla açıklanabilir. Al(OH)₃ çökeleğinin optimum oluşum pH aralığı olan 6–7'nin altında çalışması koagülasyon verimliliğini sınırlayabilmektedir. Yine de, bu deneylerde elde edilen renk ve KOİ giderimi sonuçları dikkate alındığında, düşük pH koşullarına rağmen tatmin edici bir arıtım performansı gözlenmiştir. Ancak bu durumun olası etkilerini sınırlandırmak amacıyla, ilerleyen çalışmalarda alkalinite ilavesiyle sistem pH'nın tamponlanması önerilmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, farklı türlerdeki kimyasalların kullanıldığı kombinasyonlara daha fazla odaklanılmalıdır. Maya endüstrisi özelinde ise, atıksuların arıtımında daha verimli ve maliyet etkin yöntemlerin

geliştirilmesine yönelik optimizasyon çalışmaları da yapılmalıdır. Ayrıca, bu yöntemlerin büyük ölçekli endüstriyel tesislerde uygulanabilirliği ve ekonomik sürdürülebilirliği üzerine daha fazla araştırma yürütülmelidir.

SONUÇLAR

Sonuç olarak, bu çalışma PAK (F kimyasalı) kullanımının maya endüstrisi atıksularının arıtımında tek başına dahi oldukça etkili olduğunu, ancak en iyi performans gösteren dekoloran (C kimyasalı) ve bir flokülant (G kimyasalı) ile birlikte kullanıldığında giderim verimliliğinin daha da arttığını ortaya koymuştur. Özellikle F+C kombinasyonunda renk giderimi %95'e, KOİ giderimi %61'e kadar ulaşmış; F+G kombinasyonunda ise renk giderimi %96, KOİ giderimi %55 seviyelerine erişmiştir. Tek başına PAK uygulamasında bile Pt-Co değeri 3220'den 181'e, KOİ konsantrasyonu ise 1512 mg/L'den 587 mg/L'ye düşürülerek çevresel deşarj limitlerinin altına inilmiştir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumlu olup sektörde uygulanabilir, ekonomik ve optimize edilmiş bir kimyasal arıtma yaklaşımı sunduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, ortaya çıkan kimyasal çamurun çevresel açıdan uygun şekilde bertaraf edilmesi de büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, önerilen arıtım stratejilerinin uygulanmasında çamur yönetimi süreçlerinin dikkate alınması önerilmektedir. Ayrıca, kimyasal arıtım proseslerinin biyolojik arıtma öncesi değil de sonrası aşamada, ileri arıtım adımı olarak uygulanması; özellikle renk gideriminin artırılması ve atıksuyun yeniden kullanım potansiyelinin yükseltilmesi açısından alternatif bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşım, kimyasal madde kullanımını azaltarak daha ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir çözümler sunabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesine maddi katkı sunan Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

Mali Destek: Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (3720-M1-13) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması: Yazarların açıklayacakları herhangi bir mali veya mali olmayan çıkarları yoktur.

Yazar Katkısı: Bilgehan İlker Harman: Orijinal metin yazarlığı, laboratuvar çalışmaları; Mert Minaz: Orijinal metin yazarlığı, görselleştirme; Hasan Köseoğlu: Metin düzenleme, laboratuvar çalışmaları; Nevzat Özgü Yiğit: Görselleştirme, kaynak temini, metin düzenleme; Mehmet Kitiş: Metin düzenleme, danışmanlık.

Etik Beyan: Yazar, bu tür çalışmalar için etik kurul onayının gerekli olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akhlaghi, N., Najafpour-Darzi, G., & Vaziri, A. (2024). Removal of melanoidin from baker yeast plant wastewater: A comparative study on chemical and biological processes. *Journal of Water Process Engineering*, **61**, 105301.
- Alavijeh, H.N., Sadeghi, M., Kashani, M.R.K., & Moheb, A. (2022). Efficient chemical coagulation-electrocoagulation-membrane filtration integrated systems for Baker's yeast wastewater treatment: experimental and economic evaluation. *Cleaner Chemical Engineering*, **3**, 100032.
- Amuda, O.S., & Amoo, I.A. (2007). Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, **141**(3), 778-783.
- Bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research*, **41**(11), 2301-2324.
- Banat, I.M., Nigam, P., Singh, D., & Marchant, R. (1996). Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: a review. *Process Biochemistry*, **31**(7), 689-697.
- Blonskaja, V., & Zub, S. (2009). Possible ways for post-treatment of biologically treated wastewater from yeast factory. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, **17**(4), 189-197.
- Dereli, R. K., Özgün, H., Erşahin, M. E., Koyuncu, İ., Altınbaş, M., & Öztürk, İ. (2017). Evaporasyon prosesinin maya endüstrisi atıksu karakterizasyonu ve arıtılabilirliğine etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **19**(56), 389-400.
- Faria-Oliveira, F., Puga, S., & Ferreira, C. (2013). *Yeast: world's finest chef*. In *Food Industry*. IntechOpen.
- Gengec, E., Koby, M., Demirbas, E., Akyol, A., & Oktor, K. (2012). Optimization of baker's yeast wastewater using response surface methodology by electrocoagulation. *Desalination*, **286**, 200-209.
- Gladchenko, M., Starostina, E., Shcherbakov, S., Versprille, B., & Kalyuzhnyi, S. (2004). Combined biological and physico-chemical treatment of baker's yeast wastewater including removal of coloured and recalcitrant to biodegradation pollutants. *Water Science and Technology*, **50**(5), 67-72.
- Jiang, Y., Zhang, Y., Banks, C., Heaven, S., & Longhurst, P. (2017). Investigation of the impact of trace elements on anaerobic volatile fatty acid degradation using a fractional factorial experimental design. *Water Research*, **125**, 458-465.

- Karlović, A., Jurić, A., Ćorić, N., Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2020).** By-products in the malting and brewing industries-re-use possibilities. *Fermentation*, 6(3), 82.
- Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Aydın, A.F., Alp, K., Arıkan, O.A., İnsel, H.G., ..., & Oğuz, T.C. (2012).** Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi. *Atıksu Arıtma Tesislerinin*.
- Kobya, M., & Delipinar, S. (2008).** Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 1133-1140.
- Khristoskova, S. (1984).** Possibility of purification and decoloring wastewater from the yeast industry by electrocoagulation. *Nauchni Tr-Plovdivski Univ.(Bulg.)*, 22, 177-185.
- Kurade, M.B., Waghmode, T.R., Xiong, J.Q., Govindwar, S.P., & Jeon, B.H. (2019).** Decolorization of textile industry effluent using immobilized consortium cells in upflow fixed bed reactor. *Journal of Cleaner Production*, 213, 884-891.
- Li, Y., Zhang, Y., & Chen, Y. (2016).** Performance evaluation of an anaerobic membrane bioreactor for brewery wastewater treatment. *Water Research*, 98, 285-295.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014).** *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Mussatto, S.I. (2014).** Brewer's spent grain: a review with an emphasis on food and industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275.
- Mutlu, S.H., Yetis, U., Gurkan, T., & Yilmaz, L. (2002).** Decolorization of wastewater of a baker's yeast plant by membrane processes. *Water research*, 36(3), 609-616.
- Öztürk, D., Aladağ, E., Yılmaz, A. E., Boncukcuoğlu, R., & Bayram, T. (2019).** Mezbaha Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtılabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(2), 738-748.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001).** Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255.
- S.K.K. (2004).** Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. *Resmi Gazete Sayısı*, 25687.
- Zhang, Z., Jing, R., He, S., Qian, J., Zhang, K., Ma, G., ..., & Li, Y. (2018).** Coagulation of low temperature and low turbidity water: Adjusting basicity of polyaluminum chloride (PAC) and using chitosan as coagulant aid. *Separation and Purification Technology*, 206, 131-139.
- Zhou, Y., Liang, Z., & Wang, Y. (2008).** Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate. *Desalination*, 225(1-3), 301-311.