

Hybrid wastewater treatment systems for car washes using electrocoagulation, filtration, and water recovery

Systemy hybrydowego oczyszczania ścieków z myjni samochodowych z wykorzystaniem elektrokoagulacji, filtracji i odzysku wody



DOI: 10.15199/62.2025.10.11

Zaprojektowano i oceniono skuteczność zintegrowanego systemu oczyszczania ścieków z myjni samochodowych, opartego na elektrokoagulacji (EC), sedymentacji i filtracji. Zbadano wydajność EC w zmiennych warunkach operacyjnych, aby ustalić optymalne parametry w celu uzyskania wysokiej efektywności oczyszczania ścieków i umożliwienia ponownego wykorzystania wody. Wykazano, że elektrody żelazne były bardziej skuteczne niż elektrody aluminiowe. W optymalnych warunkach (25 min, 8 A, 16 mA/cm²) system z anodą żelazną osiągnął 96,67% redukcji barwy oraz 74,56% ChZT. Filtracja dodatkowo poprawiła jakość wody, obniżając wskaźnik barwy do 1,068 mg Pt-Co/L (95,8% usunięcia). Zastosowanie tego zintegrowanego systemu przynosi znaczące korzyści środowiskowe i ekonomiczne, w tym zmniejszenie zużycia świeżej wody. Badania potwierdzają techniczną wykonalność i opłacalność systemów EC opartych na elektrodach żelaznych do oczyszczania i ponownego wykorzystania ścieków z myjni samochodowych.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, myjnie samochodowe, elektrokoagulacja, filtrowanie wody, odzysk wody

Car wash wastewater (CWW) was treated using an integrated treatment system based on electrocoagulation (EC), sedimentation, and filtration. EC performance was studied under various operating conditions, and optimal parameters for high treatment efficiency and water reuse were detd. Expts. showed that Fe electrodes outperformed Al electrodes. Under optimal conditions (25 min, 8 A, 16 mA/cm²), the Fe anode system achieved a 96.67% color redn. and a 74.56% redn. in chem. oxygen demand (COD). Filtration further improved water quality, reducing the color concn. to 1.068 mg Pt-Co/L (98.6% removal). Implementation of this integrated system provides significant environmental and economic benefits, including reduced freshwater consumption. This research confirms the technical feasibility and cost-effectiveness of Fe electrode-based EC systems for the treatment and reuse of CWW.

Keywords: water reservoir restoration, microbiological biotechnology, urban water bodies, environmental management



Prof. Eng. Krzysztof CHMIELOWSKI, DSc, PhD (ORCID: 0000-0001-9758-0854) he graduated in 2002 from the Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying at the University of Agriculture in Krakow (formerly the Agricultural University of Krakow). In 2007, he obtained a PhD in agricultural sciences in the discipline of environmental protection and shaping. In 2013, he earned a postdoctoral degree (habilitation) in agricultural sciences in the same discipline, specializing in water and wastewater management, and in 2020 he was awarded the title of Professor of Engineering and Technical Sciences at the same faculty. Specialty – environmental protection and shaping.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof CHMIELOWSKI w roku 2002 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Środowiska i Geodezji Akademii Rolniczej w Krakowie (obecnie Uniwersytet Rolniczy w Krakowie). W 2007 r. uzyskał stopień doktora nauk rolniczych w dyscyplinie ochrona i kształtowanie środowiska, w 2013 r. stopień doktora habilitowanego nauk rolniczych w dyscyplinie ochrona i kształtowanie środowiska w specjalności gospodarka wodno-ściekowa, a w 2020 r. tytuł profesora nauk inżynieryjno-technicznych na tym samym wydziale. Specjalność – ochrona i kształtowanie środowiska.



Dr. Robert MAZUR (ORCID: 0000-0001-7869-1823) is an assistant professor at the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering at AGH University of Science and Technology in Krakow. His research interests include transformations of organic pollutants in aquatic environments, including municipal and industrial wastewater.

Dr Robert MAZUR (ORCID: 0000-0001-7869-1823) jest adiunktem na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jego zainteresowania badawcze obejmują przemiany zanieczyszczeń organicznych w środowiskach wodnych oraz w ściekach komunalnych i przemysłowych.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-52-14, e-mail: mazur@agh.edu.pl

Ścieki z myjni samochodowej to złożona mieszanina zanieczyszczeń zawierająca zawiesiny, środki powierzchniowo czynne, oleje, smary, detergenty oraz śladowe ilości metali. W zależności od techniki mycia i praktyk recyklingu, stężenie zawiesin ogólnych (TSS) może przekraczać 6,4 g/L i rozpuszczonych substancji stałych (TDS) 5,9 g/L. Mętność tego rodzaju ścieków może uzyskać średnią wartość do 750 NTU, a chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) 1,0 g/L. Ponieważ ścieki te w dużym stopniu nie ulegają biodegradacji, aby spełnić europejskie normy (ChZT ≤ 50 mg/L; zużycie wody 60–70 L na samochód), wymagane jest zaawansowane oczyszczanie, co sprawia, że recykling na miejscu jest niezbędny^{1–3}.

Pośród metod oczyszczania, elektrokoagulacja (EC) jest szczególnie atrakcyjna, ponieważ łączy koagulację i flotację w jednym reaktorze, generuje koagulanty *in situ* i pozwala uniknąć dodawania chemikaliów. Badania różnych autorów wykazały, że przy zastosowaniu elektrod żelaznych (Fe) lub aluminiowych (Al) uzyskiwano usuwanie mętności powyżej 90% oraz redukcję ChZT o ponad 50%^{4–6}. Nowsze prace wskazują natomiast na rozwój hybrydowych procesów elektrokoagulacji, łączonych z utlenianiem chemicznym, promieniowaniem UV lub reakcjami Fentona, w celu zwiększenia skuteczności degradacji zanieczyszczeń^{4, 5}. El-Ashtoukhy⁶ oczyścił rzeczywiste ścieki (o parametrach ChZT: 282–566 mg/L, mętność: 90–386 NTU, pH ok. 7,2, przewodność ok. 1 mS/cm) z wykorzystaniem spiralnej anody aluminiowej. Przy pH 7–8 i dodatku 2 g/L NaCl osiągnął zmniejszenie ChZT na poziomie ok. 80% oraz usunięcie mętności przekraczające 95%, przy zapotrzebowaniu na energię wynoszącym 2,32–15,1 kWh/kg usuniętego ChZT. Mohammadi⁷ potwierdził, że elektroda aluminiowa charakteryzuje się większą skutecznością w usuwaniu mętności (> 99% przy 30 V, pH 7), natomiast elektroda żelazna była bardziej efektywna w redukcji ChZT (do 94% przy 30 V, pH ok. 3). Makwana i Ahammed⁸ połączyli EC z UV, osiągając w ciągu 15 min usunięcie mętności, zawiesin ogólnych i barwy na poziomie 98,9–99,3%, chociaż redukcja C_{tot} była ograniczona (27%). Hoseinzadeh i współpr.⁹ porównali elektrody Al, GI i SS 304. Elektroda Al osiągnęła najlepsze usunięcie ChZT/mętności, a SS 304 najlepsze zmniejszenie ilości fosforanów, przy zużyciu energii 0,23–0,28 kWh/m³ i wydajności prądowej do 13%.

Chociaż EC efektywnie usuwa mętność i barwę oraz umiarkowanie redukuje ChZT, technologia ta wciąż stoi przed kilkoma wyzwaniami. Brakuje wystarczających danych dotyczących krótkich cykli (< 25 min), co jest

Car wash wastewater is a complex effluent containing suspended solids, surfactants, oils, greases, detergents, and trace amounts of metals. Depending on the washing technique and recycling practices, concentrations of total suspended solids (TSS) can exceed 6.4 g/L, total dissolved solids (TDS) 5.9 g/L, turbidity 750 NTU, and chemical oxygen demand (COD) 1.0 g/L. Since this wastewater is largely non-biodegradable, advanced treatment is required to meet European standards (COD ≤ 50 mg/L; water consumption 60–70 L per car), making on-site recycling essential^{1–3}.

*Among the available treatment options, electrocoagulation (EC) is particularly attractive because it combines coagulation and flotation in a single reactor, generates coagulants *in situ*, and avoids the need for chemical addition. Early studies showed >90% turbidity removal and >50% COD removal using either iron (Fe) or aluminum (Al) electrodes^{4–6}. More recent work has explored hybrid EC processes with oxidation, UV, or Fenton processes to enhance degradation^{4, 5}. El-Ashtoukhy⁶ treated real wastewater (COD 282–566 mg/L, turbidity 90–386 NTU, pH ≈ 7.2 , conductivity ≈ 1 mS/cm) using a spiral Al anode. At pH 7–8 and 2 g/L NaCl, COD and turbidity removal reached $\sim 80\%$ and $>95\%$, resp., with an energy consumption of 2.32–15.1 kWh/kg of removed COD. Mohammadi⁷ confirmed that the Al electrode is more efficient at removing turbidity (>99% at 30 V, pH 7), while Fe was better for COD removal (up to 94% at 30 V, pH ≈ 3). Makwana and Ahammed⁸ combined EC with UV, achieving 98.9–99.3% removal of turbidity, total suspended solids (TSS), and color within 15 min, although total carbon (C_{tot}) reduction was limited (27%). Hoseinzadeh et al.⁹ compared Al, GI, and SS 304 electrodes. The Al electrode achieved the best COD/turbidity removal, and SS 304 provided the best phosphate reduction, with energy consumption of 0.23–0.28 kWh/m³ and a current efficiency of up to 13%.*

While EC effectively removes turbidity and color and moderately reduces COD, the technology still faces several challenges. There is a lack of sufficient data for short cycles (<25 min), which is crucial for on-site applications. Additionally, comparative studies of electrode materials are incomplete, and energy consumption shows significant variability, ranging 0.23–15.1 kWh/kg of removed COD. The study addressed these issues by testing EC as the primary method in a hybrid system with Fe and Al electrodes at 4–16 mA/cm² for up to 25 min, focusing on performance, energy consumption, and electrode wear to establish sustainable conditions for car wash wastewater reuse.



Dr. Eng. Agata MAZUR graduated doctoral studies at AGH University of Krakow, Faculty of Geo-Data Science, Geodesy, and Environmental Engineering, Department of Environmental Management and Protection. Her research interests include transformations of organic pollutants in aquatic environments, including municipal and industrial wastewater.

Dr inż. Agata MAZUR ukończyła studia doktoranckie w Katedrze Kształtowania i Ochrony Środowiska na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Jej zainteresowania badawcze obejmują przemiany zanieczyszczeń organicznych w środowiskach wodnych, w tym w ściekach komunalnych i przemysłowych.



Farkhod MURTAZAEV (ORCID: 0009-0006-0492-5918) he is PhD student at Samarkand State Architecture and Construction University, Uzbekistan. His research focuses on the application of electrocoagulation as the main method for car wash wastewater treatment in a hybrid system for reuse.

Farkhod MURTAZAEV (ORCID: 0009-0006-0492-5918) jest doktorantem na Samarkandzkim Państwowym Uniwersytecie Architektury i Budownictwa w Uzbekistanie. Jego badania koncentrują się na zastosowaniu elektrokoagulacji jako głównej metody oczyszczania ścieków z myjni samochodowych w systemie hybrydowym do ponownego wykorzystania.

Table. Qualitative characteristics of car wash wastewater

Tabela. Charakterystyka jakościowa ścieków surowych z myjni samochodowej

EC*, mS/cm	TDS, ppm	pH	Salinity/ Zasolenie, %	Temperature/ Temperatura, °C	DS, g/120 mL	Color/ Barwa, Pt-Co	ChZT, mg/L	BZT ₅ , mg/L
2210	1100	7.15	11	16.4	1.331	80.1	274	78.52

kluczowe dla zastosowań na miejscu. Ponadto, badania porównawcze materiałów elektrod są niekompletne, a zużycie energii wykazuje dużą zmienność, wahając się w granicach 0,23–15,1 kWh na każdy kilogram usuniętego ChZT. Niniejsze badania odnoszą się do tych kwestii, testując EC jako główną metodę w systemie hybrydowym z elektrodami Fe i Al przy 4–16 mA/cm² przez okres do 25 min, skupiając się na wydajności, zapotrzebowaniu na energię i zużyciu elektrod, aby ustalić zrównoważone warunki dla ponownego wykorzystania ścieków z myjni samochodowej.

Część doświadczalna

Materiały

Próbka rzeczywistych ścieków z myjni samochodowej CWW (*car wash wastewater*) o objętości 200 L została pobrana z myjni w Krakowie. Charakterystykę jakościową ścieków przedstawiono w tabeli. Ścieki, pochodzące ze zbiornika sedymentacyjnego, umieszczono w szczelnych pojemnikach i przetransportowano do laboratorium. Przed analizą próbkę ujednolicono poprzez delikatne mieszanie.

Metodyka badań

Do procesu EC wykorzystano laboratoryjny zasilacz prądu stałego (W.E.P 3010D-III); napięcie i natężenie prądu były stale monitorowane. ChZT oznaczono za pomocą spektrofotometrii UV-Vis, biologiczne zapotrzebowanie na tlen po 5 dniach (BZT₅) mierzono za pomocą systemu respirometrycznego OxiTop. Barwę analizowano fotometrem LF 300 przy 470 nm, a wyniki przeliczono na jednostki Pt-Co. Parametry fizykochemiczne (EC* – *electrical conductivity*, TDS – *total dissolved solids*, pH, zasolenie, temperatura) mierzono analizatorami Hach Lange HQ 2100 i Elmetron. Do ciągłego mieszania służyło mieszadło magnetyczne (Steinberg Systems SBS-MR-1600/6); precyzyjne pomiary masy osadów prowadzono za pomocą wagi analitycznej.

Doświadczenia z EC przeprowadzono w reaktorze z przezroczystego pleksiglasu, o pojemności roboczej 2 L, wyposażonym w 6 metalowych elektrod ułożonych naprzemiennie (Fe-Al-Fe-Al-Fe-Al). Odległość między płytami wynosiła 20 mm, a całkowita powierzchnia aktywna 500 cm². Wybrano tę konfigurację, aby obserwować tworzenie się warstwy pasywnej na elektrodach. Materiały elektrodowe to żelazo w postaci stopu ST3S i glin w postaci stopu 1050A H14 (aluminium), o wymiarach 100×100×5 mm.

Reaktor miał wymiary 30×12,4×13 cm. Dodatkowa komora do zbierania piany została zintegrowana obok głównego reaktora i połączona przelewowo. Wylot drenażowy umożliwiał

Experimental

Materials

A 200 L sample of real car wash wastewater (CWW) was collected from a car wash in Krakow. The wastewater, taken from a sedimentation tank, was placed in sealed containers and transported to the laboratory. Before analysis, the sample was homogenized by gentle stirring. The wastewater was characterized by the parameters given in Table.

Methodology

A laboratory DC power supply (W.E.P 3010D-III) was used for the EC process, with voltage and current intensity constantly monitored. COD was determined by UV-Vis spectrophotometry, while BOD₅ was measured using an OxiTop respirometric system. Color was analyzed with an LF 300 photometer at 470 nm, and the results were converted to Pt-Co units. Physicochemical parameters (EC*, TDS, pH, salinity, temperature) were measured with Hach Lange HQ 2100 and Elmetron analyzers. A magnetic stirrer (Steinberg SBS-MR-1600/6) ensured continuous mixing, and an analytical balance was used for precise measurements of sludge mass.

The electrocoagulation experiments were conducted in a plexiglass reactor with a working volume of 2 L, equipped with 6 alternating metal electrodes (Fe-Al-Fe-Al-Fe-Al). The distance between the plates was 20 mm, and the total active surface area was 500 cm². This configuration was chosen to observe the formation of a passive layer on the electrodes. The electrode materials were iron (Fe) ST3S and aluminum (Al) 1050A H14, with dimensions of 100×100×5 mm.

The reactor, made of transparent plexiglass, had dimensions of 30×12,4×13 cm. An additional chamber for foam collection was integrated next to the main reactor and connected via an overflow. A drainage outlet allowed for sampling during the experiments. The volumes withdrawn were replenished with raw wastewater to maintain a constant working volume. Mixing was provided by a magnetic stirrer (Steinberg Systems SBS-MR-1600/6) operating at 400 rpm. A general schematic of the setup is shown in Fig. 1.

The primary objective of this study was to investigate the short-duration performance (up to 25 min.) of the EC process for treating real car wash wastewater. Particular attention was paid to evaluating the impact of current density, electrode material (Fe and Al), and electrolysis time on the effectiveness of contaminant removal. Experiments were carried out at 4 current intensities: 2, 4, 6, and 8 A, corresponding to current densities of 4, 8, 12, and 16 mA/cm². Treatment durations were varied from 5–25 min to reflect real-

pobieranie próbek w trakcie eksperymentów. Pobrane objętości były uzupełniane surowymi ściekami w celu utrzymania stałej objętości roboczej. Mieszadło magnetyczne pracowało z prędkością 400 rpm. Ogólny schemat układu przedstawiono na rys. 1.

Oceniano wydajność elektrokoagulacji w oczyszczaniu CWW w krótkich cyklach do 25 min. Skupiono się na wpływie gęstości prądu, materiału elektrod (Fe i Al) i czasu elektrolizy na efektywność usuwania zanieczyszczeń. Doświadczenia przeprowadzono przy czterech wartościach natężenia prądu, co odpowiadało gęstościom prądu 4, 8, 12 i 16 mA/cm². Czasy oczyszczania zmieniano w zakresie 5–25 min, aby symulować realistyczne warunki pracy. Do analizy zużycia energii na bieżąco rejestrowano napięcie i moc. Po każdym interwale oczyszczania pobierano 150 mL próbki, którą poddawano 30-minutowej sedymentacji i filtracji. Masę suchej pozostałości stałej określano gravimetrycznie, a ubytek masy elektrod obliczano z prawa Faradaya, wg wzoru (1):

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M \cdot \eta}{n \cdot F} \quad (1)$$

przyjmując wydajność prądową $\eta = 80\%$.

Pomiary przeprowadzano zarówno przed, jak i po sedymentacji/filtracji, aby uzyskać pełny obraz efektów. Wszystkie procedury były zgodne ze standardami APHA (American Public Health Association). Przetwarzanie danych i wizualizacja wyników odbywały się za pomocą programu MATLAB, który posłużył do tworzenia wykresów i symulacji. Do wstępnego sortowania danych wykorzystano program Microsoft Excel.

Wyniki badań

Przedstawione wyniki badań pozwalają ocenić wpływ konfiguracji elektrod, gęstości prądu oraz czasu elektrolizy na efektywność elektrokoagulacji ścieków z myjni samochodowej. Porównania między elektrodami aluminiowymi i żelaznymi podkreślają ich względną efektywność. W konfiguracji Fe/Al wzrost masy suchych osadów i objętości piany miał przebieg niemal liniowy w czasie i skalował się z gęstością prądu (rys. 2).

Przy $J = 4$ mA/cm² po 25 min wytworzono ok. 0,24 g osadów i ok. 0,35 L piany, przy niewielkiej ilości rozpuszczonego koagulantu (ok. 0,07 g). Barwa (w skali Pt-Co) gwałtownie spadła z ok. 80 do ok. 10 w ciągu 10 min, a następnie nastąpił niewielki jej powrót (do ok. 15 pod koniec cyklu). Przy $J = 8$ mA/cm² ilość osadów i piany wzrosła (odpowiednio ok. 0,45 g i ok. 0,58 L), ale zaobserwowano wyraźny powrót barwy w środku cyklu (do 35–40 w 25. min).

Przy J w zakresie 12–16 mA/cm² osiągnięto maksymalne wartości (0,70–0,95 g osadów i 0,78–0,90 L piany) przy konsekwentnie bardzo niskiej końcowej barwie (≤ 5 Pt-Co) i bez jej powrotów. Najwyższą skuteczność odbarwiania, bez efektu ponownego pojawiania się barwy, uzyskano przy gęstości prądu 12–16 mA/cm² oraz czasie elektrolizy nieprzekraczającym 25 min. Nachylenia krzywych $m(t)$ i $F(t)$ rosły wraz ze wzrostem wartości J (odpowiednio ok. 0,010 → ok.

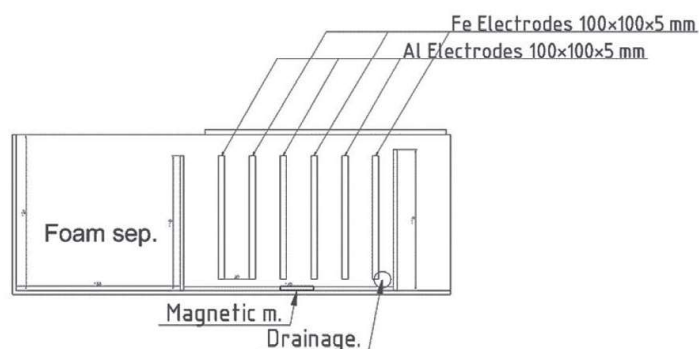


Fig. 1. Experimental setup of the electrocoagulation unit with Fe and Al electrodes

Rys. 1. Układ doświadczalny jednostki elektrokoagulacji z elektrodami Fe i Al

istic and time-efficient operating conditions. To support energy consumption analysis, voltage (V) and power (W) were recorded continuously from the DC power supply at each time interval.

After each treatment interval, 150 mL of water was sampled, allowed to settle for 30 min, and then filtered. The mass of dry solid residue retained on the filter paper was determined gravimetrically after each treatment, and electrode mass loss was calculated using Faraday's law (1):

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M \cdot \eta}{n \cdot F} \quad (1)$$

where current efficiency $\eta = 80\%$.

This calculation aimed to analyze the impact of dissolved electrode mass on foam and sediment formation.

Measurements were taken both before and after sedimentation/filtration, ensuring a complete picture of the treatment effects. All procedures and obtained results were consistent with the methodological requirements and quality assurance criteria outlined by APHA standards. Data processing and visualization of results were performed using MATLAB (R2022b), particularly for plotting removal efficiency trends, calculating intervals, and simulating the theoretical dissolution of electrodes and its effect. Additionally, Microsoft Excel was used for initial data sorting and the preparation of summary tables.

Results

This study analyzed the effect of electrode configuration, current density, and electrolysis time on the efficiency of electrocoagulation (EC) in the treatment of car wash wastewater (CWW). The focus was on the removal of pollutants (COD, color, TDS), the formation of sludge and foam, and the energetic parameters of the process. Measurements were taken both before and after sedimentation/filtration to ensure a comprehensive evaluation of treatment effectiveness. Comparisons between aluminum and iron electrodes highlight their relative efficiencies.

In the Fe/Al configuration, the increase in dry sediment and foam volume was almost linear over time and scaled with current density.

At $J = 4$ mA/cm², after 25 min, approx. ~0.24 g of sludge and ~0.35 L of foam were generated, with a small amount of dissolved coagulant (~0.07 g). The color (Pt-Co) rapidly

EC configuration (m, F, DS, Pt-Co) using Fe anode and Al cathode at different current densities.

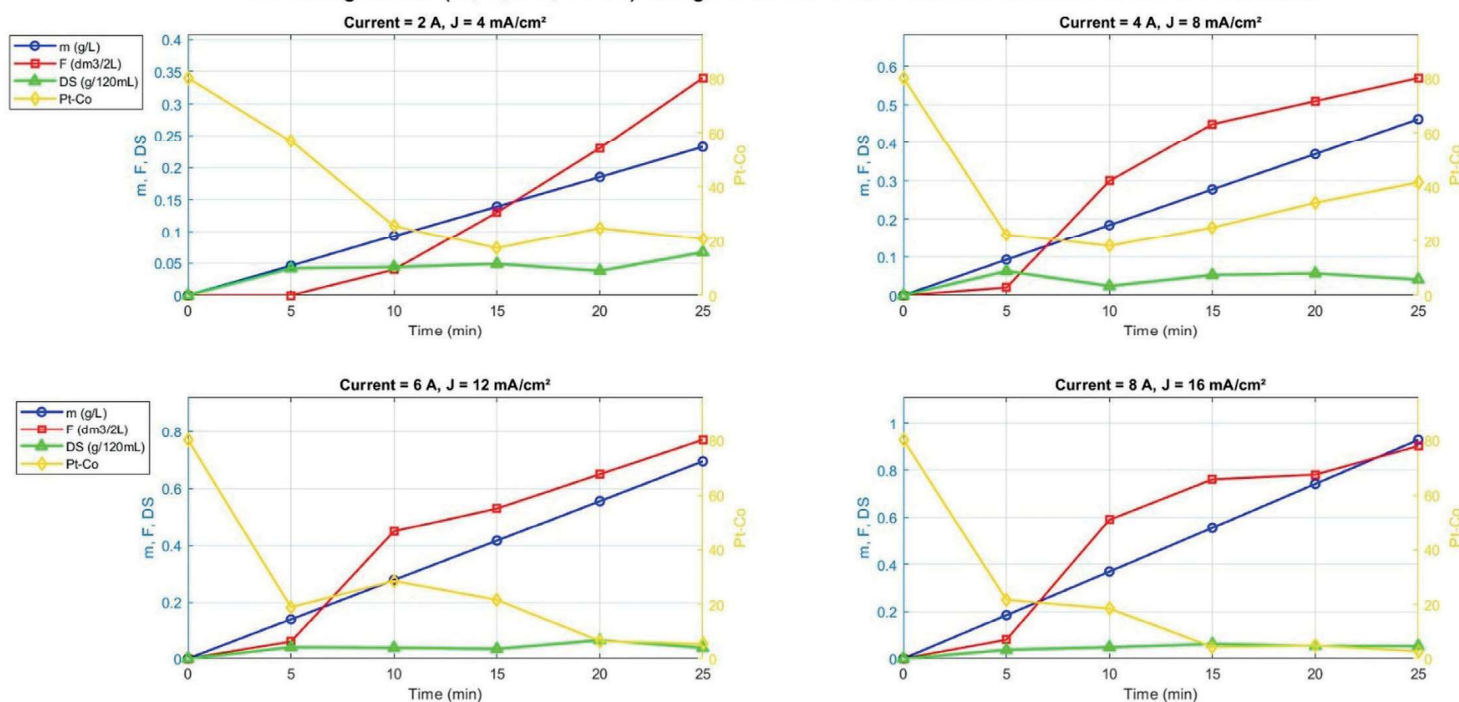


Fig. 2. Fe anode/Al cathode (Fe/Al); time profiles of foam (F), dissolved coagulant (m), dried solids (DS), and color (Pt-Co)

Rys. 2. Anoda Fe/katoda Al (Fe/Al); profile czasowe piany (F), rozpuszczonego koagulantu (m), suchych osadów (DS) oraz barwy Pt-Co

0,038 g/min i ok. 0,014→ok. 0,036 L/min w zakresie 4→16 mA/cm²), co odzwierciedla zintensyfikowaną flotację i wychwytywanie cząstek, podczas gdy masa roztworzonego metalu pozostała ograniczona (<0,1 g).

W konfiguracji Al/Fe, przy gęstości prądu J w zakresie 4–8 mA/cm², produkcja osadów (0,18–0,25 g) i piany (0,12–0,18 L) po 25 min była niewielka (rys. 3). Ilość roztworzonego koagulantu pozostała mała (<0,10 g), a redukcja barwy była ograniczona (z ok. 95 do 65–70 Pt-Co).

Zwiększenie gęstości prądu do 12 i 16 mA/cm² znacząco poprawiło wszystkie parametry. Masa osadów mieściła się w przedziale 0,35–0,80 g, piany 0,40–0,55 L, a roztworzonego koagulantu 0,25–0,45 g. Jednocześnie barwa spadła do odpowiednio ok. 20 i <15 Pt-Co. Wyniki te sugerują, że aby uzyskać skuteczne usunięcie barwy, niezbędne jest odpowiednie roztworzenie anody aluminiowej, co prowadzi do wytworzenia efektywnych cząsteczek koagulantu.

Końcowe wartości barwy i ChZT po filtracji znacznie różniły się w zależności od konfiguracji elektrod. Choć w obu konfiguracjach, Al/Fe i Fe/Al, osiągnięto ponad 85% redukcji barwy, to dynamika zmian była odmienna (rys. 4).

W przypadku Al/Fe, przy wyższych gęstościach prądu (12–16 mA/cm²), barwa szybko spadła i utrzymywała się na niskim poziomie (≤ 4), a końcowe wartości ChZT były najniższe (94–96 mg/L). Przy mniejszych gęstościach prądu, barwa częściowo powracała, a wartość ChZT pozostawała znacznie wyższa (119–150 mg/L).

Z kolei konfiguracja Fe/Al zapewniała szybkie i stabilne odbarwianie już w ciągu 5–10 min, niezależnie od gęstości prądu. Końcowe wartości ChZT były generalnie niższe niż w przypadku Al/Fe, w granicach 109–75 mg/L.

decreased from ~80 to ~10 within 10 min, followed by a slight return (to ~15 at the end of the cycle). At $J = 8 \text{ mA/cm}^2$, the amount of sludge and foam increased (~0.45 g and ~0.58 L), but the color showed a significant return in the middle of the cycle (to ~35–40 at 25 min).

At $J = 12\text{--}16 \text{ mA/cm}^2$, maximum values were achieved (~0.70–0.95 g of sludge and ~0.78–0.90 L of foam) with a consistently very low final color ($\leq 5 \text{ Pt-Co}$) and no color return. The highest decolorization efficiency, without the effect of color reappearance, was achieved at a current density of 12–16 mA/cm² and an electrolysis time not exceeding 25 min. The slopes of the $m(t)$ and $F(t)$ curves increased with J (approx. $\approx 0.010\text{--}0.038 \text{ g/min}$ and $\approx 0.014\text{--}0.036 \text{ L/min}$ in the range of 4→16 mA/cm², resp.), which reflects intensified flotation and particle capture, while the amount of dissolved metal remained limited (<0.1 g).

In the Al/Fe configuration, at a current density of $J = 4\text{--}8 \text{ mA/cm}^2$, the production of sludge (~0.18–0.25 g) and foam (~0.12–0.18 L) after 25 min was minimal (Fig. 3). The amount of dissolved coagulant remained low (<0.10 g), and the color reduction was limited (from ≈ 95 to 65–70 Pt-Co).

Increasing the current to $J = 12$ and 16 mA/cm^2 significantly improved all parameters. The mass of sludge reached ~0.35–0.80 g, foam ~0.40–0.55 L, and dissolved coagulant ~0.25–0.45 g. At the same time, the color dropped to ~20 and <15 Pt-Co, resp. These results suggest that for effective color removal, proper dissolution of the aluminum anode is necessary, which leads to the formation of effective coagulant particles.

The final color and COD values after filtration differed significantly depending on the electrode configuration. Although both the Al/Fe and Fe/Al configurations achieved over 85% color reduction, the dynamics of the changes were different.

EC configuration (m, F, DS, Pt-Co) using Al anode and Fe cathode at different current densities.

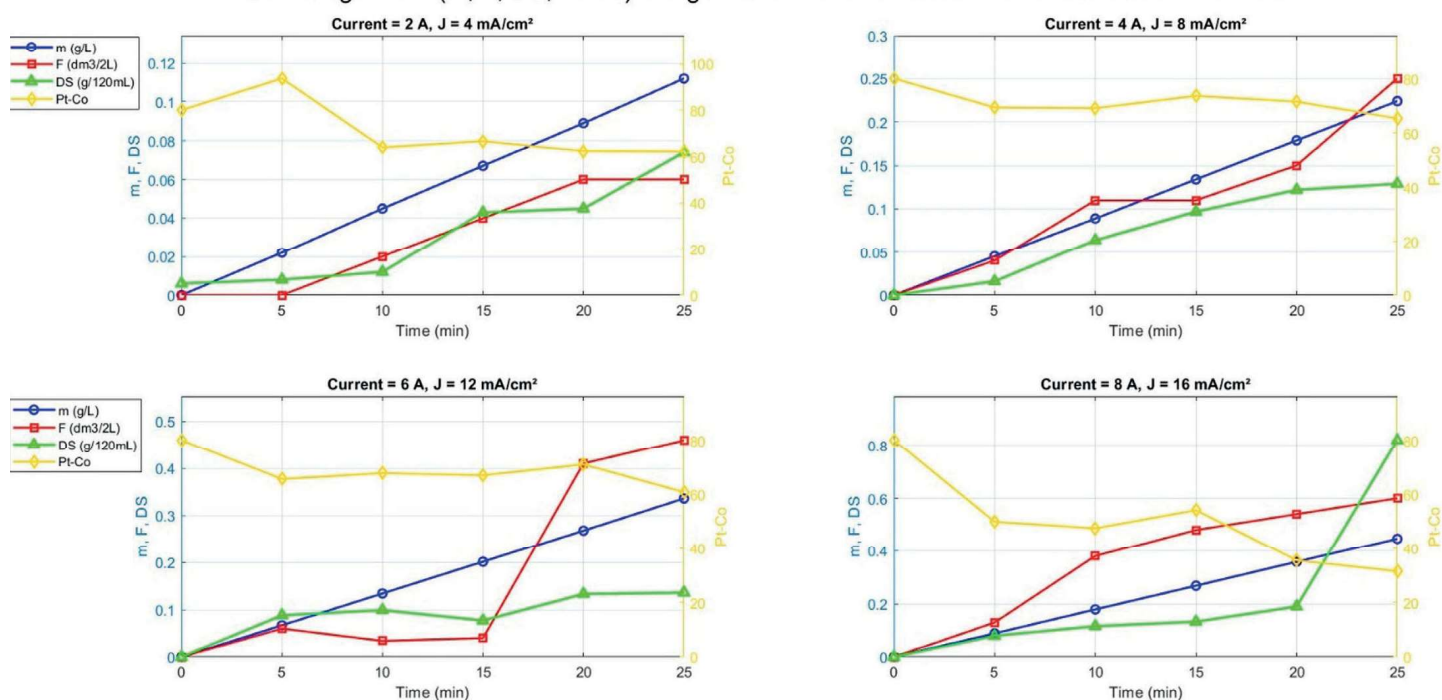


Fig. 3. Fe cathode/Al anode (Al/Fe); time profiles of foam (F), dissolved coagulant (m), dried solids (DS), and color (Pt-Co)

Rys. 3. Katoda Fe/anoda Al (Al/Fe); profile czasowe piany (F), rozpuszczonego koagulantu (m), suchych osadów (DS), oraz barwy Pt-Co

Chwilowo najniższe ChZT (ok. 70 mg/L) odnotowano po 15 min przy najwyższym prądzie, jednak wartość ta lekko wzrosła, co mogło być efektem ponownego rozproszenia osadów.

Badania potwierdziły, że konfiguracja Fe/Al jest bardziej wydajna w usuwaniu ChZT niż Al/Fe przy tych samych warunkach operacyjnych (rys. 5). Przy $J = 16$ mA/cm² usunięcie ChZT sięgnęło 72–75% w systemie Fe/Al, a przy $J = 12$ mA/cm² nawet 71%, z największą poprawą między 15. a 25. min. Tymczasem w systemie Al/Fe redukcja ustabilizowała się na poziomie 63–65% już przy J ok. 12 mA/cm², a wydłużenie procesu nie przyniosło znaczącej poprawy. Chociaż zwiększenie prądu poprawiało efektywność w obu przypadkach, to optymalny balans wydajności i zużycia energii osiągnięto przy J w granicach 8–12 mA/cm². System z anodą żelazną konsekwentnie przewyższał system z anodą aluminiową o 10–12%.

Podsumowanie

Badania potwierdzają, że elektrokoagulacja to wysoce efektywna metoda oczyszczania ścieków z myjni. Chociaż oba badane systemy elektrodowe, Fe/Al i Al/Fe, wykazały dużą skuteczność, to konfiguracja z anodą żelazną konsekwentnie przewyższała konfigurację z anodą aluminiową pod względem redukcji barwy, ChZT oraz TDS.

Opracowany system skutecznie usuwał zanieczyszczenia. Przy gęstości prądu $J = 16$ mA/cm² i czasie 25 min, system z anodą Fe zredukował ChZT do ok. 74,7 mg/L (72–75% usunięcia) i osiągnął o 13,6% lepsze zmniejszenie zawartości rozpuszczonych substancji stałych niż system z anodą Al

In the case of Al/Fe, at higher current densities (12–16 mA/cm²), the color quickly dropped and remained at a low level (≤ 4), and the final COD values were the lowest (~94–96 mg/L). At lower current densities, the color partially returned, and the COD value remained significantly higher (~119–150 mg/L).

In contrast, the Fe/Al configuration provided fast and stable decolorization within just 5–10 min, regardless of the current density. The final COD values were generally lower than with Al/Fe, in the range of ~109–75 mg/L. The lowest temporary COD (~70 mg/L) was recorded after 15 min at the highest current, although this value slightly increased, which may be a result of the redispersion of sludge.

Studies confirmed that the Fe/Al configuration is more efficient at COD removal than Al/Fe under the same operating conditions (Fig. 5). At $J = 16$ mA/cm², COD removal reached 72–75% in the Fe/Al system, and at $J = 12$ mA/cm², it was even 71%, with the greatest improvement occurring between 15 and 25 min. Meanwhile, in the Al/Fe system, reduction stabilized at a level of 63–65% at $J \approx 12$ mA/cm², and extending the process did not lead to significant improvement. Although increasing the current improved efficiency in both cases, the optimal balance of efficiency and energy consumption was achieved at $J \approx 8$ –12 mA/cm². The system with an iron anode consistently outperformed the system with an aluminum anode by 10–12%.

Conclusion

The studies confirm that electrocoagulation (EC) is a highly effective method for treating car wash wastewater. While both electrode systems tested Fe/Al and Al/Fe showed

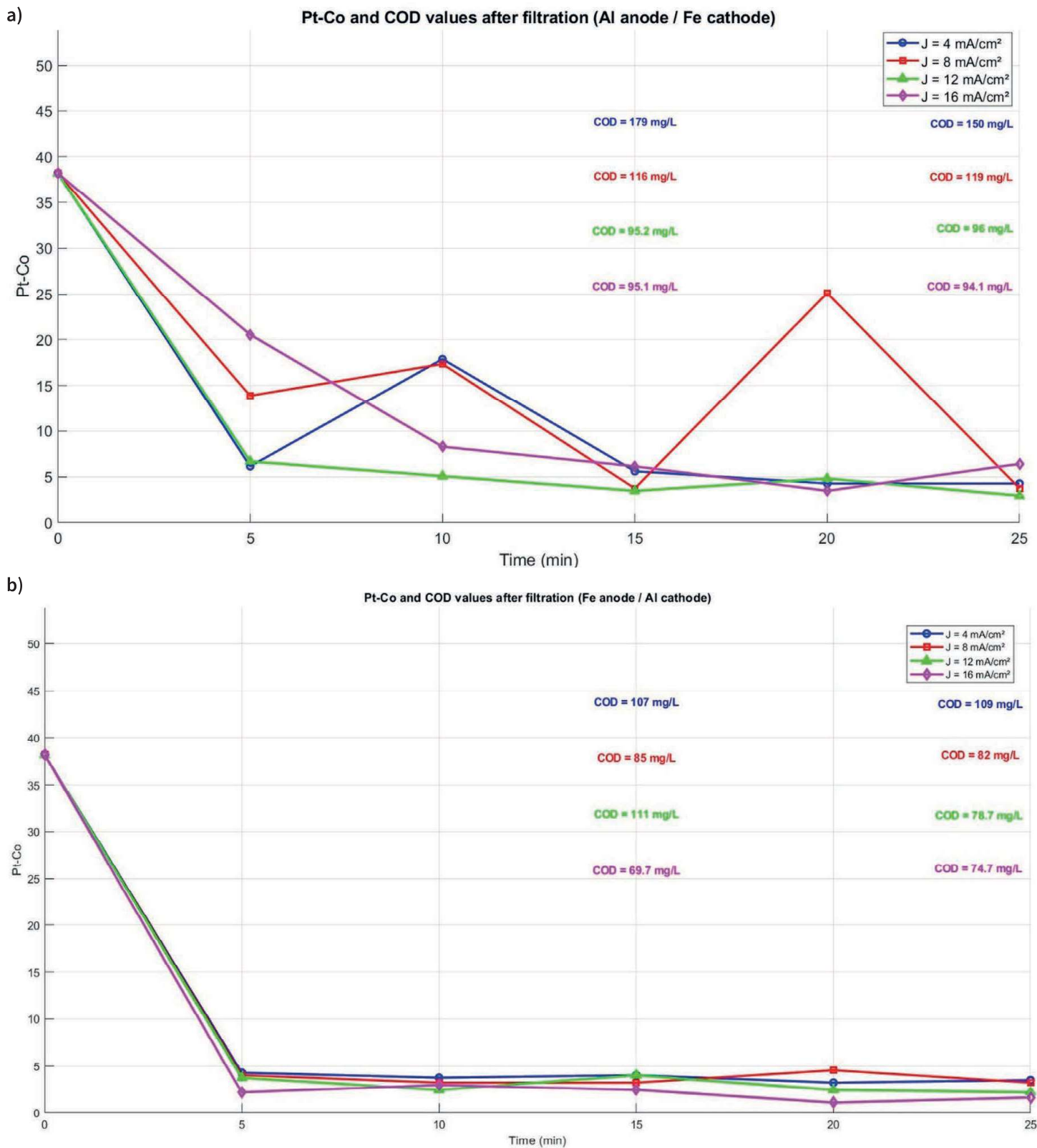


Fig. 4. Post-filtration Pt-Co/COD/time: a – Al/Fe, b – Fe/Al

Rys. 4. Postfiltracyjne parametry: barwa Pt-Co oraz ChZT w funkcji czasu; a – Al/Fe, b – Fe/Al

(końcowe TDS odpowiednio 609 mg/L i 703 mg/L, z wartości początkowej 1100 mg/L).

System Fe/Al zapewnił szybkie usuwanie barwy, osiągając końcowe wartości ≤ 5 Pt-Co, podczas gdy system Al/Fe wykazywał tendencje do powrotu barwy. Najlepsze końcowe odbarwienie po koagulacji i filtracji (98,66%) uzyskano z anodą Fe przy $J = 16$ mA/cm², osiągając 1,068 Pt-Co.

high effectiveness, the configuration with an iron anode consistently outperformed the aluminum anode in terms of color, COD, and TDS reduction.

The developed system effectively removed pollutions. At a current density of 16 mA/cm² and an electrolysis time of 15 min, the Fe anode system reduced COD to 69,7 mg/L (74,6% removal) and achieved a 13.6% higher TDS reduc-

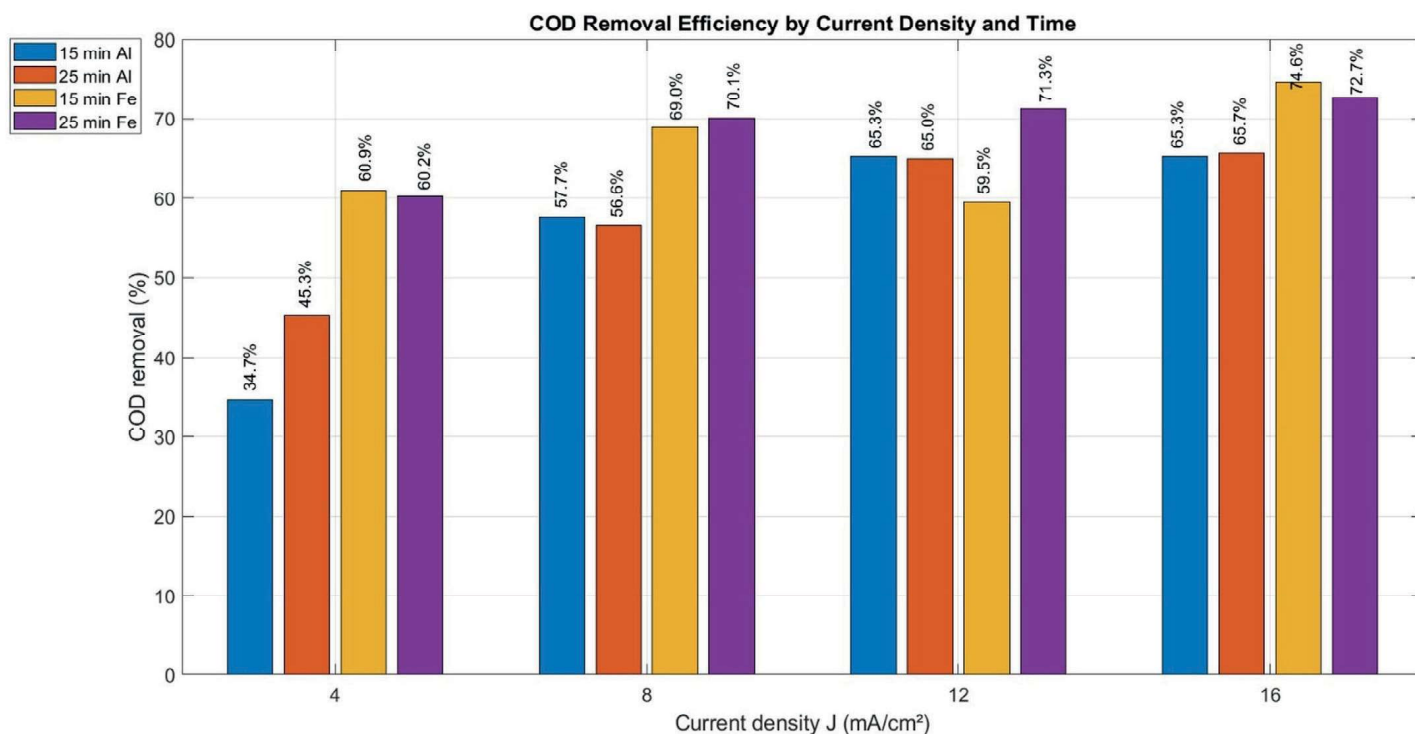


Fig. 5. COD removal as a function of current density and time for both electrode pairs

Rys. 5. Usuwanie ChZT w funkcji gęstości prądu i czasu, dla obu par elektrod

Dla porównania, najlepszą wydajność anody Al (96,33% odbarwienia) osiągnięto przy $J = 12 \text{ mA/cm}^2$, z końcowym wynikiem 2,937 Pt-Co.

Elektrody Fe generowały o ok. 33% więcej piany (ok. 0,9 L) niż Al (ok. 0,6 L), co było związane z wyższym stopniem roztwarzania anody. System z anodą Fe, przy tych samych warunkach pracy, wymagał o 12,56% więcej energii (150,4 W przy 18,8 V) niż system Al. Mimo że system z anodą Fe zużywał o 12,56% więcej energii i generował więcej piany, jego wyższa efektywność potwierdza, że jest lepszym rozwiązaniem dla usuwania zanieczyszczeń.

Received/Otrzymano:
07-09-2025

Reviewed/Zrecenzowano:
09-09-2025

Accepted/Zaaceptowano:
19-09-2025

Published/Opublikowano:
20-10-2025

tion than the Al system. The final TDS values were 609 mg/L and 703 mg/L, resp., from an initial value of 1100 mg/L.

The Fe/Al system provided rapid color removal, reaching final values of $\leq 5 \text{ Pt-Co}$, while the Al/Fe system showed a tendency for color to return. The best final decolorization after coagulation and filtration (98.66%) was achieved with the Fe anode at 16 mA/cm^2 , resulting in a value of 1.068 Pt-Co. In comparison, the best performance of the Al anode (96.33% decolorization) was achieved at 12 mA/cm^2 , with a final result of 2.937 Pt-Co.

The Fe electrodes generated approximately 33% more foam (0.9 L) than the Al electrodes (0.6 L), which was associated with a higher degree of anode dissolution. Under the same operating conditions, the system with an Fe anode required 12.56% more energy (150.4 W at 18.8 V) than the Al system.

Despite the Fe anode system consuming 12.56% more energy and generating more foam, its superior efficiency confirms it is the better solution for pollutant removal.

REFERENCES/LITERATURA

- [1] A. Torrens, P. Sepúlveda-Ruiz, M. Aulinas, M. Folch, *Clean Technol.* 2025, **7**, nr 1, 12.
- [2] M. Sarmadi, A. Zarei, M. Ghahrchi, B. Sepehrnia, A. Meshkinian, H. Moein, E. Bazrafshan, *Desalin. Water Treat.* 2021, **225**, 112.
- [3] M. Guerreiro Crizel, T.M. Barreto, M.A. Fiori, G.L. Colpani, J.M. Muneron de Mello, *ACS ES&T Water* 2024, **4**, nr 5, 1978.
- [4] E. Magnisali, Q. Yan, D.V. Vayenas, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2022, **97**, nr 1, 9.
- [5] T. Rangseesuriyachai, K. Pinpatthanapong, J. Boonnorat, S. Jitpinit, T. Pinpatthanapong, T. Mueansichai, *J. Environ. Chem. Eng.* 2024, **12**, nr 1, 111627.
- [6] E.Z. El-Ashtoukhy, N.K. Amin, Y.O. Fouad, *Environ. Monit. Assess.* 2015, **187**, nr 10, 628.
- [7] M.J. Mohammadi, J. Salari, A. Takdastan, M. Farhadi, P. Javanmardi, A. Yari, S. Rahimi, *Desalin. Water Treat.* 2017, **68**, 122.
- [8] A.R. Makwana, M.M. Ahammed, *Sep. Sci. Technol.* 2017, **52**, nr 8, 1412.
- [9] E. Hoseinzadeh, A. Gholi-fam, M. Faramarzi, *Sustain. Chem. Pharm.* 2024, **41**, 101688.