



Tüm Yüzey İşlemler Derneği'nin haberleşme, tanıtım ve yayın noktasıdır. Her üç ayda bir Türkçe ve İngilizce olarak yayınlanmaktadır.

TÜYİDERGİ-The communication, promotion and publication point of the Surface Treatments Association of Turkey. Our journal is published quarterly in both Turkish and English.



makale
article

makale
article

makale
article

makale
article

08

**EV Otomotiv Elektroniklerinde İletken
Malzeme ve Kaplama Trendleri**

Trends in Conductive Materials and
Coatings in EV Automotive Electronics

12

**Elektrokaplama
Tekniğinin Anahtar Rolü**

Electroplating Technology
and Its Key Role

34

**Akımsız Nikel 100 Saatlik
Korozyon Testini Nasıl Geçer?**

How to Pass a 100-Hour Salt
Spray Test for Electroless Nickel ?

50

**Win Eurasia 2026'da Yüzey İşlem
Sektörü Geleceğe Odaklandı**

Shaping The Future Of Surface
Treatment At Win Eurasia 2026

Kataforez (KTL) Kaplama Sistemlerinde Teknik Tasarım, Operasyonel Parametreler ve Ekipman Seçimi

Technical Design, Operational Parameters And Equipment Selection In Cathodic Electrodeposition (E-Coat) Systems

Cihad AYDIN

Karakaya 86 A.Ş. - Üretim Müdürü

Karakaya 86 - Production Manager

Özet

Kataforez (KTL) kaplama, otomotiv ve genel endüstride metal yüzeylerin korozyon direncini maksimize etmek ve karmaşık geometrilerde yüksek yüzey homojenliği sağlamak amacıyla kullanılan, elektro-kimyasal temelli bir daldırma prosesidir. Sistemin başarısı; boya kimyasının ötesinde, sirkülasyon hidrodinamiği, diyaliz (anot) yönetimi, ultrafiltrasyon (UF) verimliliği ve hassas mühendislik hesaplarına dayalı ekipman seçimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada, bir kataforez tesisinin sürdürülebilirliğini sağlayan alt sistemler teknik boyutuyla incelenmekte, saha operasyonlarında kritik öneme sahip hesaplama yöntemleri ve mühendislik kriterleri detaylandırılmaktadır.

Giriş ve Sistem Mantiği

Kataforez kaplama, sulu bir çözelti içerisindeki pozitif yüklü reçine ve pigment partiküllerinin, doğru akım (DC) etkisiyle negatif yüklü iş parçasına (katot) yönelmesi ve burada deşarj olarak bir film tabakası oluşturmaya prensibine dayanır.

Bu prosesin en büyük avantajı, parçanın iç kısımları dahil her noktasına (throwing power / nüfuz etme gücü) eşit kalınlıkta boya ulaştırabilmesidir. Ancak bu durum; elektriksel, kimyasal ve hidrodinamik dengelerin milimetrik kontrolünü gerektirir.

Abstract

Cathodic Electrodeposition (E-Coat/KTL) coating is an electrochemical immersion process widely used in the automotive and general manufacturing industries to maximize corrosion resistance and achieve highly uniform coating thicknesses on complex geometries.

The success of the system is directly related not only to paint chemistry but also to circulation hydrodynamics, dialysis (anode) management, ultrafiltration (UF) efficiency, and equipment selection based on precise engineering calculations.

In this study, the subsystems ensuring the sustainability of an E-coat facility are examined from a technical perspective, while critical calculation methodologies and engineering criteria used in field operations are discussed in detail.

Keywords

Cathodic electrodeposition, E-coat, ultrafiltration, anode design, surface coating technologies

1. Introduction And System Principle

Cathodic electrodeposition coating is based on the principle that positively charged resin and pigment particles suspended in an aqueous solution migrate toward the negatively charged workpiece (cathode) under the influence of direct current (DC), where they are discharged and form a paint film.





One of the greatest advantages of this process is its ability to deposit a uniform coating thickness on every surface of the component, including recessed and complex internal geometries, due to its high throwing power.

However, achieving this capability requires precise control of electrical, chemical, and hydrodynamic balances. Any disruption in these balances may result in coating defects such as:

- cratering
- orange peel appearance
- insufficient corrosion resistance
- coating thickness heterogeneity

Therefore, proper process equipment selection is critical in E-coat plant design.

2. Circulation System: Hydraulic And Chemical Stability

The E-coat bath must remain in continuous motion. Stagnation of the paint causes pigment sedimentation and deterioration of bath characteristics (aging).

2.1 Pump Selection and Shear Stress

E-coat paints consist of submicron colloidal micelles. This sensitive structure is vulnerable to excessive mechanical forces.

Rotational Speed

Pumps should always operate at low speed (maximum

Dengenin bozulması ise krater, portakal kabuğu görünümü veya yetersiz korozyon direnci gibi kalite hatalarına yol açar.

Sirkülasyon Sistemi: Hidrolik Ve Kimyasal Stabilite

Kataforez banyosu, sürekli hareket halinde olmalıdır. Boyanın durgun kalması, pigment çökmesine ve banyo karakteristiğinin bozulmasına (aging) neden olur.

2.1. Pompa Seçimi ve Kayma Gerilmesi (Shear Stress)

Kataforez boyaları, mikron altı boyuttaki misellerden oluşan hassas yapı, yüksek mekanik kuvvetlere karşı dayanıksızdır.

• **Devir Sayısı:** Pompalar mutlaka düşük devirli (maks. 1450 rpm) seçilmelidir. 2900 rpm gibi yüksek devirli pompalar, boya moleküllerini mekanik olarak parçalayarak flokülasyona (topaklanma) neden olur.

• **Debi Belirlenmesi:** Pompa debisi belirlenirken genel olarak kabul gören 5 tur/saat kapasitesine göre debi belirlenir. Boru, dirsek ve vanalardan kaynaklanan kayıplar hesaba katılarak toplam debi kapasitesi belirlenir. Bu kapasite hesabında tur sayısını artırmanın avantajı hem banyo homojenizasyonu daha efektif olur hem de ayrışan iyonların hareketi hızlanacağı için kaplanan parçalar daha homojen kaplanır.

- **Sızdırmazlık:** Boyanın aşındırıcı yapısı nedeniyle çift mekanik salmastra kullanımı tavsiye edilir. Dışarıdan beslenen temiz su hattı (flush sistemi), boyanın kuruyup salmastra yüzeylerini tahrip etmesini önler.

Anot ve Diyaliz Hücreleri (pHYönetimi)

Kataforetik kaplama (E-coat) prosesinde, boya filminin katot (iş parçası) üzerinde dengeli bir şekilde oluşabilmesi için banyo kimyasının elektriksel ve kimyasal olarak stabil tutulması gerekir. Kaplama reaksiyonu sırasında banyoda sürekli olarak asidik yan ürünler (anyonlar) açığa çıkar. Bu durum, banyonun pH değerini düşürerek boyanın stabilitesini bozar.

Diyaliz Hücreleri (anot kutuları), bu noktada bir elektro-kimyasal filtre görevi görür. Seçici geçirgen membranlar yardımıyla fazla asidi banyodan çekerek anoliz tankına transfer eder ve böylece pH yönetimini otonom bir şekilde sağlar.

3.1. Anot Yüzey Alanı ve Akım Yoğunluğu Analizi

Sistemin kurulum maliyeti ve işletme verimliliği, toplam aktif anot alanının doğru hesaplanmasına bağlıdır. Bu hesaplama yapılırken, tesisin kapasitesine bağlı olan "Pik Akım Talebi" ve boyanın elektriksel karakterini belirleyen "Coulombic Verim" parametreleri esas alınır.

3.1.1 Coulombic Verim ve Akım İhtiyacı Formülasyonu

Coulombic verim, belirli bir yüzey alanında hedeflenen kuru film kalınlığını oluşturabilmek için gerekli elektrik yükü miktarını ifade eder.

Kataforez proseslerinde pratik mühendislik yaklaşımı olarak kullanılan temel ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\text{Denklem } Q = A \times t \times C$$

Burada;

Q : Toplam gerekli elektrik yükü (Coulomb)

A : Kaplanacak yüzey alanı (m²)

t : Hedef kuru film kalınlığı (µm)

C : Boyaya ait coulombic sabit (C/m²-µm)

Tipik kataforez boyalarında coulombic sabit genellikle:

$$C = 15 - 30 \text{ C/m}^2\text{-}\mu\text{m aralığında değişmektedir.}$$

Bir redresör tasarımında gerekli akım ihtiyacı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$\text{Denklem } I = Q / T$$

Burada;

I : Gerekli akım (A)

1450 rpm). High-speed pumps operating at 2900 rpm may mechanically break paint molecules and cause flocculation.

Flow Rate Determination

Pump flow rate is generally designed according to the widely accepted circulation criterion of five tank turnovers per hour. Pressure losses caused by pipes, elbows, and valves must be included in the hydraulic calculation.

Increasing the circulation rate provides the following advantages:

- more effective bath homogenization
- accelerated ion movement
- improved coating uniformity

Sealing System

Due to the abrasive nature of E-coat paint, double mechanical seals are recommended. An external clean water flush system prevents paint drying and seal surface damage.

2.2 Eductor Nozzle Dynamics

Eductors are the primary components responsible for maintaining bath homogeneity.

Operating according to the Venturi principle, these devices generate flow rates approximately four to five times greater than the pumped liquid volume, preventing dead zones inside the tank.

In an ideal arrangement:

- eductors should be directed toward the tank bottom at a 45° angle
- sufficient turbulence should be created to prevent sediment accumulation

3. Anodes And Dialysis Cells (Ph Management)

During the cathodic electrodeposition process, acidic by-products accumulate in the bath while the paint film deposits on the cathode surface.

To maintain bath chemistry stability, dialysis cells (anode boxes) are used.

These units function as electrochemical filters, removing excess acid from the bath through ion-selective membranes and transferring it to the anolyte circuit.

3.1 Anode Surface Area and Current Density Analysis

The installation cost and operational efficiency of the system depend on accurate calculation of the total active anode surface area.

This calculation is based on the peak current demand of the facility and the coulombic efficiency of the coating material.

3.1.1 Coulombic Efficiency and Current Requirement Formulation

Coulombic efficiency represents the amount of electrical charge required to produce a target dry film thickness on a given surface area.

The general engineering relationship used in E-coat processes is shown below.

Equation (1)
 $Q = A \times t \times C$

Where:

Q : Required electrical charge (Coulomb)
A : Surface area to be coated (m²)
t : Target dry film thickness (μm)
C : Coulombic constant of the paint (C/m²·μm)

Typical coulombic constants for cathodic E-coat paints range between:

$$C = 15 - 30 \text{ C/m}^2\cdot\mu\text{m}$$

The required current for rectifier sizing can be calculated as follows.

Equation (2)
 $I = Q / T$

Where:

I : Required current (A)
Q : Total electrical charge (C)
T : Coating time (s)

Application Example

Surface area to be coated:
A = 100 m²
Target film thickness:
t = 25 μm
Paint constant:
C = 20 C/m²·μm
Total required charge:

Equation (3)

$$Q = 100 \times 25 \times 20$$

$$Q = 50,000 \text{ C}$$

Coating time:
T = 120 s
Required average current:

Equation (4)

$$I = 50,000 / 120$$

$$I \approx 417 \text{ A}$$

Technical Evaluation

Under actual process conditions, the system efficiency is never 100% due to factors such as:

- current efficiency
- part geometry
- throwing power
- bath conductivity
- temperature
- resin type

Therefore, rectifier capacity is generally designed with a safety factor of 20–40%.

3.1.2 Technical Analysis: MMO-Coated Titanium Anodes

Q : Toplam elektrik yükü (C)
T : Kaplama süresi (s)

Uygulama Örneği

Kaplanacak yüzey alanı: A = 100 m²
Hedef film kalınlığı: t = 25 μm
Boya sabiti: C = 20 C/m²·μm
Toplam gerekli yük:
Denklem (12) Q = 100 × 25 × 20 = 50.000 C
Kaplama süresi: T = 120 s

Gerekli ortalama akım:

$$\text{Denklem } I = 50\,000 / 120 \text{ I} \approx 417 \text{ A}$$

3.1.2. Teknik Analiz: MMO Kaplı Titanyum Anotlar

Modern kataforez tesislerinde yüksek performanslı MMO (Mixed Metal Oxide) kaplı titanyum anotlar tercih edilmektedir.

Bu anotların avantajları şunlardır:

- Yüksek Akım Kapasitesi: 80 - 100 A/m² bandında stabil çalışma.
- Boyutsal Kararlılık: Zamanla aşınma yapmaz, anot-katot mesafesini sabit tutar.
- Enerji Verimliliği: Düşük aşırı gerilim değerleri ile enerji tasarrufu.

3.2. Yerleşim Geometrisi ve Dağılım Tasarımı

Hesaplanan anot alanının tank içerisindeki stratejik yerleşimi, kaplama kalitesini doğrudan etkiler. Tasarımda üç kritik parametre baz alınmalıdır:

- Eşpotansiyel Dağılım: Anot-katot arası ideal mesafe 400–600 mm olmalıdır. Kısa mesafe “yanma” (burn) riskini, uzun mesafe ise enerji kaybını artırır.
- Diyaliz Hücre Konumlandırması: Anotlar tabandan en az 200 mm yukarıda, sıvı seviyesinden ise 100 mm aşağıda sonlanmalıdır.

- Anolit Sirkülasyonu: Membran sağlığı için anot başına 2–5 L/dk anolit akış hızı sağlanmalıdır.

3.3. Uygulamalı Tasarım Örneği ve Metodolojisi

Sistemin fiziksel boyutlarını belirlemek için standart bir tesis senaryosu üzerinden yapılan hesaplama aşağıdadır:

Sistem Verileri:

- Kaplanacak Maks. Alan (A-katot): 100 m²
- Tank Boyutları: 5m (U) x 2m (G) x 2.5m (D)
- Boya Akım İhtiyacı: 20 A/m²