

Metal Kaplamada Atıksu Arıtma ve Geri Kazanım: Bir Yükümlülüğten Rekabet Avantajına

Wastewater Treatment and Recovery in Metal Finishing: From an Obligation to a Competitive Advantage

Cem İBRİKÇİ

GESU Arıtma Sistemleri, Kurucu ve Genel Müdür
TUYİDER Çevre ve Sürdürülebilirlik Çalışma Grubu Üyesi
Founder and General Manager of GESU Environmental Technologies

Otuz yıla yakın süredir endüstriyel atıksuyla uğraşıyorum; bu süreçte metal kaplama, karşıma çıkan sektörlerin hem en zorlusu hem de en öğreticisi oldu. Zor; çünkü tek bir atıksu değil, kimyası birbirine düşman birkaç ayrı atıksu ile uğraşırsınız. Öğretici; çünkü bu sektörde doğru mühendislik ile yarım mühendislik arasındaki farkı bir deşarj ölçümü acımasızca ortaya koyar. Bugün suyun her geçen yıl daha kıymetli hâle geldiği bir dünyada ben hep şuna inandım: su azalıyorsa, kazanan onu temizleyip yeniden kullanandır.

Bir kaplamacı için atıksu, çoğu zaman üretimin sonunda akla gelen bir yük, bir zorunluluk olarak görülür. Oysa doğru bakıldığında o atıksu; geri kazanılacak su, geri kazanılacak metal ve azaltılacak bir maliyettir. Bu yazıda, kaplama tesislerimizin atıksuyunu hem mevzuata uygun arıtmanın hem de onu bir gider kalemi olmaktan çıkarıp kaynağa dönüştürmenin yolunu; değişen kaplama teknolojilerini de göz önüne alarak, sahadan ve literatürden süzölmüş haliyle paylaşmak istiyorum.

Metal kaplama atıksuyu neden özeldir?

Tipik bir kaplama hattı; yağ alma, asit daldırma (dekapaj), kaplama banyosu, çok kademeli durulama ve pasivizasyon adımlarından oluşur. Her adım arasındaki durulama suyu,

I have been dealing with industrial wastewater for nearly thirty years, and during this time, the metal finishing industry has proven to be both the most challenging and the most instructive sector I have encountered. Challenging because you are not dealing with a single wastewater stream, but with several different streams whose chemistries are often incompatible with one another. Instructive because in this industry, the difference between sound engineering and mediocre engineering is mercilessly revealed by a single discharge measurement. In a world where water becomes more valuable every year, I have always believed one thing: if water resources are diminishing, the winners will be those who clean and reuse it.

For a metal finisher, wastewater is often regarded as a burden or an obligation that comes to mind only at the end of production. Yet, when viewed correctly, that wastewater represents recoverable water, recoverable metals, and a cost that can be significantly reduced. In this article, I would like to share through insights distilled from both field experience and the literature how we can not only treat the wastewater generated by our plating facilities in compliance with regulations, but also transform it from an expense item into a valuable resource, taking into account the changing landscape of plating technologies.

Why Is Metal Finishing Wastewater Unique?

A typical plating line consists of degreasing, acid pickling, plating baths, multi-stage rinsing, and passivation processes. The rinse water between each stage, the process solution carried over on the surface of the parts (drag-out), and the periodic discharge of spent



process baths together generate the wastewater.

Water consumption can vary widely, ranging from 20 to 100 m³ per ton of product. In other words, metal finishing facilities are, in fact, major consumers of water.

The key issue is this: metal finishing wastewater is not homogeneous. There are four main types of wastewater streams, and when they are indiscriminately mixed, the result can be disastrous:

- Oily/organic stream (degreasing baths): Contains high COD, oil and grease, and surfactants; disrupts metal precipitation and fouls membranes.
- Cyanide-bearing stream (Cu-CN, Zn-CN, Au-CN): Highly toxic and requires oxidation for destruction.
- Chromium-bearing stream (Cr⁶⁺): Contains carcinogenic hexavalent chromium that must first be reduced.
- Acid-alkali/heavy metal stream (Ni, Cu, Zn, Fe, F): Typically treated through pH adjustment and precipitation.

Therefore, the first rule of engineering is clear: stream segregation is essential. Cyanide-bearing and chromium-bearing streams should never enter the same pretreatment system. Mixing the effluent of an oxidation process with the effluent of a reduction process is chemically equivalent to pouring two mutually destructive formulations into the same tank. I consider this separation an indispensable requirement

parçanın üzerinde taşınan banyo sıvısı (drag-out) ve periyodik banyo boşaltmaları atıksuyumuzu oluşturur. Su tüketimi ürün başına 20–100 m³/ton gibi geniş bir aralıkta seyreder — yani kaplamacı, aslında çok ciddi bir su tüketicisidir.

Asıl mesele şudur: kaplama atıksuyu homojen değildir. Başlıca dört farklı karakterde akım vardır ve bunlar düşüncesizce karıştırıldığında felaket olur:

- Yağlı / organik akım (yağ alma banyoları): yüksek KOİ, yağ-gres ve yüzey aktif madde (surfaktan) içerir; metal çöktürmeyi bozar, membranı tıkar.
- Siyanürlü akım (Cu-CN, Zn-CN, Au-CN): toksiktir, oksidasyonla parçalanması gerekir.
- Kromlu akım (Cr⁶⁺): önce indirgenmesi gereken, kanserojen bir bileşendir.
- Asit-alkali / ağır metal akımı (Ni, Cu, Zn, Fe, F): pH ayarı ile çöktürülür.

Bu yüzden mühendisliğin birinci kuralı nettir: akım ayrımı şarttır. Siyanürlü ve kromlu akımlar asla ortak bir ön arıtmaya girmemelidir. Bir oksidasyon çıkışı ile bir indirgeme çıkışını

karıştırmak, kimyasal olarak birbirini iptal eden iki reçeteyi aynı kazana dökmek demektir. Ben bu ayrımı, tesisin daha proje masasındayken vazgeçilmez şartı olarak koyarım.

Yağ alma banyolarını küçümsemeyin:

Kaplama hattının en başında, çoğu zaman gözden kaçan yağ alma banyoları bulunur ve bunlar çeşit çeşittir: alkali yağ alma, solvent yağ alma, elektrolitik yağ alma ve özellikle zorlayıcı olan emülsiyon tipi yağ alma. Bu banyoların atıksuyu; yüksek KOİ, yağ-gres ve yüzey aktif maddeler bakımından zengindir. Yağ ve surfaktanlar, metal çöktürme ve flokülasyonu fiilen sabote eder, üstelik membranları tıkar. Bu nedenle yağlı akım ayrı toplanmalı ve önce yağından arındırılmalıdır: serbest yağ için sıyırma ve yüzdürme (DAF), kararlı emülsiyonlar için ise kimyasal emülsiyon kırma veya ultrafiltrasyon gerekir. Yağdan arındırılmış su ancak bundan sonra metal arıtma hattına verilmelidir.

Konsantreyi seyreltikten ayırın:

Akım ayrımının bir inceliği daha vardır. Tükenmiş konsantre asit banyoları (dekapa) ile tükenmiş konsantre alkali banyoları (yağ alma) ayrı toplanmalı ve ana hatta ani değil, kontrollü ve yavaş - tercihen kesikli (batch) - dozlanmalıdır; konsantre asidi konsantre alkali ile bir anda karıştırmak şiddetli ısınma, köpürme ve kontrolsüz reaksiyon demektir. Buna karşılık, asit daldırma sonrası ve alkali işlem sonrası gelen seyreltik durulama suları birbirini büyük ölçüde nötralize ettiğinden rahatlıkla birleştirilebilir; bu, hem kimyasal tüketimini düşürür hem de pH ayar ünitesinin yükünü dengeler. Yani sır, her şeyi ayırmak değil; neyi ayıracağını, neyi birleştireceğini bilmektir.

Değişen Kaplama Teknolojileri: Alaşımlar ve Yeni Nesil Kaplamalar

Atıksuyu doğru arıtmanın ilk şartı, üretimin ne ürettiğini iyi okumaktır. Son yıllarda kaplama teknolojisi hızla değişiyor ve bu değişim doğrudan atıksu karakterine yansıyor. İki örnek üzerinde durmak isterim, çünkü artık sahada sıkça karşımıza çıkıyorlar.

Çinko-nikel ve diğer alaşım kaplamalar:

Özellikle otomotiv ve savunma sanayinin talebiyle, saf çinko kaplamanın yerini giderek çinko-nikel alaşım kaplamalar alıyor. Bünyesinde yaklaşık %12-15 nikel barındıran bu alaşım, saf çinkoya kıyasla kat kat üstün bir korozyon direnci sağlıyor. Ne var ki mühendislik açısından bedeli vardır: özellikle alkali çinko-nikel banyoları, metalleri çözeltide kararlı tutabilmek için güçlü kompleks (şelat) yapıcılar içerir. Bu, arıtmada işimizi zorlaştırır - çünkü kompleks halindeki nikeli klasik hidroksit çöktürme ile gideremezsiniz; metali serbest bırakmak için kompleksi önce kırmanız (pH'ı düşürmeniz, gerekirse şelatı parçalamanız) gerekir. Çinko-nikelli bir atıksuyu, sıradan bir çinko atıksuyu gibi tasarlamak, deşarjda

from the very beginning of the plant design stage.

Never Underestimate Degreasing Baths

At the very beginning of the plating line are the often-overlooked degreasing baths, which come in various forms: alkaline degreasing, solvent degreasing, electrolytic degreasing, and the particularly challenging emulsion-type degreasing systems.

Wastewater from these baths is rich in COD, oil and grease, and surfactants. Oils and surfactants effectively sabotage metal precipitation and flocculation and, moreover, cause severe membrane fouling. Therefore, oily streams should be collected separately and first subjected to oil removal. Free oils can be removed through skimming and dissolved air flotation (DAF), whereas stable emulsions require chemical emulsion breaking or ultrafiltration. Only after oil removal should this water be directed to the metal treatment system.

Separate Concentrated Streams from Dilute Streams

There is another important aspect to stream segregation. Spent concentrated acid baths (pickling) and spent concentrated alkaline baths (degreasing) should be collected separately and introduced into the main treatment line slowly and in a controlled manner—preferably in batch mode. Instantly mixing concentrated acids with concentrated alkalis leads to intense heat generation, foaming, and uncontrolled reactions.

In contrast, the dilute rinse waters generated after acid and alkaline processes can generally be combined, as they largely neutralize one another. This approach not only reduces chemical consumption but also balances the load on the pH adjustment unit.

The secret, therefore, is not to separate everything, but rather to know what should be separated and what can safely be combined.

Changing Plating Technologies: Alloys and New-Generation Coatings

The first prerequisite for proper wastewater treatment is a clear understanding of the production process itself. In recent years, plating technologies have evolved rapidly, and these changes are directly reflected in wastewater characteristics. I would like to focus on two examples that are increasingly common in practice.

Zinc-Nickel and Other Alloy Coatings

Driven particularly by the demands of the automotive and defense industries, zinc-nickel alloy coatings are increasingly replacing conventional pure zinc coatings. Containing approximately 12-15% nickel, these alloys provide corrosion resistance far superior to that of pure zinc.

However, this performance comes at an engineering cost. Alkaline zinc-nickel baths, in particular, contain strong complexing (chelating) agents to keep metals stably dissolved in solution. This significantly complicates wastewater treatment because nickel present in complexed form cannot be removed through conventional hydroxide precipitation. The complexes must first be broken—typically by lowering the pH and, if necessary, chemically destroying the chelating agents—to release the metal ions.

Designing a zinc-nickel wastewater treatment system as if it were a conventional zinc wastewater stream is a certain recipe for failing to meet nickel discharge limits.

Zirconium-Based (Nano-Ceramic) Conversion Coatings

Traditional chromium and phosphate-based pretreatment systems are increasingly being replaced by zirconium-based nano-ceramic conversion coatings due to their environmentally friendly profile.

The absence of hexavalent chromium is a major advantage; however, these baths are typically based on hexafluorozirconic acid and therefore introduce fluoride into the wastewater. Fluoride requires a specific treatment approach: precipitation as calcium fluoride (CaF_2) using lime, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reducing fluoride concentrations below the discharge limit of 15 mg/L.

Therefore, when a facility transitions from chromium conversion coatings to zirconium-based systems, its wastewater treatment process must also be redesigned from chromium reduction to fluoride precipitation.

The lesson here is clear: as the plating line changes, the wastewater changes as well. A well-designed treatment plant should be flexible enough to accommodate not only today's chemistry but also the chemistry of tomorrow.

The Right Chemistry in the Right Sequence

Success in treating metal finishing wastewater depends less on expensive equipment and more on applying the correct chemical sequence. Based on both field experience and the literature, the treatment backbone can be summarized as follows:

Cyanide Destruction (Two-Stage Alkaline Chlorination)

In the first stage, at pH 10–10.5, cyanide is oxidized to cyanate. In the second stage, at pH 7–8, cyanate is further oxidized to carbon dioxide and nitrogen.

In practice, the total chlorine demand is approximately 10 mg Cl_2 per mg of CN^- . With proper ORP control, removal efficiencies above 99% can be achieved, resulting in effluent concentrations below 0.5 mg/L.

Chromium Reduction ($\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$):

Under acidic conditions at pH 2–3, sodium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) or bisulfite is used to reduce hexavalent chromium, lowering the ORP below 250 mV and reducing Cr^{6+} concentrations to below 0.1 mg/L within 15–30 minutes.

Subsequently, chromium is precipitated in its trivalent form under alkaline conditions.

Precipitation – The Part That Requires True Expertise

This is where experience separates experts from beginners: each metal has a different minimum solubility pH. Consequently, it is impossible to remove all metals simultaneously from a mixed-metal wastewater stream using a single pH value.

The following operating window includes several critical pitfalls that years of experience have taught us to avoid.

nikel sınırını tutturamamak demektir.

Zirkonyum esaslı (nano-seramik) dönüşüm kaplamaları:

Geleneksel krom ve fosfat esaslı ön kaplamaların yerini, çevreci profilleri sayesinde giderek zirkonyum esaslı nano-seramik dönüşüm kaplamaları alıyor. Altı değerlikli krom içermemeleri büyük bir avantaj; ancak bu banyolar hekzafloro-zirkonik asit esaslıdır ve atıksuya florür getirir. Florür, kendine has bir arıtma ister: kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile kalsiyum florür (CaF_2) olarak çöktürülür ve deşarj sınırı olan 15 mg/L'nin altına indirilir. Yani bir tesis krom dönüşümden zirkonyuma geçtiğinde, atıksu arıtması da krom indirgemeden florür çöktürmeye doğru yeniden tasarlanmalıdır.

Buradan çıkan ders şudur: kaplama hattı değişikçe atıksu da değişir. İyi bir arıtma tesisi, bugünün değil, tesisin gelişeceği yarının kimyasını da öngörerek esnek tasarlanır.

Doğru kimya, doğru sıra

Kaplama atıksuyunda başarı, pahalı ekipmandan önce doğru kimyasal sıralamadan geçer. Sahada uyguladığımız ve literatürün de doğruladığı omurga şudur:

Siyanür yıkımı (alkali klorlama, iki kademeli):

Birinci kademede pH 10-10,5'te CN^- siyanata yükseltgenir; ikinci kademede pH 7-8'de siyanat CO_2 ve N_2 'ye parçalanır. Pratikte toplam klor ihtiyacı yaklaşık 10 mg Cl_2 / mg CN^- düzeyindedir ve doğru ORP kontrolüyle %99'un üzerinde giderim, yani 0,5 mg/L altı çıkış elde edilir.

Krom indirgeme ($\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$):

Asidik ortamda, pH 2–3'te sodyum metabisülfid ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) ya da bisülfid ile, ORP 250 mV altına çekilerek 15–30 dakikada Cr^{6+} 0,1 mg/L altına indirilir. Ardından krom, üç değerlikli haliyle alkali pH'ta çöktürülür.

Çöktürme - işin ustalık isteyen kısmı:

Burada acemiye ustadan ayıran şey şudur: her metalin minimum çözünürlük pH'ı farklıdır, dolayısıyla tek bir pH ile kanışık metalli bir atıksuyun hepsini birden gideremezsiniz. Aşağıdaki pencere, yıllarca öğrendiğimiz kritik tuzakları da içerir:

Metal Metal	Optimum Çöktürme pH Optimum Çöktürme pH	Mühendis Notu Mühendis Notu
Krom (Cr³⁺) Chromium (Cr³⁺)	7,5 – 8,5	pH > 12’de yeniden çözünür (amfoter) Becomes soluble again at pH > 12 (amphoteric).
Çinko (Zn²⁺) Zinc (Zn²⁺)	8,5 – 9,2	Dar pencere! pH > 10,5’te çözünür; NH ₄ ⁺ çöktürmeyi engeller Narrow operating window! It becomes soluble above pH 10.5; NH ₄ ⁺ inhibits precipitation.
Bakır (Cu²⁺) Copper (Cu²⁺)	8,5 – 9,5	Geniş ve güvenli aralık Wide and safe operating range
Nikel (Ni²⁺) Nickel (Ni²⁺)	9,0 – 10,0	Yüksek pH gerektirir; ayrı toplanırsa geri kazanılır Requires high pH; if collected separately, it can be recovered.
Kadmilyum (Cd²⁺) Cadmium (Cd²⁺)	10,0 – 11,0	Düşük seviyede sülfür çöktürme daha güvenli Sulphide precipitation is safer at low levels.

Bu tabloya üç uyarı eklerim: (1) Amonyum (NH₄⁺), çinkoyu kompleks yaparak çöktürmeyi fiilen durdurur çinkolu atıksuda amonyum mutlaka kontrol edilmelidir. (2) EDTA gibi şelat yapıcılar metali kısıp tutar; pH 2 altına inilerek parçalanmaları, gerekirse CaCl₂ ile şelat kapasitesinin kırılması gerekir. (3) Üç değerlikli krom banyolarında kobalt varlığında, alkali ortamda Cr³⁺ tekrar Cr⁶⁺’ya yükseltgenebilir; kobalt önceden sülfürle giderilmelidir. Bunlar kitapta küçük dipnotlardır ama sahada bir tesisin deşarjını tutturup tutturamayacağını belirleyen ayrıntılardır.

Çöktürme sonrası berraklaştırmada klasik çökeltim yerine mikrofiltrasyon (MF) membran kullanmak, hem yer ihtiyacını yaklaşık yarıya indirir hem de çıkış kalitesini bambaşka bir düzeye taşır: endüstriyel verilerde MF çıkışında nikel 0,15 mg/L, toplam krom 0,1 mg/L, AKM 1 mg/L altına iner. Bu, hem SKKY Tablo 15’in çok altında bir çıkış hem de bir sonraki adımın geri kazanımın kapısıdır.

Çıkışta İnce Arıtma: Kum, Aktif Karbon, Zeolit ve Reçine

Çıkış suyunu hem mevzuat sınırlarının çok altına çekmek hem de yeniden kullanıma uygun hale getirmek için, biz çoğu tesiste pahalı nanofiltrasyona (NF) gerek kalmadan, kademeli bir ince arıtma bir nevi cila treni tercih ediyoruz. Her katmanın net bir görevi vardır:

- **Kum filtresi:** Çöktürme veya membran sonrası kalan askıdaki katıları tutar; arkadan gelen aktif karbon ve reçine ünitelerini erken tıkanmaya karşı korur. Sistemin emniyet süzgecidir.
- **Aktif karbon:** Kalan organik yükü, KOİ’yi, rengi ve eser organik bileşikleri adsorplar. Yağ alma banyolarından ve banyo katkı maddelerinden gelen organikler için kritiktir; reçineyi de organik kirlenmeden korur.
- **Zeolit:** Yüksek katyon değişim kapasitesiyle eser ağır metalleri ve amonyumu tutar. Düşük maliyetli, dayanıklı ve

I would add three key warnings to this table: (1) Ammonium (NH₄⁺) forms complexes with zinc and effectively prevents precipitation; therefore, ammonium must be strictly controlled in zinc-containing wastewater. (2) Chelating agents such as EDTA bind metals strongly and keep them in solution; they must be degraded by lowering the pH below 2, and if necessary, their chelating capacity should be broken using CaCl₂. (3) In trivalent chromium baths, in the presence of cobalt, Cr³⁺ may be re-oxidized to Cr⁶⁺ under alkaline conditions; cobalt must therefore be removed in advance using sulphide treatment. These are minor footnotes in textbooks, but in practice they are the details that determine whether a facility can meet its discharge limits.

After precipitation, using microfiltration (MF) membranes instead of classical sedimentation reduces space requirements by approximately half and significantly improves effluent quality. Industrial data show that MF effluent can achieve nickel levels below 0.15 mg/L, total chromium below 0.1 mg/L, and TSS below 1 mg/L. This is well below SKKY Table 15 limits and also opens the door to the next stage: recovery.

Polishing Treatment: Sand, Activated Carbon, Zeolite, and Resins

To reduce effluent concentrations well below regulatory limits and make the water suitable for reuse, we typically prefer a staged polishing train—essentially a “finishing line”—instead of expensive nanofiltration (NF). Each layer has a distinct function:

Sand filter: Removes residual suspended solids after precipitation or membrane treatment; protects downstream activated carbon and resin units from early fouling. It acts as the system’s safety barrier.

Activated carbon: Adsorbs remaining organic load, COD, color, and trace organic compounds. It is critical for removing residues from degreasing baths and bath additives and also protects the resin from organic contamination.

Zeolite: With high cation exchange capacity, it captures trace heavy metals and ammonium. It is a low-cost, durable, and regenerable polishing stage.

Ion exchange resin (optional final step): Reduces metals to below 0.1 mg/L and upgrades water quality to a level suitable for rinsing or process reuse. Selective resins also enable recovery of valuable metals such as nickel during regeneration.

This configuration provides a robust and easily maintainable solution that ensures both regulatory compliance and water reuse for most plating facilities, without the capital and maintenance burden of nanofiltration systems. For plants targeting higher recovery rates and near-total water circulation, this train can be completed with reverse osmosis (RO), which brings us to the core topic: recovery.

Wastewater Is No Longer Waste—It Is a Resource

This is the most exciting part of the system. Properly treated plating wastewater is not a disposal burden; it is a source of reusable water and recoverable metals. When reverse osmosis (RO) is added after MF, 60–80% of the wastewater can be returned to the process as rinsing and process water. In zero liquid discharge (ZLD) systems, the configuration becomes: pretreatment ► MF ► activated carbon ► RO ► evaporator/crystallizer for concentrate. In this way, no liquid leaves the facility; only solid residues remain for disposal.

Metals themselves are also valuable. Separately collected nickel, copper, and chromium streams can be recovered via ion exchange and electrowinning. For gold and silver, recovery from cyanide streams is already an economic necessity. Thus, the same system that ensures regulatory compliance simultaneously reduces water consumption, chemical usage, and metal losses.

It is essential to evaluate costs not only in terms of capital expenditure, but through a 5–10 year total cost of ownership (TCO), including water, chemicals, discharge penalties, and recovered metal value. In many cases, recovery systems effectively pay for themselves within this framework.

The Emerging Horizon: Less Chemistry, More Recovery

The sector continues to evolve. Three emerging directions in the literature are worth highlighting:

Graphene oxide (GO)-based selective membranes promise to separate and recover chromium and nickel from mixed-metal wastewater with efficiencies above 95%. Boron-doped diamond (BDD) electrodes enable cyanide destruction without chemicals, relying solely on electrical oxidation to convert it into CO₂ and N₂. Nanoscale zero-valent iron (nZVI) reduces Cr⁶⁺ within 30 minutes instead of hours. Although these technologies are still at pilot scale, they are likely to become standard as metal prices rise and water scarcity increases. Combined with automation and intelligent dosing, the circular economy is becoming not a slogan, but an engineering reality.

rejenere edilebilir bir cila katmanıdır.

• **İyon değişim reçinesi (opsiyonel son adım):** Metalleri 0,1 mg/L'nin de altına indirir ve suyu durulama/proses suyu olarak geri kullanılabilir kaliteye taşır. Seçici reçineler ayrıca nikel gibi değerli metalleri rejenerasyon sırasında geri kazanma imkânı sunar.

Bu dizilim; nanofiltrasyonun yatırım ve membran yenileme maliyetine girmeden, çoğu kaplama tesisi için hem mevzuat uyumunu hem de geri kullanımı sağlayan, sağlam ve bakımı kolay bir çözümdür. Daha yüksek geri kazanım hedefleyen, suyunu tümüyle döndürmek isteyen tesislerde ise bu treni ters ozmoz ile taçlandırırız — ki bizi yazının asıl meselesine, geri kazanıma getirir.

Atıksu Artık Bir Atık Değil, Bir Kaynaktır

İşin beni en çok heyecanlandıran kısmı burası. Doğru antılmış kaplama atıksuyu, çöpe giden bir yük değil; geri kazanılacak su ve metal demektir. MF çıkışının ardına ters ozmoz (RO) eklediğinizde, atıksuyun %60–80'ini proses ve durulama suyu olarak hatta geri döndürebilirsiniz. Sıfır sıvı deşarj (ZLD) hedefleyen tesislerde zincir şu hale gelir: ön arıtma ► MF ► aktif karbon ► RO ► konsantre için evaporatör/kristalizatör. Böylece tesisten dışarı sıvı çıkmaz; geriye yalnızca bertaraf edilecek katı kalır.

Suyun yanında metalin kendisi de değerlidir. Aynı toplanan nikel, bakır ve krom akımları iyon değişimi ve elektrokazanım (electrowinning) ile geri kazanılabilir; altın ve gümüş için siyanür hattından geri kazanım zaten ekonomik bir zorunluluktur. Yani aynı sistem, bir yandan sizi mevzuata uygun hale getirirken bir yandan su faturanızı, kimyasal maliyetinizi ve metal kaybınızı azaltır.

Maliyeti yalnızca yatırım bedeliyle değil; su, kimyasal, deşarj cezası ve geri kazanılan metal kalemleriyle birlikte, 5–10 yıllık toplam sahip olma maliyeti (TCO) ile değerlendirin. Geri kazanım, bu denklemde çoğu zaman sistemi kendi parasını öder hale getirir.

Yaklaşan Ufuk: Daha Az Kimyasal, Daha Çok Geri Kazanım

Sektörümüz yerinde durmuyor. Literatürde olgunlaşan üç yönelimi yakından izliyoruz: grafen oksit (GO) esaslı seçici membranlar, karışık metalli atıksudan kromu ve nikeli ayrı ayrı, %95'in üzerinde verimle geri kazanma sözü veriyor. Bor katkılı elmas (BDD) elektrotlar, siyanürü hiç kimyasal kullanmadan, yalnızca elektrikle CO₂ ve N₂'ye parçalıyor. Nano sıfır değerlikli demir (nZVI) ise Cr⁶⁺ indirgemisini saatlerden 30 dakikaya çekiyor. Bu teknolojiler henüz pilot ölçekte; ama metal fiyatları yükseldikçe ve su kısıtlandıkça, yarının standart çözümleri arasında olacaklar. Üzerine eklenen otomasyon ve akıllı dozlama ile birlikte, döngüsel ekonomi artık bir slogan değil, mühendislik pratiği haline geliyor.

Global Outlook: Standards Are Tightening

Wastewater treatment systems should not be designed solely according to today's national regulations, but with future trends in mind. The European Union's discharge limits for the surface treatment sector are already stricter than many of the current Turkish SKKY limits in several parameters. For exporters integrated into global supply chains, these limits effectively represent future domestic standards:

Parametre Parameter	Türkiye (SKKY) Türkiye (SKKY)	AB EU	ABD (EPA) ABD (EPA)
Toplam Krom (mg/L) Total Chromium (mg/L)	2	1	2,77
Cr ⁶⁺ (mg/L) Cr ⁶⁺ (mg/L)	0,5	0,1	0,32
Nikel (mg/L) Nickel (mg/L)	3	2	3,98
Bakır (mg/L) Copper (mg/L)	3	2	3,38
Çinko (mg/L) Zinc (mg/L)	5	2	2,61
Siyanür (toplam, mg/L) Cyanide (total, mg/L)	1	0,5	1,20

(The table to be inserted) The comparison clearly shows that the EU applies significantly stricter limits for chromium and cyanide. A facility that already recovers water and achieves effluent levels below these thresholds today will not be caught unprepared when regulations tighten tomorrow—in fact, it will gain a competitive advantage.

Conclusion: A Threefold Gain Through Proper Design

In metal finishing, wastewater treatment is not a cost when properly designed; it is a threefold gain. You ensure regulatory compliance and protect your reputation, reduce operating costs by recovering water and metals, and future-proof your facility against increasingly strict environmental requirements. The key is not expensive equipment, but an engineering mindset that separates streams correctly, sequences chemistry properly, and treats wastewater as a resource from the very beginning.

Within the TÜYİDER framework, we are in a strong position to drive this transformation across the industry. At GESU, with our combined role as both manufacturer and process engineer, we believe this: the facility that manages water best is not only investing in the environment, but also in its own competitiveness. Water is becoming scarce; the winners will be those who clean it and reuse it.

Küresel Pencere: Standartlar Sıkılaşıyor

Bu işi yalnızca bugünün Türkiye mevzuatına göre değil, gittiğimiz yöne bakarak tasarlamak gerekir. Avrupa Birliği'nin yüzey işlem sektörü için öngördüğü deşarj sınırları, birçok metalde bizim SKKY değerlerimizden daha sıkıdır. İhracat yapan, küresel tedarik zincirine eklemlenen bir kaplamacı için bu sınırlar, yarının kendi sınırlarıdır:

Tablo açıkça gösteriyor: AB, krom ve siyanürde bizden belirgin biçimde daha katıdır. Suyunu geri kazanan, çıkışını bugünden bu sıkı değerlerin altına çeken bir tesis, yarın kural değiştiğinde hazırlıksız yakalanmaz — tam tersine, rakibinin önünde olur.

Sonuç: Doğru Tasarım, Üç Yönlü Kazanç

Metal kaplamada atıksu arıtma; doğru kurgulandığında bir maliyet değil, üç yönlü bir kazançtır. Mevzuata uyarsınız, itibarınızı korursunuz; suyu ve metali geri kazanarak tasarruf edersiniz; ve giderek sıkılaştan çevre baskısına karşı tesisinizi geleceğe hazırlarsınız. Bunun anahtarı pahalı kutular değil; akımları doğru ayıran, kimyayı doğru sıraya koyan ve atıksuyu en baştan bir kaynak olarak gören bir mühendislik yaklaşımıdır.

TÜYİDER çatısı altında bir araya gelen bizler, bu dönüşümü sektörümüze taşıyacak konumdayız. GESU olarak hem imalatçı hem prosesçi kimliğimizle inancımız şudur: suyu en iyi yöneten tesis, sadece çevreye değil, kendi rekabet gücüne de yatırım yapmış olur. Su azalıyor; kazanan, onu temizleyip yeniden kazanan olacak.