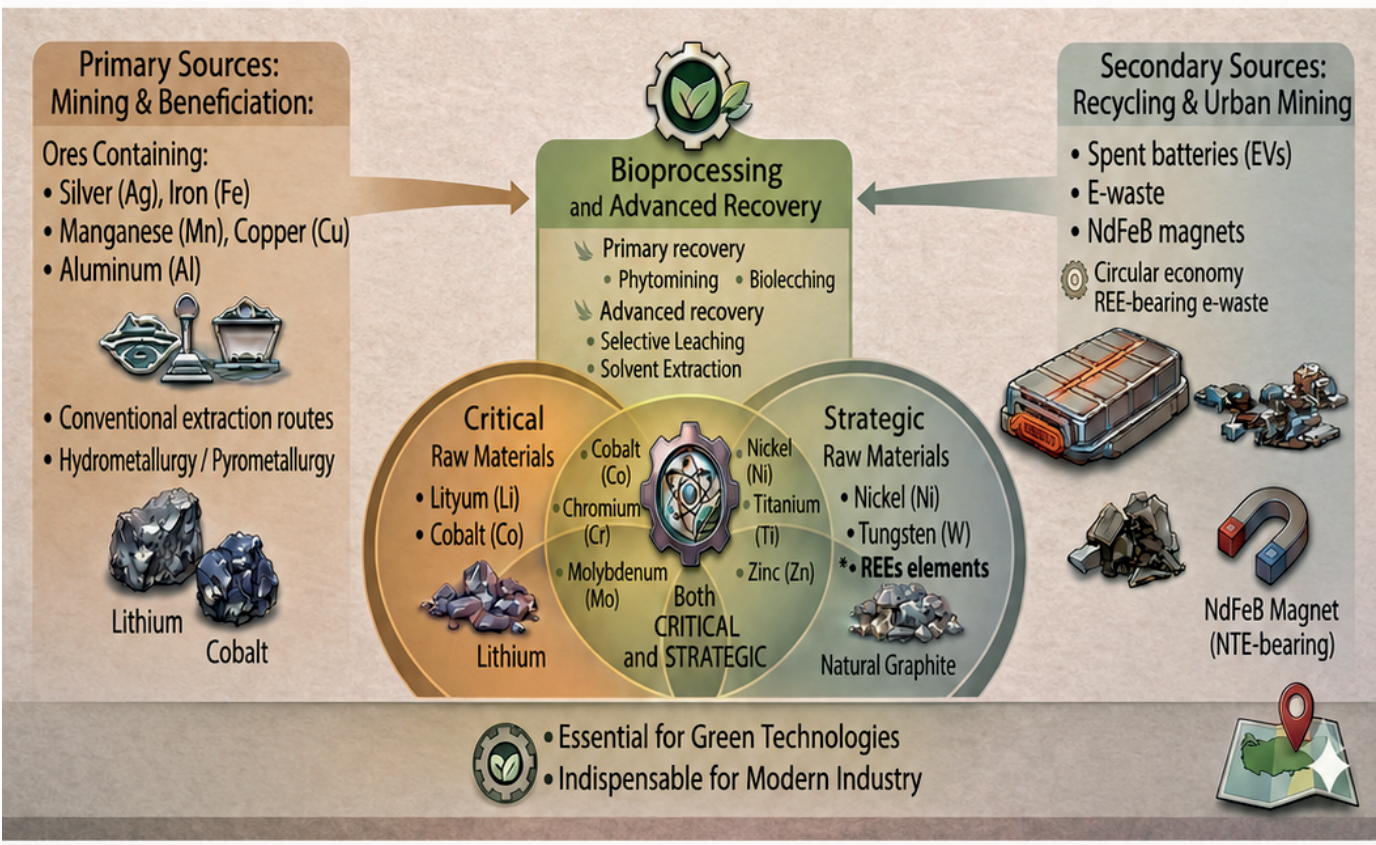
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

KRİTİK METALLERİN ve NTE'LERİN BİRİNCİL ve İKİNCİL KAYNAKLARDAN GERİ KAZANIMI ÇALIŞTAYI

Recovery of Critical Metals and REEs from Primary and Secondary Sources Workshop

SONUÇ KİTAPÇIĞI



2026
GÜMÜŞHANE

Kritik Metallerin ve NTE'lerin Birincil ve İkincil Kaynaklardan Geri Kazanımı Çalıştayı

Workshop on Recovery of Critical Metals and REEs from Primary and Secondary Sources

14 – 15 NİSAN 2026

GÜMÜŞHANE / TÜRKİYE

EDİTÖRLER:

Dr. Cavit KUMAŞ
Gümüşhane Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü
Gümüşhane – TÜRKİYE

Dr. İlker ERKAN
Gümüşhane Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü
Gümüşhane – TÜRKİYE

Dr. Şener ALİYAZICIOĞLU
Gümüşhane Üniversitesi
Maden Mühendisliği Bölümü
Gümüşhane – TÜRKİYE

ONUR KURULU

Prof. Dr. Oktay YILDIZ

(Gümüşhane Üniversitesi Rektörü)

Prof. Dr. Mehmet MERDAN

(Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanı)

Doç. Dr. Mehmet Akif GÜNEN

(Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekan Yardımcısı)

Doç. Dr. Kaşif Furkan ÖZTÜRK

(Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekan Yardımcısı)

DÜZENLEME KURULU

Dr. Cavit KUMAŞ

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Dr. İlker ERKAN

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Dr. Şener ALİYAZICIOĞLU

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Dr. Turan UYSAL

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Arş. Gör. Salih SIVIRCIK

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Arş. Gör. Cihat Can YURTSEVER

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

Arş. Gör. Mert MERAL

(Gümüşhane Üniversitesi Maden Müh. Bölümü)

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ **6**

FOREWORD **7**

AÇILIŞ KONUŞMASI **8**

WELCOME SPEECH **10**

Kırmızı Çamurdan Nadir Toprak Elementlerinin Kazanımı **13**
Extraction of Rare Earth Elements from Red Mud 14

Nadir Toprak Mıknatıslarından Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı **16**
Recovery of Rare Earth Elements from Rare Earth Magnets 17

Endonezya'da Birincil Kaynaklardan Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı ve Ekstraksiyonu **19**
Recovery and Extraction of Rare Earth Elements from Primary Sources in Indonesia 20

Endonezya'da İkincil Kaynaklardan Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı ve Ekstraksiyonu **22**
Recovery and Extraction of Rare Earth Elements from Secondary Sources in Indonesia 23

NTE'lerin Absorpsiyonu İçin Alternatif Bir Teknik Olarak Fitoremediasyon Yaklaşımı **25**
Phytoremediation Approach as an Alternative Technique to Absorb REEs 26

Endonezya'da Karasal ve Sucul Bitkiler Kullanılarak NTE Absorpsiyonu: Bir Vaka Çalışması **28**
REEs Absorption Using a Terrestrial and Aquatic Plant in Indonesia: A Case Study 29

Sayfa No:

Kritik Metal Geri Kazanımında Biyoteknolojik Yaklaşımlar: Atık Katalizörler Üzerine Bir Vaka Çalışması 31
Biotechnological Approaches for Critical Metal Recovery: A Case Study on Spent Catalysts 32

Kritik Metal Olarak Lityum: Birincil Kaynaklardan Kazanım 34
Lithium as a Critical Metal: Extraction from Primary Sources 35

Boksit ve İlişkili Cevherlerden Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı İçin Yeni ve Sürdürülebilir Bir Proses 37
Novel Sustainable Process for the Recovery of Rare Earth Elements from Bauxite and Related Ore 38

Nadir Toprak Elementi İçeren Süperiletkenlerin Manyetik Özellikleri ve Histerezis Eğrilerinin Analizi 40
Magnetic Properties of Rare-Earth-Containing Superconductors and Analysis of Hysteresis Curves 41

Atık Lityum-İyon Pillerinden Kritik Metallerin Geri Kazanımı: Şehir Madenciliğinin Yeni Cevheri 43
Recovery of Critical Metals from Waste Lithium-Ion Batteries: The New Ore of Urban Mining 44

Arsenik: Çevresel Bir Riskten Stratejik Bir Kaynağa 46
Arsenic: From an Environmental Risk to a Strategic Resource 47

Altın İşleme Atıklarından Cıva Geri Kazanımı 49
Mercury Recovery from Gold Processing Tailings 50

SONUÇ BİLDİRGESİ 52

FINAL DECLARATION 54

ÇALIŞTAYDAN FOTOĞRAFLAR 56

ÖNSÖZ

Kritik mineraller ve Nadir Toprak Elementleri (NTE), günümüzde enerji dönüşümü, savunma sanayi, elektronik, yenilenebilir enerji sistemleri ve ileri teknoloji uygulamalarının temel bileşenleri arasında yer almakta, bu durum söz konusu hammaddelerin stratejik önemini her geçen gün artırmaktadır. Özellikle elektrikli araçlar, batarya teknolojileri, yüksek performanslı mıknatıslar, yarı iletken sistemler ve sürdürülebilir enerji altyapılarında kullanılan kritik elementlere yönelik küresel talep, yeni kaynak arayışlarını ve sürdürülebilir üretim teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir.

Bu kapsamda düzenlenen çalıştay, NTE, kritik metaller, sürdürülebilir madencilik, ikincil kaynakların değerlendirilmesi, geri dönüşüm teknolojileri, biyohidrometalurji, fitomadencilik ve ileri malzeme uygulamaları gibi güncel ve stratejik araştırma alanlarını çok disiplinli bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamıştır. Çalıştay süresince gerçekleştirilen sunumlarda; kırmızı çamur, uçucu kül, atık katalizörler, lityum-iyon piller, kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslar ve farklı endüstriyel atıkların kritik metal geri kazanımı açısından taşıdığı potansiyel kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bunun yanında birincil kaynaklardan NTE'lerin üretimi konusu da bilimsel ve teknik yönleriyle tartışılmıştır.

Çalıştayın en önemli çıktılarından biri, kritik hammaddeler alanında uluslararası akademik iş birliklerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koyması olmuştur. Özellikle Türkiye ile Endonezya arasında NTE, kritik mineraller ve sürdürülebilir metalurji alanlarında yürütülebilecek ortak araştırmaların; bilgi paylaşımı, teknoloji transferi ve insan kaynağı gelişimi açısından önemli fırsatlar sunduğu değerlendirilmiştir.

Bu sonuç kitapçığında yer alan çalışmaların, araştırmacılar, kamu kurumları, sanayi temsilcileri ve politika yapıcılar için yararlı bir başvuru kaynağı oluşturacağına inanılmaktadır. Çalıştaya katkı sunan tüm konuşmacılara, araştırmacılara, katılımcılara ve organizasyon sürecinde emeği geçen herkese teşekkür eder, bu bilimsel etkileşimin gelecekte daha kapsamlı iş birliklerine zemin hazırlamasını temenni ederiz.

Çalıştay Düzenleme Kurulu

FOREWORD

Critical minerals and Rare Earth Elements (REE) are among the fundamental components of today's energy transition, defense industry, electronics, renewable energy systems, and advanced technology applications, which increases the strategic importance of these raw materials day by day. Especially, the global demand for critical elements used in electric vehicles, battery technologies, high-performance magnets, semiconductor systems, and sustainable energy infrastructures has made the search for new resources and the development of sustainable production technologies a necessity.

In this context, the organized workshop aimed to address current and strategic research areas such as REEs, critical metals, sustainable mining, the evaluation of secondary resources, recycling technologies, biohydrometallurgy, phytomining, and advanced material applications from a multidisciplinary perspective. In the presentations delivered throughout the workshop; the potential of red mud, fly ash, waste catalysts, lithium-ion batteries, end-of-life magnets, and different industrial wastes in terms of critical metal recovery was comprehensively evaluated. In addition, the production of REEs from primary resources was also discussed with its scientific and technical aspects.

One of the most important outcomes of the workshop was that it revealed the necessity of developing international academic collaborations in the field of critical raw materials. In particular, it was evaluated that joint research that can be carried out between Türkiye and Indonesia in the fields of REEs, critical minerals, and sustainable metallurgy offers important opportunities in terms of knowledge sharing, technology transfer, and human resource development.

It is believed that the studies included in this proceedings booklet will constitute a useful reference source for researchers, public institutions, industry representatives, and policymakers. We would like to thank all speakers, researchers, participants, and everyone who contributed to the organization process for their contributions to the workshop, and we hope that this scientific interaction will pave the way for more comprehensive collaborations in the future.

Workshop Organizing Committee

AÇILIŞ KONUŞMASI

Sayın Rektörüm,
Değerli Konuklar,
Değerli Meslektaşlarım ve Katılımcılar,

Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü tarafından düzenlenen "Kritik Metallerin ve Nadir Toprak Elementlerinin Birincil ve İkincil Kaynaklardan Geri Kazanımı" başlıklı çalıştayımıza hoş geldiniz.

Öncelikle, koordinatörlüğünü yürütme ayrıcalığına sahip olduğum TÜBİTAK 2221 programı kapsamında üniversitemizi ziyaret eden Prof. Dr. Widi Astuti ve Dr. Hendra Prasetia'ya içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Kendilerini ağırlamaktan onur duyuyor ve bu çalıştaya katkılarına büyük değer veriyoruz.

Üniversitemize hoş geldiniz.
Selamat datang, Prof. Widi Astuti dan Dr. Hendra Prasetia.

Ayrıca, bu iki gün boyunca birincil ve ikincil kaynakların yanı sıra biyoliç, fitomadencilik, geri dönüşüm ve kentsel madencilik gibi yenilikçi yaklaşımları ele alan değerli araştırmalarını bizlerle paylaşacak olan tüm kıymetli konuşmacılarımıza teşekkür etmek isterim.

Değerli katılımcılar,

Bugün ele alacağımız kritik ve stratejik elementler, günümüz teknolojisinin ilerlemesinde ve sürdürülebilir endüstriyel büyümenin sağlanmasında temel bir rol oynamaktadır. Bu elementler; telekomünikasyon, yenilenebilir enerji, elektrikli ulaşım ve savunma sistemleri gibi hayati sektörlerde kullanılmaktadır. Bu kaynaklar olmadan, ileri teknolojilerin gelişimini mümkün kılan küresel tedarik zincirlerinin ciddi kısıtlamalarla karşılaşacağı açıktır. Kısacası, ceplerimizdeki akıllı telefonlardan gezegenimizin yörüngesinde dönen uydulara kadar bu elementler, modern yaşam ve teknolojik ilerleme için vazgeçilmezdir.

Son yıllarda, farklı mineral ve element gruplarıyla ilgili kavramlar giderek daha fazla önem kazanmıştır. Bu bağlamda, nadir toprak elementleri, kritik mineraller ve stratejik hammaddeler gibi terimler akademik ve politika geliştirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kavramlar arasındaki ayrım temel olarak ekonomik önemlerine, ulusal güvenlikle bağlantılarına ve ülkelerin küresel tedarik zincirlerindeki konumlarına dayanmaktadır.

Kritik hammaddeler genel olarak yüksek tedarik riskiyle ilişkili kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Bu kaynakların teminindeki kesintiler veya ani fiyat dalgalanmaları, endüstriyel üretim ve daha geniş kapsamlı ekonomik istikrar açısından önemli zorluklar oluşturabilir. Buna karşılık, stratejik hammaddeler ulusal güvenlikten uzun vadeli ekonomik rekabet gücüne kadar uzanan geniş bir öneme sahiptir. Bu hammaddeler, sivil kullanım alanlarının yanı sıra ileri imalat ve savunma teknolojilerinde de doğrudan ve vazgeçilmez bir rol oynamaktadır.

Bu ayrımın küresel literatürde de görüldüğü üzere ulusal bakış açılarına göre değiştiği açıktır. Önemli mineral kaynaklarına sahip ülkeler, bu malzemeleri çoğunlukla stratejik üstünlük sağlama aracı olarak değerlendirmektedir. Buna karşılık, teknolojik açıdan gelişmiş ancak kaynaklara bağımlı ekonomiler konuya öncelikle tedarik açısından yaklaşmakta ve bu nedenle "kritik" terimini tercih etmektedir.

Örneğin Çin, nadir toprak elementleri piyasasında baskın bir konuma sahipken Şili, dünyanın en büyük bakır üreticisidir. Benzer şekilde, Güney Afrika ve Rusya gibi ülkeler platin grubu elementlerin önde gelen küresel üreticileri arasında yer almaktadır. Bu örnekler, hammadde kaynaklarının mevcudiyetinin ulusal stratejileri nasıl şekillendirdiğini ve küresel tedarik dinamiklerini nasıl etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Bir diğer önemli kavram ise nadir toprak elementleridir (NTE). Bu elementler, lantanit serisinin yanı sıra skandiyum ve itriyumdan oluşmaktadır.

Sıkça sorulan bir soru şudur: Bu elementler gerçekten nadir midir?

Aslında, jeolojik bollukları bakımından sanıldığı kadar nadir değillerdir. Aksine, ekonomik ve teknolojik açıdan işlenmeleri güç olduğu için "nadir" olarak adlandırılırlar. Benzer kimyasal özellikleri nedeniyle bunların ayrılması ve saflaştırılması karmaşık ve maliyetli süreçler gerektirir. Ayrıca, işleme sırasında radyoaktif bileşenlerin varlığı ve bununla ilişkili atık yönetimi zorlukları, ek çevresel hususları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla bu elementlerin kritik önemi, nadir olmalarından değil, verimli üretim ve ayrıştırma için gerekli ileri teknolojilere yalnızca sınırlı sayıda ülkenin sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu bağlamda, çalıştayımızın birincil kaynaklardan geri kazanım ve kullanım ömrünü tamamlamış bataryalar ile NdFeB mıknatıslar gibi ikincil kaynaklardan sürdürülebilir yöntemlerle metal kazanımı olmak üzere iki temel odağı, döngüsel ekonomiye geçişi desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Konuşmamı tamamlamadan önce, bu çalıştayın düzenlenmesine katkıda bulunan herkese içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Özellikle güçlü destekleri için üniversite yönetimimize, bu etkinliğin gerçekleştirilmesindeki değerli katkıları ve sürekli destekleri için Bölüm Başkanımız Dr. İlker Erkan'a ve Bölüm Başkan Yardımcımız Dr. Şener Aliyazıcıoğlu'na teşekkür etmek isterim.

Ayrıca, yaklaşık üç yıl önce tanıştığım Prof. Dr. Widi Astuti'ye ve araştırma ekibine özel teşekkürlerimi sunmak isterim. Bir yıllık doktora sonrası araştırma sürecim boyunca ekibinin bir parçası olmama olanak tanıdığı için Prof. Dr. Widi Astuti'ye ve bu süre boyunca sağladığı paha biçilmez destek için Dr. Hendra Prasetia'ya içtenlikle minnettarım. Bunun yanı sıra, TÜBİTAK 2221 programı kapsamında bu çalıştaya değerli katılımları ve katkıları için her ikisine de bir kez daha içten teşekkürlerimi ifade etmek isterim.

Bu değerlendirmeler ışığında, bu çalıştayın kritik metaller ve nadir toprak elementleri alanında bilimsel tartışma, bilgi alışverişi ve yeni iş birliklerinin geliştirilmesi için değerli bir platform sağlayacağına yürekten inanıyorum.

Katılımınız için hepinize teşekkür ediyor, verimli ve başarılı bir çalıştay geçirmenizi diliyorum.

Dr. Cavit KUMAŞ

WELCOME SPEECH

Honorable Rector,

Distinguished Guests,

Dear Colleagues and Participants,

Welcome to our workshop titled

"Recovery of Critical Metals and Rare Earth Elements from Primary and Secondary Sources,"

organized by the Department of Mining Engineering at Gümüşhane University.

First of all, I would like to express my sincere gratitude to Prof. Dr. Widi Astuti and Dr. Hendra Prasetia, who are visiting our university within the scope of the TÜBİTAK 2221 program, which I have the privilege to coordinate. We are honored to host them and greatly value their contributions to this workshop.

Welcome to our university.

Selamat datang, Prof. Widi Astuti dan Dr. Hendra Prasetia.

I would also like to thank all our esteemed speakers who will share their valuable research over the course of these two days, covering both primary and secondary resources, as well as innovative approaches such as bioleaching, phytomining, recycling, and urban mining.

Dear participants,

The critical and strategic elements we will address today constitute the foundation of contemporary technological advancement and sustainable industrial growth. Their applications span vital sectors, including telecommunications, renewable energy, electric mobility, and defense systems. It is important to recognize that without these resources, the global supply chains underpinning advanced technologies would face significant constraints. In short, from the smartphones in our pockets to the satellites orbiting our planet, these elements are truly indispensable.

In recent years, concepts related to different groups of minerals and elements have gained increasing prominence. In this context, terms such as rare earth elements, critical minerals, and strategic raw materials are widely used in academic and policy discussions. The distinction between these concepts is primarily based on their economic significance, their links to national security, and countries' positions within global supply chains.

Critical raw materials are generally defined as resources associated with a high supply risk. Disruptions in their availability or sudden price volatility may pose significant challenges to industrial production and broader economic stability. Strategic raw materials, by contrast, have a wider sphere of influence, extending from national security considerations to long-term economic competitiveness. In addition to their civilian applications, they play a direct and indispensable role in advanced manufacturing and defense-related technologies.

It is also evident in the global literature that this distinction varies according to national perspectives. Countries endowed with substantial mineral resources often regard these materials as

instruments of strategic leverage. Conversely, technologically advanced yet resource-dependent economies tend to approach the issue primarily from a supply-side perspective and therefore favor the term "critical." For example, China holds a dominant position in the rare earth elements market, while Chile is the world's largest producer of copper. Similarly, countries such as South Africa and Russia are among the leading global producers of platinum group elements. These examples clearly illustrate how the availability of mineral resources shapes national strategies and influences global supply dynamics.

Another important concept is rare earth elements (REEs). These elements consist of the lanthanide series, along with scandium and yttrium.

A frequently asked question is: Are these elements truly rare?

In fact, they are not necessarily rare in terms of geological abundance. Rather, they are termed "rare" because they are difficult to process economically and technologically. Due to their similar chemical properties, their separation and purification require complex and costly processes. Furthermore, the presence of radioactive components during processing, along with associated waste management challenges, introduces additional environmental considerations. Therefore, their critical importance lies not in their scarcity but in the fact that only a limited number of countries possess the advanced technologies required for their efficient production and separation.

In this context, the workshop's dual focus on the recovery of metals from primary resources and their sustainable extraction from secondary sources, such as spent batteries and NdFeB magnets, is of great importance in supporting the transition toward a circular economy.

Before concluding, I would like to express my sincere appreciation to all those who contributed to organizing this workshop. I would especially like to thank our university administration for their strong support, as well as our Head of Department, Dr. İlker Erkan, and our Vice Head of Department, Dr. Şener Aliyazıcıoğlu, for their valuable contributions and continuous support in making this event possible.

I would also like to extend my special thanks to Prof. Dr. Widi Astuti and her research team, whom I met approximately 3 years ago. I am deeply grateful to Prof. Dr. Widi Astuti for allowing me to be part of her team during my one-year postdoctoral research period, and to Dr. Hendra Prasetia for the invaluable support he provided throughout this time. Furthermore, I would like to once again express my sincere thanks to both of them for their valuable participation in and contributions to this workshop under the TÜBİTAK 2221 program.

In light of these perspectives, I firmly believe that this workshop will provide a valuable platform for scientific discussion, knowledge exchange, and the development of new collaborations in the field of critical metals and rare earth elements.

Thank you all for your participation, and I wish you a productive and successful workshop.

Dr. Cavit KUMAŞ




TÜBİTAK
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
Recovery of Critical Metals and REEs from Primary and Secondary Sources Workshop
TÜBİTAK
BRIN

Kırmızı Çamurdan Nadir Toprak Elementlerinin Kazanımı

Dr. Cavit Kumaş

Kırmızı çamur (boksit artığı), Bayer prosesi ile alümina üretimi sırasında ortaya çıkan ve yüksek miktarlarda üretilen endüstriyel bir atık olup, içerdiği değerli elementler nedeniyle önemli bir ikincil kaynak potansiyeline sahiptir. Alümina üretiminde her 1 ton ürün için yaklaşık 1–2,5 ton kırmızı çamur oluşması, bu malzemenin küresel ölçekte ciddi bir çevresel problem haline gelmesine neden olmaktadır. Günümüzde toplam kırmızı çamur birikimi yaklaşık 4 milyar ton seviyesine ulaşmıştır ve 2040 yılına kadar bu miktarın 8 milyar tonu aşması beklenmektedir.

Kırmızı çamurun yüksek alkalinitesi (pH 10–12,5) çevresel riskleri artırmakta, depolama, sızıntı ve olası baraj kazaları gibi durumlarda ciddi ekolojik ve sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Nitekim 2010 yılında Macaristan'da gerçekleşen Ajka kırmızı çamur felaketi, bu tür atıkların yanlış yönetiminin yaratabileceği etkileri açıkça ortaya koymuştur. Bununla birlikte, kırmızı çamur yalnızca bir atık değil, demir, alüminyum, titanyum ve özellikle nadir toprak elementleri (NTE) açısından zengin bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir.

Kırmızı çamur içerisinde seryum, lantanyum, neodimyum, itriyum ve özellikle skandiyum gibi kritik elementler ppm seviyelerinde bulunmakla birlikte, oluşan büyük hacimler bu kaynağı ekonomik açıdan cazip hâle getirmektedir. Özellikle skandiyum, havacılık alaşımları, katı oksit yakıt hücreleri ve ileri malzemeler gibi yüksek katma değerli uygulamalarda kullanılmakta olup, arz-talep dengesizliği nedeniyle stratejik bir element olarak öne çıkmaktadır. Dünyanın çeşitli bölgelerindeki kırmızı çamurda bulunan skandiyum konsantrasyonu, literatürde ekonomik sınır değerleri olan 20–50 ppm değerlerini aşmaktadır.

Kırmızı çamurdan NTE geri kazanımında çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Asit liçi en yaygın yöntem olmakla birlikte düşük seçicilik, yüksek asit tüketimi ve silika jel oluşumu gibi dezavantajlara sahiptir. Yüksek basınçlı liç yöntemleri yüksek geri kazanım verimleri sunarken, proses karmaşıklığı ve maliyet açısından sınırlamalar içermektedir. Sülfatlayıcı kavurma gibi ön işlemler, seçiciliği artırarak daha verimli çözümler sunabilmektedir. Ayrıca iyonik sıvılar ile ekstraksiyon ve biyoliç gibi alternatif yaklaşımlar, daha çevreci ve seçici prosesler geliştirme potansiyeli taşımaktadır.

Sonuç olarak, kırmızı çamur hem çevresel bir yük hem de önemli bir kaynak olarak değerlendirilmelidir. Artan küresel talep ve sınırlı birincil kaynaklar dikkate alındığında, bu tür ikincil kaynakların değerlendirilmesi sürdürülebilir madencilik ve döngüsel ekonomi açısından kritik öneme sahiptir. Gelecekte, proses optimizasyonu ve yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi ile kırmızı çamurun "atık" statüsünden çıkarılarak stratejik elementlerin geri kazanımında önemli bir rol oynaması beklenmektedir.

Extraction of Rare Earth Elements from Red Mud

Dr. Cavit Kumaş

Red mud (bauxite residue) is an industrial waste generated in large quantities during alumina production via the Bayer process and possesses significant potential as a secondary resource due to the valuable elements it contains. The generation of approximately 1–2.5 tons of red mud per ton of alumina produced has made this material a serious environmental issue on a global scale. Currently, the total accumulated amount of red mud is estimated to have reached approximately 4 billion tons, and this figure is expected to exceed 8 billion tons by 2040.

The high alkalinity of red mud (pH 10-12.5) increases its environmental risks and may lead to severe ecological and health-related problems in cases of storage failures, leakage, and potential dam accidents. Indeed, the Ajka red mud disaster that occurred in Hungary in 2010 clearly demonstrated the impacts that improper management of such wastes can cause. Nevertheless, red mud should not only be considered as a waste material, but also as a secondary resource rich in iron, aluminum, titanium, and particularly rare earth elements (REEs).

Red mud contains critical elements such as cerium, lanthanum, neodymium, yttrium, and especially scandium at ppm levels; however, the enormous volumes generated make this resource economically attractive. In particular, scandium is used in high value-added applications such as aerospace alloys, solid oxide fuel cells, and advanced materials, and it has emerged as a strategic element due to supply–demand imbalances. The scandium concentrations reported in red mud from various regions of the world exceed the economic threshold values of 20-50 ppm reported in the literature.

Various methods have been developed for REE recovery from red mud. Acid leaching is the most widely used method; however, it suffers from disadvantages such as low selectivity, high acid consumption, and silica gel formation. Although high-pressure leaching methods provide high recovery efficiencies, they involve limitations in terms of process complexity and cost. Pretreatment methods such as sulfation roasting can enhance selectivity and provide more efficient solutions. In addition, alternative approaches such as ionic liquid extraction and bioleaching offer the potential for developing more environmentally friendly and selective processes.

In conclusion, red mud should be regarded both as an environmental burden and as a significant resource. Considering the increasing global demand and the limited availability of primary resources, the utilization of such secondary resources is of critical importance for sustainable mining and the circular economy. In the future, through process optimization and the development of innovative technologies, red mud is expected to move beyond its "waste" status and play a major role in the recovery of strategic elements.


ACID LEACHING
Acidic Methods for Sc Recovery from Red Mud
Challenges
A wide variety of acids are used (H_2SO_4, HNO_3, HCl, H_3PO_4, as well as citric, acetic, and oxalic acids)
Selectivity is generally low (Fe, Al, Ti, Si and rare earth elements dissolve together)
Silica gel formation may occur depending on acid concentration and the Si content of the sample
High acid consumption is required (due to the inherently high alkalinity of red mud)
Successful Selective Extraction Conditions
EDTA (HCl system)
79.6% Sc Leaching
40 mL HCl / 10 g red mud / 2 g EDTA
70°C, 4 h
79.6% Sc
Fe dissolution: 6.12%
CaF_2 (H_2SO_4 system)
>98% Sc
6 M H_2SO_4 + 5% CaF_2
L/S ratio: 5 mL/g
90°C, 60 min
>98% Sc
Fe <10%, Al <3%
Ti negligible
Selectivity can be significantly improved by using EDTA (in HCl systems) and CaF_2 (in H_2SO_4 systems).


THANK YOU
SUSTAINABILITY & CIRCULAR ECONOMY
REE EXTRACTION & RECOVERY
RARE EARTH ELEMENTS (REEs
Sc
Y
La
La
Ce
Nd
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
BRIN

Nadir Toprak Mıknatıslarından Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı

Dr. Cavit Kumaş

Nadir toprak elementleri (NTE), elektronik, yenilenebilir enerji sistemleri ve savunma teknolojileri başta olmak üzere birçok ileri teknoloji uygulamasında kritik öneme sahip stratejik hammaddelerdir. Özellikle neodimyum-demir-bor (NdFeB) ve samaryum-kobalt (SmCo) esaslı kalıcı mıknatıslar, yüksek manyetik performansları sayesinde elektrikli araçlar, rüzgâr türbinleri ve hassas elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. NdFeB mıknatıslar yüksek maksimum enerji çarpımı ((BH)max yaklaşık 40–50 MGOe) ile öne çıkarken, SmCo mıknatıslar yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direnci ile tercih edilmektedir.

Son yıllarda artan talep doğrultusunda, nadir toprak mıknatıslarına olan küresel ihtiyaç hızla yükselmektedir. 2020'li yılların başında yaklaşık 200.000 ton seviyesinde olan NdFeB mıknatıs talebinin, 2030'lu yıllarda 450.000 tonun üzerine çıkması beklenmektedir. Bununla birlikte, bu elementlerin arzı sınırlı olup jeopolitik faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca, savunma sanayinde kullanılan sistemlerde yüksek miktarlarda NTE tüketimi, bu kaynakların stratejik önemini daha da artırmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir tedarik zincirlerinin oluşturulması ve geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslardan NTE geri kazanımı için farklı geri dönüşüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Doğrudan geri dönüşüm yöntemleri, mıknatısın yapısını koruyarak enerji verimliliği sağlarken, hidrometalurjik prosesler yüksek saflıkta ürün elde edilmesine olanak tanımaktadır. Pirometalurjik yöntemler ise karmaşık atıklar için uygun olmakla birlikte yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkiler gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, optimum geri dönüşüm yöntemi, verimlilik, maliyet ve çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin dengelenmesini gerektirmektedir.

Hidrometalurjik süreçler kapsamında asidik liç, çöktürme ve solvent ekstraksiyonu gibi adımlar kullanılarak NTE'ler seçici olarak geri kazanılabilmektedir. Literatürde verilen akım şemalarında liç sonrası demirin uzaklaştırılması ve NTE'lerin oksalat formunda çöktürülerek yüksek saflıkta oksitlere dönüştürülmesi yaygın bir yaklaşım olarak sunulmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıkta klorlayıcı kavurma gibi yenilikçi yöntemlerin, yüksek seçicilik ve enerji verimliliği sağlayarak %95'in üzerinde geri kazanım verimlerine ulaşabildiği görülmektedir.

Buna karşın, mevcut durumda nadir toprak mıknatıslarının geri dönüşüm oranı oldukça düşüktür ve %5'in altındadır. Sonuç olarak, nadir toprak mıknatıslarının geri dönüşümü, sürdürülebilir madencilik ve döngüsel ekonomi perspektifinde kritik bir araştırma alanıdır. Gelecekte, daha verimli, seçici ve ekonomik proseslerin geliştirilmesi ile ikincil kaynakların kullanımının artması ve NTE arz güvenliğinin sağlanması gerekmektedir.

Recovery of Rare Earth Elements from Rare Earth Magnets

Dr. Cavit Kumaş

Rare earth elements (REEs) are strategic raw materials of critical importance for numerous advanced technological applications, particularly in electronics, renewable energy systems, and defense technologies. In particular, neodymium–iron–boron (NdFeB) and samarium–cobalt (SmCo)-based permanent magnets are widely utilized in electric vehicles, wind turbines, and precision electronic devices due to their superior magnetic performance. NdFeB magnets are distinguished by their high maximum energy product ((BH)max approximately 40–50 MGOe), whereas SmCo magnets are preferred because of their high-temperature stability and corrosion resistance.

In recent years, the global demand for rare earth magnets has increased rapidly. The demand for NdFeB magnets, which was approximately 200,000 tons in the early 2020s, is expected to exceed 450,000 tons by the 2030s. However, the supply of these elements is limited and strongly influenced by geopolitical factors. Moreover, the extensive consumption of REEs in defense industry systems further enhances the strategic importance of these resources. Consequently, the establishment of sustainable supply chains and the development of recycling technologies have become essential.

Various recycling approaches have been developed for the recovery of REEs from end-of-life magnets. Direct recycling methods provide energy efficiency by preserving the structural integrity of the magnets, whereas hydrometallurgical processes enable the production of high-purity products. Pyrometallurgical methods are suitable for complex waste streams; however, they suffer from disadvantages such as high energy consumption and environmental impacts. Therefore, the optimum recycling strategy requires balancing efficiency, cost, and environmental sustainability criteria.

Within hydrometallurgical processes, REEs can be selectively recovered through steps such as acidic leaching, precipitation, and solvent extraction. Flowsheets reported in the literature commonly involve the removal of iron after leaching, followed by the precipitation of REEs in oxalate form and their subsequent conversion into high-purity oxides. In addition, innovative methods such as low-temperature chlorination roasting have demonstrated high selectivity and energy efficiency, achieving recovery efficiencies exceeding 95%.

Despite these advancements, the current recycling rate of rare earth magnets remains extremely low and is below 5%. In conclusion, the recycling of rare earth magnets represents a critical research area within the framework of sustainable mining and the circular economy. In the future, the development of more efficient, selective, and economical processes will be necessary to increase the utilization of secondary resources and ensure the security of REE supply.


Bio-Metallurgy:
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
TÜBİTAK
BRIN


THANK YOU
Critical Raw Materials Extraction
e-Waste Recycling
Rare Earth Elements Processing
Neodymium
Dysprosium
Nickel

Endonezya'da Birincil Kaynaklardan Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı ve Ekstraksiyonu

Prof. Dr. Widi Astuti

Sunumda, Endonezya'nın özellikle monazit, ksenotim ve iyon adsorpsiyon killeri gibi yerli birincil kaynaklardan nadir toprak elementleri (NTE) üretme potansiyeli ele alınmaktadır. NTE'ler; lantanitler, itriyum ve skandiyum dâhil olmak üzere toplam 17 elementi kapsamaktadır. Bu elementler genellikle düşük tenörlerde ve karmaşık mineral yapıları içerisinde bulunduklarından, madencilik ve ekstraksiyon süreçleri teknik açıdan zorludur. Kalıcı mıknatıslar, katalizörler, bataryalar, elektronik sistemler ve savunma sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle stratejik önemleri giderek artmaktadır.

Küresel ölçekte NTE üretiminde Çin baskın konumunu sürdürmekte ve dünya üretiminin büyük kısmını karşılamaktadır. Çin'i Amerika Birleşik Devletleri, Myanmar ve Avustralya izlemektedir. Endonezya henüz küresel ölçekte tanımlanmış önemli NTE rezervlerine sahip ülkeler arasında yer almamakla birlikte, bunun temel nedeni kaynak yetersizliğinden ziyade sınırlı arama faaliyetleri olarak değerlendirilmektedir. Çin, Myanmar, Tayland, Vietnam, Avustralya ve Malezya gibi NTE bakımından zengin bölgelerin Endonezya'ya yakın olması, ülkenin önemli bir jeolojik potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Endonezya'nın potansiyel NTE kaynakları arasında Bangka-Belitung bölgesindeki kalay madenciliği artıklarından elde edilen monazit ve ksenotim mineralleri, Sumatra, Sulawesi, Kalimantan ve Papua'daki iyon adsorpsiyon killeri ile kalay cürufu, nikel atıkları, boksit artıkları ve kömür uçucu külleri yer almaktadır. Sunumda teknik odak noktası ağırlıklı olarak birincil kaynaklar olmuştur.

Çalışmanın önemli bir bölümünde, Bangka'daki kalay cevheri işleme faaliyetlerinden elde edilen monazitlerden NTE ekstraksiyonu incelenmiştir. Monazit; La, Ce, Nd, Pr, Sm, Gd, Dy ve Y gibi değerli NTE'lerin yanı sıra radyoaktif toryum ve uranyum da içermektedir. Bu nedenle proseslerde dikkatli bir ayırma süreci gerekmektedir. Uygulanan akım şeması; monazitin parçalanması, fosfat ayrımı, NTE çözündürülmesi, U-Th çöktürülmesi, NTE hidroksit üretimi ve ileri saflaştırma aşamalarını kapsamaktadır. Pilot ölçekli çalışmalarda %95-99 saflıkta La oksit, Ce oksit, Nd-Pr oksit, Pr oksalat ve Y oksit üretimi gerçekleştirilmiştir.

Sunumda ayrıca, daha düşük NTE tenörlerine sahip olmalarına rağmen daha basit liç yöntemleriyle işlenebilen iyon adsorpsiyon killeri de değerlendirilmiştir. Genel olarak çalışma, Endonezya'nın yerli bir NTE değer zinciri oluşturma açısından güçlü bir potansiyele sahip olduğunu, ancak bunun için daha kapsamlı arama faaliyetleri, proses optimizasyonu ve pilot ölçek doğrulama çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

Recovery and Extraction of Rare Earth Elements from Primary Sources in Indonesia

Prof. Dr. Widi Astuti

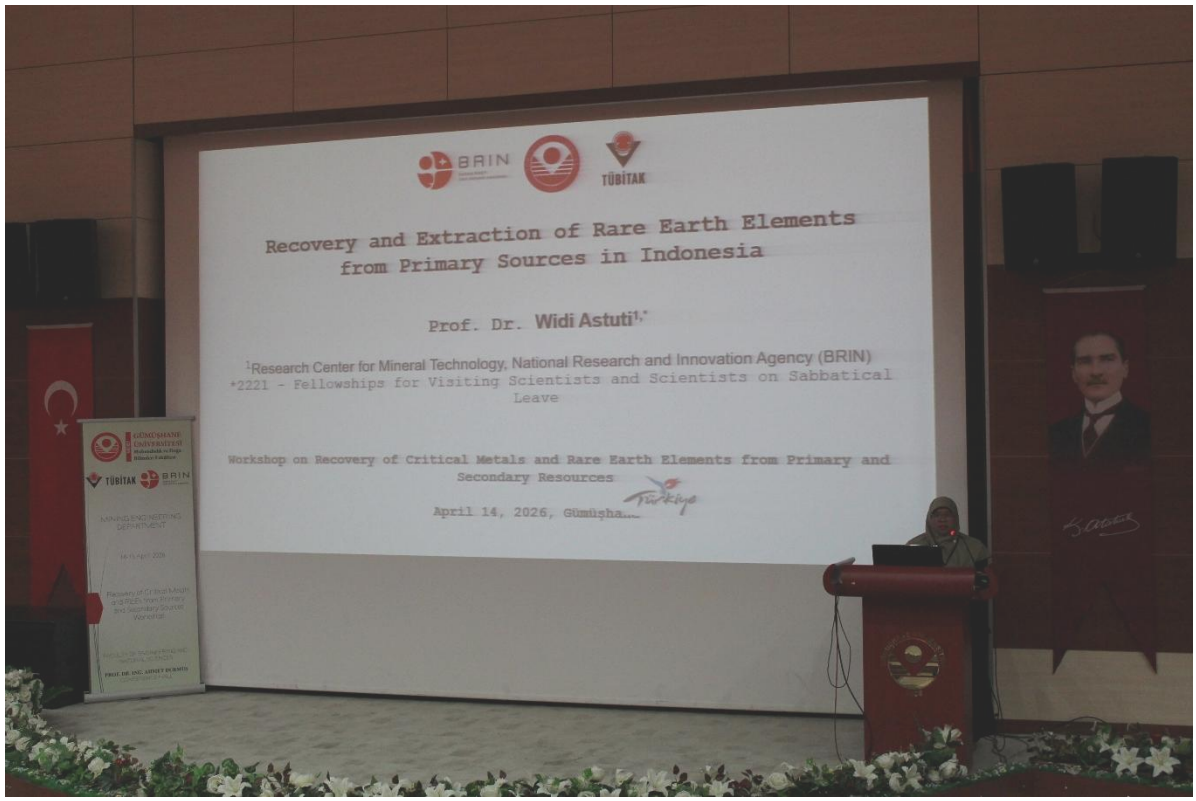
The presentation discusses Indonesia's potential to develop rare earth elements (REEs) from domestic primary resources, especially monazite, xenotime, and ion-adsorption clays. REEs consist of 17 elements, including the lanthanides, yttrium, and scandium. Although many REEs are not geologically rare, they are difficult to mine and extract because they usually occur in low concentrations and complex mineral matrices. Their strategic importance is increasing due to their use in permanent magnets, catalysts, batteries, electronics, defense technologies, and other high-value applications.

China remains the dominant producer, accounting for more than two-thirds of global production, followed by the United States, Myanmar, and Australia. Indonesia is not yet listed among countries with recognized global REE reserves, but the presentation emphasizes that this reflects limited exploration rather than absence of potential. Because REE-bearing regions such as China, Myanmar, Thailand, Vietnam, Australia, and Malaysia are geographically close to Indonesia, the country is considered to have promising geological prospects.

Indonesia's potential REE sources include monazite and xenotime from tin-mining residues in Bangka-Belitung, ion-adsorption clays in Sumatra, Sulawesi, Kalimantan, and Papua, as well as tin slag, nickel tailings, bauxite residue, coal fly ash, and urban-mining sources such as spent catalysts, batteries, and magnets. The presentation distinguishes between primary and secondary sources, with the main technical focus placed on primary sources.

A major section discusses REE extraction from Indonesian monazite, particularly from tin-ore processing in Bangka. Monazite contains valuable REEs such as La, Ce, Nd, Pr, Sm, Gd, Dy, and Y, but also contains radioactive thorium and uranium, requiring careful separation. The processing route includes monazite decomposition, phosphate separation, REE dissolution, U-Th precipitation, REE hydroxide production, and further purification. Pilot-scale work has been conducted, including a 50 kg monazite/batch process for U-Th separation and REOH production, and a 10 kg REOH input pilot plant. Products reported include La oxide, Ce oxide, Nd-Pr oxide, Pr oxalate, and Y oxide with purities generally ranging from 95% to 99%.

Ion-adsorption clays, which typically contain lower REE grades but can be processed through simpler leaching methods, are also evaluated. Indonesia is exploring IAC resources in Mamuju, Sulawesi, and Bangka-Belitung, with in-situ leaching work planned from May 2026. Overall, the presentation concludes that Indonesia has strong potential to build a domestic REE value chain, but further exploration, processing optimization, pilot-scale validation, environmental control, and downstream integration are still required.


BRIN
TÜBİTAK
Recovery and Extraction of Rare Earth Elements from Primary Sources in Indonesia
Prof. Dr. Widi Astuti[1,*]
[1]Research Center for Mineral Technology, National Research and Innovation Agency (BRIN)
*2221 - Fellowships for Visiting Scientists and Scientists on Sabbatical Leave
Workshop on Recovery of Critical Metals and Rare Earth Elements from Primary and Secondary Resources
April 14, 2026, Gümüşha...
Türkiye


Research Centre for Mineral Technology BRIN
Kawasan Sains Iskandar Zulkarnain
Jl. Ir. Sutami Km.15, Tanjung Bintang, Lampung Selatan
Lampung – INDONESIA
Email: prtpb@brin.go.id
Contact:
Prof. Dr.Eng. Widi Astuti
widi005@brin.go.id
widi.mineral@gmail.c
+62 813 1900 2393
GÜMÜSHA

Endonezya'da İkincil Kaynaklardan Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı ve Ekstraksiyonu

Prof. Dr. Widi Astuti

Sunumda, Endonezya'daki ikincil kaynaklardan nadir toprak elementlerinin (NTE) geri kazanımı ve ekstraksiyonu ele alınmakta; bu kaynakların döngüsel ekonomi, yerli kritik mineral tedariki ve temiz enerji teknolojileri açısından stratejik önemi vurgulanmaktadır. Endonezya'nın başlıca NTE içeren ikincil kaynakları arasında kalay madenciliği artıklarından elde edilen monazit ve ksenotim kalıntıları, , kalay cürufları, nikel atıkları, kırmızı çamur, kömür uçucu külleri, kullanılmış katalizörler, atık bataryalar ve kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslar yer almaktadır. Bu materyaller; La, Ce, Nd, Pr, Sm, Dy, Y, Gd ve Sc gibi önemli NTE'leri içermekte olup, element konsantrasyonları ve işlenebilirlik düzeyleri kaynak türüne ve proses geçmişine bağlı olarak değişmektedir.

Endonezya, alternatif NTE hammaddesi olarak değerlendirilebilecek önemli miktarda endüstriyel atığa sahiptir. Bunlar arasında nikel atıkları, kalay cürufları, kırmızı çamur ile kömür yakıtlı termik santrallerden kaynaklanan uçucu kül ve taban külü önemli yer tutmaktadır. Özellikle kömür uçucu külü, ülke genelinde yaygın olarak bulunması ve Y, La, Ce, Nd, Eu, Gd, Tb, Er, Ho ve Lu gibi birçok NTE içermesi nedeniyle dikkat çekici bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Sunumda ayrıca gelecekte kömür kullanımındaki artışın uçucu kül oluşumunu artırabileceği ve bu nedenle söz konusu atıkların değerlendirilmesinin hem kaynak yönetimi hem de atık minimizasyonu açısından önemli olduğu belirtilmektedir.

Sunumda, BRIN kapsamında yürütülen çeşitli araştırma çalışmalarına da yer verilmektedir. Kullanılmış FCC katalizörleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, bu materyallerin Al, Si, Ni ve Fe ile birlikte önemli miktarda lantan içerdiği ifade edilmektedir. Önerilen proses; asit liçi, katı-sıvı ayırma, çöktürme, kurutma ve kalsinasyon aşamalarını içermekte ve yüksek saflıkta lantan oksit üretimini hedeflemektedir. Proses sonrasında oluşan kalıntıların ise jeopolimer malzeme olarak yeniden kullanılabileceği belirtilmektedir.

Kömür uçucu külleri üzerine yürütülen çalışmalarda ise asidik çözündürme, alkali çöktürme ve devamında NTE ayırma-saflaştırma süreçleri incelenmektedir. XRF ve ICP-MS analiz sonuçları, Endonezya kömür uçucu küllerinin Si, Fe, Al ve Ca gibi başlıca oksitlerin yanı sıra Ce, Y, La, Nd, Sc, Pr, Sm ve Dy gibi çeşitli NTE'leri de içerdiğini göstermektedir. Ayrıca, kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslardan Nd-Pr geri kazanımı da önemli bir araştırma alanı olarak ele alınmaktadır.

Genel olarak çalışma, ikincil kaynaklardan NTE geri kazanımının birincil madenciliğe bağımlılığı azaltabileceğini, çevresel riskleri minimize edebileceğini ve stratejik teknolojiler için sürdürülebilir tedarik zincirlerini destekleyebileceğini ortaya koymaktadır.

Recovery and Extraction of Rare Earth Elements from Secondary Sources in Indonesia

Prof. Dr. Widi Astuti

The presentation discusses the recovery and extraction of rare earth elements (REEs) from secondary resources in Indonesia, emphasizing their strategic value for circular economy development, domestic critical-mineral supply, and clean-energy technologies. Indonesia's major REE-bearing secondary sources include monazite and xenotime residues from tin mining, tin slag, nickel tailings, bauxite residue/red mud, coal fly ash, spent catalysts, spent batteries, and spent magnets. These materials contain important REEs such as La, Ce, Nd, Pr, Sm, Dy, Y, Gd, and Sc, although their concentrations and readiness levels vary by source and processing history.

Indonesia has significant volumes of industrial residues that could serve as alternative REE feedstocks. Examples include nickel tailings, tin slags, red mud, and fly ash-bottom ash from coal-fired power plants. Coal fly ash is presented as especially relevant because it is widely distributed across Indonesia and contains multiple REEs, including Y, La, Ce, Nd, Eu, Gd, Tb, Er, Ho, and Lu. The presentation also notes that future coal use could increase fly ash generation, making its valorization important from both resource and waste-management perspectives.

Several BRIN-related research examples are presented. For spent fluid catalytic cracking catalysts, the material contains lanthanum along with Al, Si, Ni, and Fe. The proposed process involves acid leaching, solid-liquid separation, precipitation, drying, and calcination to produce high-purity lanthanum oxide, while the residue may be reused as geopolymer material. For coal fly ash, the research focuses on acid dissolution, alkali precipitation, and subsequent REE separation and purification. XRF and ICP-MS results show that Indonesian coal fly ash contains major oxides such as Si, Fe, Al, and Ca, as well as REEs including Ce, Y, La, Nd, Sc, Pr, Sm, Dy, and others. The extraction of Nd-Pr from spent magnets is also highlighted as important because these elements are critical for permanent magnets used in electric vehicles and wind turbines.

Overall, secondary REE recovery can reduce dependence on primary mining, minimize landfill and environmental risks, and support Indonesia's future supply chain for strategic technologies. The key message is that industrial wastes should be treated not only as environmental liabilities but also as potential domestic resources for REE recovery, recycling, and zero-waste mineral processing.


Residue
LID-LIQUID SEPARATION (FILTRATION)
Filtrate
PRECIPITATION, DRYING & CALCINATION
Lanthanum Oxide (98%)
• Coastal material construction
• Sea-wave breaker
• Geothermal area material construction


GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
TÜBİTAK
BRIN
MINING ENGINEERING DEPARTMENT
14-15 April 2026
Recovery of Critical Metals and REEs from Primary and Secondary Sources Workshop
FACULTY OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCES
PROF. DR. ING. AHMET DURMUS
CONFERENCE HALL

NTE'lerin Absorpsiyonu İçin Alternatif Bir Teknik Olarak Fitoremediasyon Yaklaşımı

Dr. Hendra Prasetia

Sunumda, fitoremediasyonun özellikle madencilik faaliyetlerinden etkilenmiş topraklar, atık depolama alanları ve asidik maden drenajı sistemleri gibi ikincil kaynaklardan nadir toprak elementleri (NTE) ve ağır metallerin uzaklaştırılmasına yönelik çevreci ve alternatif bir teknoloji olduğu ele alınmaktadır. Fitoremediasyon yalnızca çevresel iyileştirme yöntemi olarak değil, aynı zamanda kirlenmiş biyokütleden NTE geri kazanımına olanak sağlayabilecek potansiyel bir fitomadencilik stratejisi olarak değerlendirilmektedir. Temel yaklaşım, seçilmiş bitki türlerinin NTE ve ağır metalleri dokularında absorbe edebilmesi, biriktirebilmesi ve bu elementlere tolerans gösterebilmesine dayanmaktadır.

Sunumda metal ve NTE'lerin bitki dokularına alım mekanizmaları açıklanmakta, geleneksel ve gelişmiş fitoremediasyon yaklaşımları karşılaştırılmakta ve bitki seçimi, biyobirikim kapasitesi ile doku analizlerinin önemi vurgulanmaktadır. Özellikle eğrelti otları, NTE ve ağır metal absorpsiyonu açısından güçlü karasal bitkiler olarak öne çıkarılmaktadır. *Pteris vittata*, arsenik hiperakümülatörü olarak tanımlanmakta ve arsenik içeren topraklarda etkili bir tür olarak değerlendirilmektedir. *Blechnopsis orientalis* ise özellikle Endonezya'nın Bangka bölgesi için en önemli yerel eğrelti otu adayı olarak gösterilmektedir. Bu türün yapraklarında toplam NTE konsantrasyonunun 3000 µg/g seviyesine kadar ulaşabildiği ve aynı zamanda yüksek miktarda arsenik biriktirebildiği belirtilmektedir. *Dicranopteris linearis* de doğrulanmış bir NTE hiperakümülatörü olarak tanımlanmakla birlikte, biyokütle ve büyüme sınırlamaları nedeniyle uygulama potansiyelinin daha düşük olduğu ifade edilmektedir.

Sunumda ayrıca asidik maden drenajı sistemlerinde kullanılabilecek sucul bitkilere de yer verilmektedir. Özellikle su sümbülü (*Eichhornia crassipes*), su marulu (*Pistia stratiotes*) ve su mercimeği (*Lemna* spp.) türleri dikkat çekmektedir. Su sümbülü, yüksek biyokütlesi ve gelişmiş kök sistemi sayesinde metal içeren atık sularda etkili bir yüzen makrofit olarak tanımlanmaktadır. *Pistia stratiotes* Fe ve Mn gideriminde etkili bir tamamlayıcı tür olarak değerlendirilirken, *Lemna* türlerinin hızlı büyüme ve kolay hasat avantajı sunduğu belirtilmektedir. Ayrıca bazı çalışmalarda 8 gün içerisinde %95'e varan Gd giderim verimlerine ulaşıldığı ifade edilmektedir.

Sunumda, basit absorpsiyon yaklaşımından fitomadenciliğe geçiş süreci de ele alınmaktadır. Bu yöntemde, NTE içeren topraklar hiperakümülatör bitkilerle bitkilendirilmekte; biyokütle hasat edilerek kurutma, külleştirme ve liç işlemleri sonrasında NTE bakımından zengin ara ürünler elde edilmektedir. Ancak fitomadenciliğin uygulanabilir olması için biyokütle üretkenliği, büyüme hızı ve metalurjik süreçlerin ekonomik açıdan uygun olması gerektiği vurgulanmaktadır. Genel olarak çalışma, fitoremediasyonun düşük çevresel etkiye sahip sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu ve özellikle Bangka kökenli yerel hiperakümülatör türlerin gelecekteki NTE odaklı pilot çalışmalar açısından önemli potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Phytoremediation Approach as an Alternative Technique to Absorb REEs

Dr. Hendra Prasetia

The presentation discusses phytoremediation as a green and alternative technology for absorbing rare earth elements (REEs) and heavy metals from secondary sources, especially mining-affected soils, tailings, and acid mine drainage systems. It positions phytoremediation not only as an environmental remediation method, but also as a potential phytomining strategy for recovering REEs from contaminated biomass. The main concept is that selected plant species can absorb, accumulate, and tolerate REEs and heavy metals in their tissues.

The presentation explains the general flow of metal and REE uptake into plant tissues, compares conventional and advanced phytoremediation approaches, and highlights the importance of plant selection, bioaccumulation capacity, digestion methods, and tissue analysis for identifying REEs in plant biomass. A major focus is placed on ferns as potent terrestrial plants for REE and heavy-metal absorption. *Pteris vittata* is presented as a benchmark arsenic hyperaccumulator, useful for arsenic-bearing soils and mining-affected areas, although it is not considered the best species for mercury removal. *Blechnopsis orientalis* is emphasized as the most important local fern candidate for Indonesia, particularly Bangka, because it can accumulate up to 3000 µg/g total REEs in fronds and co-accumulate arsenic up to 2100 µg/g. *Dicranopteris linearis* is also identified as a confirmed REE hyperaccumulator, but with lower practical extraction potential compared with *B. orientalis* due to biomass and growth limitations.

The presentation also highlights aquatic plants for acid mine drainage utilization, especially *Eichhornia crassipes* or water hyacinth, *Pistia stratiotes* or water lettuce, and *Lemna* spp. or duckweed. Water hyacinth is described as a strong floating macrophyte for mixed wastewater and metal-bearing waters because of its high biomass and extensive root system. *P. stratiotes* is presented as a practical companion species for Fe and Mn reduction in contained pond systems. *Lemna* spp. is considered promising for compact engineered systems because of its fast growth, easy harvesting, and reported ability to remove gadolinium efficiently, with one cited result showing 95% Gd removal in 8 days. The presentation further introduces a transition from simple absorption to phytomining, where REE-bearing soils or tailings are planted with hyperaccumulator species, the biomass is selectively harvested, then dried, ashed, leached, and processed into an REE-enriched intermediate stream. However, it stresses that REE phytomining is only realistic if biomass concentration, growth rate, harvestability, and downstream metallurgy are economically and technically justified. Phytoremediation offers a sustainable and low-impact approach for treating REE- and heavy-metal-bearing soils, tailings, and acid mine drainage. For Indonesia, the strongest opportunity lies in using native Bangka hyperaccumulator ferns, especially *B. orientalis*, for mine-land rehabilitation and future REE-oriented pilot studies. However, the presentation emphasizes that early pilot work should first prove plant growth performance, REE uptake, biomass productivity, and mass balance before moving toward full REE recovery chemistry.


Ferns: A Potent Terrestrial Plant
TÜBİTAK
BRIN
Pteris vittata
Core value proposition
• High tolerance and rapid frond accumulation make it one of the strongest arsenic-removal reference plants.
• Best fit: arsenic-bearing soils, tailings, embankments, or contained hydroponic systems—not broad-spectrum mercury treatment.
• Useful for Indonesia where arsenic co-occurs with mining-affected settings and mixed metalloid burdens.
• Operational caution: high-arsenic fronds require controlled harvest and secure handling.
Best deployment mode
Main limitation


Teşekkür

Endonezya'da Karasal ve Sucul Bitkiler Kullanılarak NTE Absorpsiyonu: Bir Vaka Çalışması

Dr. Hendra Prasetia

Sunumun önemli bir bölümü, bitkilerin fitoremediasyon ve potansiyel fitomadencilik uygulamalarındaki kullanımını, özellikle ağır metaller ve nadir toprak elementlerinin (NTE) absorpsiyonu açısından ele almaktadır. Eğrelti otları umut verici karasal bitkiler olarak sunulurken, asidik maden drenajı (AMD) arıtımında kullanılmak üzere *Acorus calamus*, *Eleocharis parvula* ve *Cyperus haspan* gibi sucul türler incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel izleme çalışmaları, zaman içerisinde metal alımının gerçekleştiğini ve su kalitesinde iyileşme sağlandığını göstermiştir.

Sunumda, NTE'lerin bitki sistemlerine nasıl giriş yaptığı, bitki büyümesini nasıl etkilediği ve biyoyararlanabilirlik, çevresel koşullar ile bitki türüne bağlı olarak kök ve yapraklarda nasıl biriktiği açıklanmaktadır. Ayrıca, NTE alım yoğunluğu, bitkilerde birikim mekanizmaları ve toprak ile sucul ortamlardaki NTE biyoyararlanabilirliği üzerine gerçekleştirilen güncel çalışmalara da yer verilmektedir.

Deneysel veriler, maruziyet süresi boyunca bitki dokularındaki metal konsantrasyonlarının arttığını, özellikle Fe, Zn ve Cr için belirgin bir birikim gerçekleştiğini göstermektedir. On beşinci gün sonunda Fe birikiminin hem köklerde hem de yapraklarda oldukça yüksek seviyelere ulaştığı, Zn ve Cr'nin de önemli miktarda absorbe edildiği belirlenmiştir. Bunun yanında pH değerinin 3,27'den 6,75'e yükselmesi, bitki temelli arıtım sürecinde ortam asiditesinin azaldığını ortaya koymaktadır. AMD sisteminde metal giderim verimlerinin ise 15. gün sonunda yaklaşık olarak Zn için %49,9, Fe için %63,7 ve Cr için %90,3 seviyelerine ulaştığı belirtilmektedir.

Sunumda ayrıca, temel fitoremediasyon göstergeleri olan Biyokonsantrasyon Faktörü (BCF) ve Translokasyon Faktörü (TF) kavramları da açıklanmaktadır. BCF sonuçları, özellikle Fe açısından güçlü bir kök birikimini işaret etmektedir. TF değerleri ise Zn ve Cr'nin 15. gün sonunda yapraklara daha etkin bir şekilde taşındığını göstermektedir. Buna karşın Fe'nin büyük ölçüde kök bölgesinde kaldığı ve Zn ile Cr'ye kıyasla sınırlı translokasyon gösterdiği ifade edilmektedir.

Sunumun son bölümünde, özellikle 15. gündeki *Eleocharis parvula* örneklerinin kök-alt bölgesine ait mikro-XRF veya elementel haritalama analizleri sunulmaktadır. Bu analizlerde Fe, Cr, Zn, Pb, Ni, Co ve Mn gibi metallerin yanı sıra Sc, Y, Ce, Nd, La, Sm, Gd ve Ho gibi NTE'lerin mekânsal dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır.

Genel olarak sunum, seçilmiş karasal ve sucul bitkilerin metal ve NTE alımı açısından yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu bitkilerin asidik maden drenajı arıtımı, fitoremediasyon uygulamaları ve kirlenmiş ortamlardan değerli elementlerin geri kazanımına yönelik fitomadencilik yaklaşımlarında kullanılabileceğini göstermektedir.

REEs Absorption Using a Terrestrial and Aquatic Plant in Indonesia: A Case Study

Dr. Hendra Prasetia

A major part of the presentation highlights the potential of plants for phytoremediation and potential use as phytomining, especially for absorbing heavy metals and rare earth elements (REEs). Ferns are presented as promising terrestrial plants, while aquatic species such as *Acorus calamus, Eleocharis parvula*, and *Cyperus haspan* are discussed for treating acid mine drainage (AMD), and experimental monitoring has shown metal uptake and water-quality improvement over time.

It explains how REEs can enter plant systems, affect plant growth, and accumulate through roots and leaves depending on bioavailability, environmental conditions, and plant species. The presentation cites recent studies on REE uptake intensity, plant accumulation pathways, and the bioavailability of REEs in soils and aquatic environments.

The experimental data show that metal concentrations in plant tissues increased during exposure, especially for Fe, Zn, and Cr. By Day 15, Fe accumulation was very high in both roots and leaves, while Zn and Cr also showed significant uptake. The pH increased from 3.27 to 6.75, indicating reduced acidity during plant-based treatment. Metal reduction efficiencies in AMD reached approximately 49.9% for Zn, 63.7% for Fe, and 90.3% for Cr by Day 15.

The presentation also introduces key phytoremediation indicators, including Bioconcentration Factor (BCF) and Translocation Factor (TF). The BCF results indicate strong root accumulation, especially for Fe, while TF values suggest that Zn and Cr were more effectively translocated to leaves by Day 15. Fe remained closer to the root system, showing limited translocation compared with Zn and Cr. The final section presents micro-XRF or elemental mapping analysis of *E. parvula* at Day 15, especially the bottom/root region. The scan aimed to identify the spatial distribution of major elements and metals such as Fe, Cr, Zn, Pb, Ni, Co, Mn, as well as REEs, including Sc, Y, Ce, Nd, La, Sm, Gd, and Ho.

Overall, the presentation concludes that selected aquatic and terrestrial plants have strong potential for metal and REE uptake, making them useful for AMD treatment (secondary sources), phytoremediation, and possible recovery of valuable elements from contaminated environments, well-known as phytomining.


Rare Earth Elements Absorption in Plant Tissue
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
TÜBİTAK
BRIN
MINING ENGINEERING DEPARTMENT
14-15 April 2026
Recovery of Critical Metals and Rare Earth Elements from Primary and Secondary Sources Workshop
PROF. DR. ING. AHMET BURAKS


Thank You

Kritik Metal Geri Kazanımında Biyoteknolojik Yaklaşımlar: Atık Katalizörler Üzerine Bir Vaka Çalışması

Dr. Ceren Erüst Ünal

Enerji dönüşümü ve karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda artan talep nedeniyle lityum, kobalt ve nadir toprak elementleri gibi kritik metallere olan ihtiyaç hızla artmakta, bu durum ise tedarik risklerini beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda, endüstriyel atıklardan metal geri kazanımı stratejik açıdan önemli bir konu hâline gelmiştir. Bu çalışmada, biyohidrometalurjik yöntemler kapsamında yer alan biyoliç prosesi incelenmiş ve prosesin etkinliği değerlendirilmiştir. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi asidofilik bakterilerin kullanıldığı sistemlerde metal çözünmesinin ağırlıklı olarak dolaylı mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu süreçte bakteriler Fe^{2+} iyonlarını Fe^{3+} iyonlarına oksitleyerek güçlü bir oksitleyici ortam oluşturmakta, ayrıca kükürt oksidasyonu yoluyla ortam pH'sını düşürerek metal çözünürlüğünü artırmaktadır.

Deneysel çalışmalar, kullanılmış vanadyum katalizörleri ile akışkan katalitik kırma (FCC) katalizörleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analizler, bu materyallerin SiO_2 ve Al_2O_3 bakımından zengin bir matrise sahip olduğunu, bununla birlikte vanadyum, lantan ve seryum gibi değerli metalleri de içerdiğini göstermiştir. Biyoliç deneyleri düşük pH koşullarında ve 35°C sıcaklıkta yürütülmüş; katı/sıvı oranının metal geri kazanım verimini etkileyen temel parametrelerden biri olduğu belirlenmiştir. Liç sonrası saflaştırma aşamasında demir, pH ayarlaması yoluyla çöktürülmüş ve ardından vanadyum geri kazanımı için uygun çözelti koşulları oluşturulmuştur. Nadir toprak elementleri arasında seryumun, +4 oksidasyon basamağındaki kararlılığı sayesinde seçici çöktürme ve solvent ekstraksiyonu yöntemleriyle ayrıştırılmasında önemli bir avantaj sağladığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen tekno-ekonomik analizler, önerilen biyohidrometalurjik proseslerin uygulanabilirliğini desteklemektedir. Vanadyum geri kazanımı için yaklaşık 2,25 milyon ABD doları tutarında yatırım ve 3,8 yıllık geri ödeme süresi öngörülürken; lantan ve seryum geri kazanımı için geri ödeme süresinin 2,2 yıla kadar düştüğü belirlenmiştir.

Sonuç olarak, biyoliç temelli yaklaşımlar; düşük çevresel etkileri, seçicilikleri ve ekonomik uygulanabilirlikleri sayesinde kritik metal geri kazanımında umut verici bir alternatif sunmaktadır. Kullanılmış katalizörler gibi ikincil kaynakların değerlendirilmesi hem kaynak güvenliğine katkı sağlamakta hem de döngüsel ekonomi hedeflerinin desteklenmesine olanak tanımaktadır.

Biotechnological Approaches for Critical Metal Recovery: A Case Study on Spent Catalysts

Dr. Ceren Erüst Ünal

With the increasing demand driven by energy transition and carbon neutrality goals, the need for critical metals such as lithium, cobalt, and rare earth elements is rapidly growing, leading to heightened supply risks. In this context, the recovery of metals from industrial waste has become strategically important. In this study, the bioleaching process within the scope of biohydrometallurgical methods was investigated and its effectiveness was evaluated. In systems utilizing acidophilic bacteria such as *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, and *Leptospirillum ferrooxidans*, metal dissolution occurs predominantly through indirect mechanisms. In this process, bacteria oxidize Fe^{2+} to Fe^{3+}, creating a strong oxidizing environment, while sulfur oxidation lowers the pH, thereby enhancing metal solubility.

Experimental studies were conducted on spent vanadium catalysts and fluid catalytic cracking (FCC) catalysts. Chemical analyses showed that these materials consist of a matrix rich in SiO_2 and Al_2O_3, while also containing valuable metals such as vanadium, lanthanum, and cerium. Bioleaching experiments were carried out at 35°C under low pH conditions, and the solid-to-liquid ratio was identified as a key parameter affecting metal recovery efficiency. In the post-leaching purification stage, iron was precipitated through pH adjustment, followed by the establishment of suitable solution conditions for vanadium recovery. Among rare earth elements, cerium was found to have a significant advantage due to its stability in the +4 oxidation state, enabling selective precipitation and separation via solvent extraction. Techno-economic analyses support the feasibility of the proposed biohydrometallurgical processes. For vanadium recovery, an investment of approximately 2.25 million USD with a payback period of 3.8 years was estimated, while for lanthanum and cerium recovery, the payback period was reduced to 2.2 years.

In conclusion, bioleaching-based approaches offer a promising alternative for critical metal recovery due to their low environmental impact, selectivity, and economic feasibility. The utilization of secondary resources such as spent catalysts contributes both to resource security and to the advancement of circular economy goals.


MUNZUR
MUNTEAM
Munzur University Rare Earth Elements Application and Research Centre (MUNTEAM) was founded in 2019.
The center owns a 6000 m² research building that aims to develop Türkiye's R&D ecosystem related to REEs and strategical raw materials (SRMs). In time, academic knowledge and experience are expected to be transformed into high-value-added products containing REEs with SMEs and industry stakeholders.
MUNTEAM is expected to provide the scientific and commercial applications of rare earth elements and SRMs.
MUNTEAM
TÜBİTAK
MINING ENGINEERING DEPARTMENT


TÜBİTAK
CERTIFICATE OF ATTENDANCE

Kritik Metal Olarak Lityum: Birincil Kaynaklardan Kazanım

Dr. İlker Erkan

Lityum, yeryüzündeki en hafif katı element olup 0,534 g/cm^3 yoğunluğuyla öne çıkmaktadır. En negatif standart elektrot potansiyeline ve en yüksek ısıl kapasiteye sahip olması sayesinde batarya teknolojilerinde vazgeçilmez bir konumdadır (160 Wh/kg ve 400 Wh/L'nin üzerinde enerji yoğunluğu). AB tarafından "kritik hammadde" olarak sınıflandırılan lityum, yüksek ekonomik değeri ve tedarik riski nedeniyle stratejik önem taşımaktadır. Türkiye'nin geleneksel lityum rezervleri açısından zayıf olmasına karşın, bor rezervlerinin yanındaki killerde 2.000 ppm'e kadar lityum bulunduğu vurgulanmaktadır. Kapalı havza tuzlalarındaki hipersalin sular, özellikle Atacama'da 1.500 ppm'e ulaşan lityum konsantrasyonuyla dünyanın en zengin salamura kaynağını oluşturmaktadır. Şili, Arjantin ve Bolivya'dan oluşan "Lityum Üçgeni" dünya havza tuzla rezervlerinin %58'ini barındırmaktadır. Lityum; kapalı havza tuzlaları, pegmatit cevherler ve sedimanter killer olmak üzere 3 tip birincil kaynaktan elde edilebilmektedir.

Kapalı havza tuzlalarında geleneksel yöntem olan güneş enerjisiyle buharlaştırma 12-24 aylık bir süre gerektirmekte; yüksek su tüketimi ve coğrafi kısıtlamalar temel dezavantaj oluşturmaktadır. Doğrudan Lityum Çıkarımı (DLE) teknolojileri ise iyon değişimi, solvent ekstraksiyonu ve membran/elektrodiyaliz yöntemleriyle %80–95 geri kazanım oranı ve saatler içinde işlem süresi vaat etmektedir. Pegmatit cevherleri (özellikle spodümen) ~7.000 ppm ile en yüksek tenörlü lityum kaynağını temsil etmekte ve küresel arzın yaklaşık %40'ını karşılamaktadır. Avustralya bu üretimin ~%50'sini üstlenmekte; Greenbushes ve Pilgangoora madenleri öne çıkan projeler arasındadır. İşlemede kritik adım, α-spodümenin 1.050°C'de kalsinasyonla β-spodümene dönüştürülmesidir. Bu dönüşüm olmaksızın asit liçiyle lityum çıkarılamamaktadır ve toplam işleme enerjisinin %30–40'ını tek başına bu adım tüketmektedir. Bu aşamadan sonra Li_2CO_3, sülfat yöntemi ile, LiOH ise alkali yöntem ile elde edilmektedir. Yüksek enerji tüketimi (1 ton konsantre için 25–30 GJ), yüksek sermaye maliyeti (500 milyon-2 milyar $) ve madencilik ayak izi başlıca zorluklar arasındadır.

Sedimanter killerden olan; hektorit ve illit gibi kil minerallerinde ve jadarit gibi borosilikat minerallerinde lityum 1.000–4.000 ppm aralığında bulunmaktadır. Thacker Pass (ABD), Sonora (Meksika) ve Jadar (Sırbistan) en önemli projelerdir. Asit liçi (H_2SO_4) baskın ekstraksiyon yöntemi olmakla birlikte, Mg^{2+}/Li^+ ayrımının güçlüğü, yüksek su tüketimi ve atık yönetimi temel teknik ve çevresel engeller olarak belirtilmektedir. Kil kaynakları henüz ticari ölçekte yaygınlaşmamış; "geleceğin sınır kaynağı" olarak konumlandırılmaktadır.

Lithium as a Critical Metal: Extraction from Primary Sources

Dr. İlker Erkan

Lithium is the lightest solid element on Earth, standing out with a density of 0.534 g/cm^3. Thanks to its most negative standard electrode potential and highest specific heat capacity, it holds an indispensable position in battery technologies (with an energy density of over 160 Wh/kg and 400 Wh/L). Classified as a "critical raw material" by the EU, lithium holds strategic importance due to its high economic value and supply risk. Although Türkiye is weak in terms of traditional lithium reserves, it is emphasized that lithium can be found in clays next to boron reserves, up to 2,000 ppm. The hypersaline waters in closed basin salt flats, especially in Atacama, with lithium concentrations reaching 1,500 ppm, constitute the richest brine source in the world. The "Lithium Triangle," consisting of Chile, Argentina, and Bolivia, contains 58% of the world's salt flat reserves. Lithium can be obtained from three types of primary sources: closed basin salt flats, pegmatite ores, and sedimentary clays.

In closed-basin salt flats, the traditional method of solar evaporation requires a period of 12–24 months; high water consumption and geographical constraints are the main disadvantages. Direct Lithium Extraction (DLE) technologies, on the other hand, promise an 80–95% recovery rate and processing times within hours using ion exchange, solvent extraction, and membrane/electrodialysis methods. Pegmatite ores (especially spodumene) represent the highest-grade lithium source with ~7,000 ppm and account for approximately 40% of the global supply. Australia accounts for approximately 50% of this production; the Greenbushes and Pilgangoora mines are among the prominent projects. The critical step in the process is the conversion of α-spodumene to β-spodumene through calcination at 1,050°C. Without this transformation, lithium cannot be extracted through acid leaching, and this step alone consumes 30-40% of the total processing energy. After this stage, Li_2CO_3 is obtained using the sulfate method, while LiOH is obtained using the alkaline method. High energy consumption (25-30 GJ for 1 ton of concentrate), high capital cost ($500 million-2 billion), and mining footprint are among the main challenges.

In sedimentary clays, lithium is found in the range of 1,000–4,000 ppm in clay minerals such as hectorite and illite, and in borosilicate minerals such as jadarite. Thacker Pass (USA), Sonora (Mexico), and Jadar (Serbia) are the most important projects. Although acid leaching (H_2SO_4) is the dominant extraction method, the difficulty of separating Mg^{2+}/Li^{+}, high water consumption, and waste management are cited as the main technical and environmental barriers. Clay resources have not yet become widespread on a commercial scale; they are positioned as the "future frontier resource."


Lithium from Clay — The Emerging Frontier
Hectorite is the primary lithium-bearing clay mineral — formed by volcanic-hydrothermal and weathering processes in closed basin environments
Acid leaching with H_2SO_4 is the dominant extraction method, producing lithium sulfate solution that is purified into Li_2CO_3 or LiOH
Mg^{2+}/Li^+ separation, water consumption, tailings management, and lower grades are the key technical and environmental challenges
Thacker Pass (USA), Sonora (Mexico), and Jadar (Serbia) are the most significant clay lithium projects globally
TÜBİTAK
BRIN



Boksit ve İlişkili Cevherlerden Nadir Toprak Elementlerinin Geri Kazanımı İçin Yeni ve Sürdürülebilir Bir Proses

Dr. Turan Uysal

Dünya genelinde NTE madenciliği, birincil (örn. karbonatitler) ve ikincil jeolojik (örn. killer, boksitler) kaynaklar üzerinde yürütülmektedir. Birincil jeolojik kaynaklarda fiziksel ve kimyasal zenginleştirme prosesleri nispeten zor ve maliyetli iken, ikincil jeolojik kaynakların yüksek rezervlere sahip olmaları, işletme maliyetleri ve radyoaktif element içeriklerinin düşük olması gibi üstünlüklere sahiptir. Bu avantajlar ikincil jeolojik kaynaklara oldukça önemli bir değer kazandırmaktadır. Bu yüzden bu kaynaklardan sürdürülebilir ve çevreci NTE üretim teknolojisinin geliştirilmesine ilişkin kapsamlı araştırma yapılması gerekmektedir.

Elektrikli ve hibrit araçların en kritik parçası olan motorlarında NdFeB ve savunma sanayinde ise SmCo kalıcı mıknatısları kullanılmaktadır. Gelecekte olabilecek arz kesintisi nedeniyle ekonomik ve ulusal güvenlik açısından bu hammaddeler oldukça kritik bir öneme sahiptirler. Bu yüzden dünyada NTE üretimi adına büyük çapta yoğun projeler yürütülmektedir. Ülkemizin de tedarik sorununun giderilmesi, rekabet gücünün sağlanması adına Eskişehir-Beylikova yatağına alternatif olabilecek ağır-NTE içeriği yüksek kaynağımızın olması oldukça önemlidir. Ülkemizde NTE'ce zengin killer, lateritler, boksit ve ilişkili cevherler gibi potansiyel kaynakların tespiti çalışmalarına hız verilmelidir. NTE arama ve zenginleştirme süreçlerinde, içinde bulunduğumuz medeniyet coğrafyasında aktif rol alınması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, özellikle teknoloji transferi alanında Endonezya ile yürütülecek iş birliklerinin güçlendirilmesi, ikili ilişkilerin geliştirilmesi açısından stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak ekonomik öneme sahip NTE'ce zengin kil, boksit ve ilişkili cevher yataklarının tespiti, üretim teknolojisinin geliştirilmesi çalışmalarının yapılması oldukça önem arz etmektedir.

Novel Sustainable Process for the Recovery of Rare Earth Elements from Bauxite and Related Ores

Dr. Turan Uysal

Rare earth element (REE) mining worldwide is conducted on both primary (e.g., carbonatites) and secondary geological resources (e.g., clays and bauxites). While physical and chemical beneficiation processes for primary geological resources are relatively difficult and costly, secondary geological resources offer significant advantages, including large reserves, lower operating costs, and lower concentrations of radioactive elements. These advantages provide substantial value to secondary geological resources. Therefore, comprehensive research is required for the development of sustainable and environmentally friendly REE production technologies from these resources.

NdFeB permanent magnets are used in the motors of electric and hybrid vehicles, which represent one of the most critical components of these systems, whereas SmCo permanent magnets are widely utilized in defense industry applications. Due to the potential risk of future supply disruptions, these raw materials are of critical importance in terms of both economic sustainability and national security. Consequently, extensive large-scale projects on REE production are being conducted worldwide. In order to overcome supply-related challenges and maintain competitiveness, it is of great importance for Türkiye to possess alternative resources with high heavy-REE content in addition to the Eskişehir-Beylikova Rare Earth Elements Deposit. Efforts aimed at identifying potential REE-rich resources in Türkiye, such as clays, laterites, bauxites, and associated ores, should therefore be accelerated.

It is also of considerable importance to take an active role in the exploration and beneficiation processes of REEs within the broader geographical sphere of our civilization. In this context, strengthening collaborations with Indonesia, particularly in the field of technology transfer, emerges as a strategic priority for the enhancement of bilateral relations. In conclusion, the identification of economically significant REE-rich clay, bauxite, and associated ore deposits, as well as the development of production technologies for these resources, is of critical importance.


Importance of the Study Subject in Literatu
To date, the most powerful and commercially successful permanent magnets developed are NdFeB magnets, which possess the highest energy density. Therefore, in today's high-performance electric motors, alloys based on Neodymium (Eskişehir-Beylikova), Iron (Malatya-Hekimhan), and Boron (Eskişehir-Kırka) are widely utilized.
used primarily in electric vehicles and the defense industry. For example, 2 kg of NdFeB permanent
e used per electric vehicles. In the defense industry, approximately 4 ton of REEs are used in submarine.


Roadmaps and Future Strategies for Recovery of Rare Earth
An integrated process for rare earth
from Turkish bauxite-related ores
Turan Uysal, Ceren Ersöz, Murat Erdemoğlu and Hikmet Sis
Mechanochemical Synthesis
Mechanical activation of pyrophylli
extraction by acidic leaching
ction of rare earth elements and α-alumina production from
ching solution obtained from Turkish bauxite-related ore
rs thank the TÜBİTAK3501 and
for financially supportin
Terim

Nadir Toprak Elementi İçeren Süperiletkenlerin Manyetik Özellikleri ve Histerezis Eğrilerinin Analizi

Dr. İbrahim Düzgün

Nadir toprak elementleri (NTE), stratejik öneme sahip kritik malzemeler olmanın ötesinde, süperiletken seramiklerde yapısal ve manyetik özellikleri doğrudan şekillendiren güçlü işlevsel değiştiricilerdir. NTE iyonları, sahip oldukları 4f elektron konfigürasyonları sayesinde büyük manyetik momentler, güçlü anizotropi etkileri ve yerel kristal ortamını modifiye etme yeteneği sağlar. Bu elementler *pasif katkı maddeleri değil, işlevsel davranışın aktif değiştiricileridir.*

Bu çalışmada, YBCO ve BSCCO yüksek sıcaklık süperiletken ailelerinde gerçekleştirilen sistematik NTE katkılama çalışmalarının manyetik davranış üzerindeki etkileri, histerezis eğrisi analizi perspektifinden değerlendirilmektedir. Tip-II süperiletkenlerde mıknatıslanma histerezis döngüsü (M-H eğrisi), malzemenin akı tutturma gücü, geri dönüşümsüz mıknatıslanma davranışı ve kritik akım yoğunluğu hakkında kapsamlı bilgi sunar. *Bir histerezis eğrisi, girdap dinamiklerinin ve performansın parmak izidir.* Döngü genişliği kritik akım yoğunluğuyla (Jc) doğrudan orantılıdır ve Bean kritik durum modeli çerçevesinde kantitatif Jc değerleri elde edilebilir.

Çalışmada üç deneysel vaka incelenmiştir. İlk olarak, $Y_{0.5}RE_{0.5}Ba_2Cu_3O_y$ (RE = Lu, Yb, Dy) bileşimlerinin karşılaştırmalı analizi, lütesyum ikamesinin 77 K'nin altında en yüksek kritik akım yoğunluğunu sağladığını ve tane boyutunu artırdığını ortaya koymuştur; aynı ana yapıda bile farklı NTE'lerin farklı sonuçlar ürettiği gösterilmiştir. İkinci olarak, Dy katkılı YBCO ile Er katkılı BSCCO sistemleri karşılaştırılmıştır. Disprosyum, YBCO'da yüksek manyetik alanlarda kütle kritik akım yoğunluğunu artırırken paramanyetik katkılar da ortaya çıkarmıştır. Buna karşın, BSCCO sisteminde kalsiyum yerine erbiyum ikamesi, stokiyometrik olarak uygun görünmesine rağmen faz kararlılığını bozmuş ve Jc'yi yaklaşık %14 düşürmüştür. *Kâğıt üzerinde umut verici olmak, pratikte başarılı olmak anlamına gelmez.* Üçüncü olarak, Ho ikameli Y358 seramiklerinde ılımlı ikamenin (x = 1,5) referans histerezis alanının ~%93'ünü koruduğu, tam ikamenin ise %67 oranında azalttığı belirlenmiş; yarı ikameli numunenin aynı zamanda en iyi radyasyon kalkanlaması performansını göstermesi, çok işlevli malzeme potansiyelini ortaya koymuştur.

Sonuçlar açıkça göstermektedir ki *NTE ikamesi bir ayar stratejisidir, garantili bir iyileştirme değildir.* Etki; iyonik yarıçap uyumluluğu, örgü bozulması, taşıyıcı dengesi, tane bağlanırlığı ve ikincil faz oluşumu gibi birbiriyle rekabet eden faktörlere bağlıdır. *Bir histerezis eğrisi salt bir manyetik grafik değil, tutturma ve işlevsel performansın kompakt bir parmak izidir.* Bu nedenle, NTE'lerin gelecekteki kullanım ve geri kazanım stratejilerinin değerlendirilmesinde manyetik karakterizasyon temel bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Magnetic Properties of Rare-Earth-Containing Superconductors and Analysis of Hysteresis Curves

Dr. İbrahim Düzgün

Rare earth elements (REEs) are far more than strategically important critical materials; they are powerful functional modifiers that directly shape the structural and magnetic properties of superconducting ceramics. Owing to their 4f electron configurations, REE ions provide large magnetic moments, strong anisotropy effects, and the ability to modify the local crystal environment. These elements are *not passive additives; they are active modifiers of functional behavior.*

This study evaluates the effects of systematic REE doping on the magnetic behavior of YBCO and BSCCO high-temperature superconductor families from the perspective of hysteresis curve analysis. In type-II superconductors, the magnetization hysteresis loop (M–H curve) provides comprehensive information on flux pinning strength, irreversible magnetization behavior, and critical current density. *A hysteresis curve is a fingerprint of vortex dynamics and performance.* The loop width is directly proportional to the critical current density (Jc), and quantitative Jc values can be extracted within the Bean critical-state model framework.

Three experimental case studies are examined. First, a comparative analysis of $Y_{0.5}RE_{0.5}Ba_2Cu_3O_y$ (RE = Lu, Yb, Dy) compositions revealed that lutetium substitution yielded the highest critical current density below 77 K and increased grain size; even within the same host structure, different REEs produce distinctly different outcomes. Second, Dy-doped YBCO and Er-doped BSCCO systems were contrasted. Dysprosium enhanced the bulk critical current density at high magnetic fields in YBCO while also introducing paramagnetic contributions. In contrast, erbium substitution for calcium in BSCCO, although stoichiometrically plausible, disrupted phase stability and led to approximately 14% lower Jc compared to the undoped sample. *Promising on paper does not equal successful in practice.* Third, in Ho-substituted Y358 ceramics, moderate substitution (x = 1.5) preserved approximately 93% of the reference hysteresis area, whereas full substitution (x = 3) reduced it by 67%. The fact that the half-substituted specimen simultaneously exhibited the best radiation shielding performance demonstrates the multifunctional potential of these materials.

The results clearly demonstrate that *REE substitution is a tuning strategy, not a guaranteed improvement.* The outcome depends on competing factors such as ionic radius compatibility, lattice distortion, carrier balance, grain connectivity, and secondary phase formation. *A hysteresis curve is not just a magnetic graph; it is a compact fingerprint of pinning and functional performance.* Therefore, magnetic characterization stands out as an essential tool for evaluating future REE utilization and recovery strategies.


Take-home message
M (emu)
100%


Magnetic Properties of
Rare-Earth-Containing
Superconductors

Atık Lityum-İyon Pillerinden Kritik Metallerin Geri Kazanımı: Şehir Madenciliğinin Yeni Cevheri

Prof. Dr. Ersin Yener Yazıcı

Küresel enerji sisteminin karbonsuzlaştırılması ve 2050 iklim hedeflerine ulaşılması amacıyla rüzgâr türbinleri, güneş panelleri ve elektrikli araçlar gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin üretimi için yaklaşık üç milyar ton mineral ve metale ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir. Bu durum; lityum, kobalt, nikel, mangan ve bakır gibi kritik metallere olan talebi önemli ölçüde artırmaktadır. Günümüzde Türkiye dâhil olmak üzere birçok büyük sanayi ekonomisi, bu elementleri "Kritik/Stratejik Mineraller ve Hammaddeler" olarak sınıflandırmaktadır. Türkiye'nin 2025 yılı kritik hammaddeler listesi de T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanmıştır. Birincil kaynaklardan yapılan madencilik faaliyetleri bu talebin bir kısmını karşılayabilse de cevher tenörlerinin düşmesi, enerji maliyetlerinin artması ve rezervler ile rafinasyon kapasitesinin belirli bölgelerde yoğunlaşması tedarik risklerini artırmaktadır. Bu nedenle geri dönüşüm faaliyetleri stratejik önem kazanmıştır. Yapılan projeksiyonlara göre geri dönüşüm sayesinde 2040 yılına kadar Cu, Li, Ni ve Co için birincil kaynak talebinin yaklaşık %10 oranında azaltılması mümkün olabilecektir. Bu durum yalnızca kobalt için planlanan yaklaşık kırk yeni madencilik projesinin gerekliliğini ortadan kaldırabilecek düzeydedir.

Elektrikli araçların temel bileşeni olan lityum-iyon piller (LIB), Li, Ni, Mn, Co, Cu ve grafit gibi kritik hammaddelerin en yoğun kullanıldığı sistemlerden biridir. Bu nedenle kullanım ömrünü tamamlamış LIB'ler önemli bir ikincil kaynak olarak değerlendirilmektedir. Elektrikli araç bataryalarının ilk neslinin 2030'lu yıllarda kullanım ömrünü tamamlamasıyla birlikte önemli bir atık yönetimi problemi ortaya çıkacaktır. 2040 yılı itibarıyla geri dönüşüm tesislerine gelen besleme materyalinin %83'ünün tüketici sonrası bataryalardan oluşacağı öngörülmektedir.

LIB geri dönüşümünde doğrudan geri dönüşüm, pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler kullanılmaktadır. Pirometalurjik prosesler yüksek enerji tüketimi ve lityum ile grafitin geri kazanımındaki sınırlılıkları nedeniyle dezavantajlıdır. Buna karşılık hidrometalurjik prosesler, tüm metallerin ve grafitin yüksek verimle geri kazanılmasına olanak sağlamaktadır. Son yıllarda çevresel etkilerin azaltılması amacıyla organik asitler, biyoliç ve derin ötektik çözücüler gibi alternatif yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe geçiş doğrusal bir süreç değildir ve teknik açıdan başarılı prosesler dahi güvenilir besleme zinciri olmadan ticari başarısızlık yaşayabilmektedir. Batı'daki bazı geri dönüşüm şirketlerinin iflasları bunun önemli örnekleridir. Buna karşılık Çin; yüksek geri dönüşüm kapasitesi, güçlü rafinasyon altyapısı, devlet desteği ve üretim atıklarına doğrudan erişimi sayesinde küresel ölçekte lider konumdadır. Bu nedenle rekabetçi ve sürdürülebilir bir LIB geri dönüşüm endüstrisinin oluşturulabilmesi için teknik, ekonomik, çevresel ve lojistik boyutları kapsayan bütüncül stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Recovery of Critical Metals from Waste Lithium-Ion Batteries: The New Ore of Urban Mining

Prof. Dr. Ersin Yener Yazıcı

Around three billion tonnes of minerals and metals will be required to produce renewable energy technologies (e.g., wind turbines and solar panels) and electric vehicles (EVs) in order to decarbonise the global energy system and meet the 2050 climate targets. This will substantially increase the demand for lithium, cobalt, nickel, manganese, copper and other metals. Nearly every major industrial economy now classifies these elements/minerals as "Critical/Strategic Mineral/Metals/Raw Materials (CRM/SRM)" including Türkiye in its 2025 list which was published by the Turkish Ministry of Energy and Natural Resources. Although mining from primary resources can supply part of this demand, declining ore grades, increasing energy costs and the geographical concentration of both reserves and refining capacity leave users exposed to supply risk. Consequently, recycling activities have become vital as they could reduce primary demand for Cu, Li, Ni, and Co by around 10% by 2040 which would be enough to eliminate forty new mining projects from the cobalt pipeline alone.

Lithium-ion batteries (LIBs), the core component of EVs, are the largest consumers of CRM/SRM (e.g., Li, Ni, Mn, Co, Cu, graphite) and therefore one of the richest secondary sources of these raw materials. As the first generation of EV batteries reaches the end of their life through the 2030s, end-of-life (EoL) LIBs will present a waste management problem. By 2040, post-consumer batteries are expected to account for 83% of recyclers' feedstock rather than production scrap from cell manufacturing. The full LIB value chain is projected to exceed 400 billion USD globally by 2030 with the recycling sector accounting for 3% of this figure.

The recycling of CRM/SRM in EoL LIBs can be achieved through direct recycling, pyrometallurgical and hydrometallurgical processes although direct recycling is still at a low TRL. Pyrometallurgical processes are energy-intensive and have technical shortcomings in recovering lithium and graphite. Hydrometallurgical processes, by contrast, offer high recovery of all metals as well as graphite, with high flexibility and lower costs. Attention is now shifting towards the use of organic acids, bioleaching and deep eutectic solvents in hydrometallurgical processes, mainly due to the high environmental footprint of inorganic acid-based systems and the growing pressure to reduce process carbon intensity. However, scaling up a hydrometallurgical flow sheet from laboratory/pilot to industrial scale is not linear and even technically sound processes can fail commercially without a reliable feedstock supply chain. The recent bankruptcies of Western recycling companies demonstrate that owning the technology does not guarantee its commercial viability. Conversely, China has the highest global recycling capacity and a reliable ecosystem comprising its top eight recyclers, well-established policies and a combination of refining infrastructure, state support, lower labour costs and direct access to manufacturing scrap which Western competitors lack. Therefore, establishing a resilient and competitive LIB recycling industry requires a comprehensive strategy that encompasses techno-economic feasibility, environmental soundness, logistics, business models and supportive policy frameworks in order to build reliable supply chains and sustain recycling businesses.


KTÜ CLIMATE CHANGE AND GREEN ENERGY TRANSITION
Is it possible without minerals/metals?
The technologies needed for the Green Energy Transition require >30 metals!
3 trillion tons of metals and minerals are needed to decarbonize the global energy system by 2050 (World Bank, 2020)
EVs are increasing!
Increase in raw material demand 500%



Arsenik: Çevresel Bir Riskten Stratejik Bir Kaynağa

Dr. Taha Boyraz

Arsenik, uzun yıllar boyunca toksik özellikleri ve özellikle yeraltı suyu ile toprak sistemlerinde neden olduğu çevresel kirlilik nedeniyle metalurjik proseslerin tehlikeli bir yan ürünü olarak değerlendirilmiştir. Ancak son yıllarda bu yaklaşım değişmeye başlamış ve arsenik, özellikle 5G/6G haberleşme sistemleri, optoelektronik uygulamalar ve savunma sanayinde kullanılan galyum arsenit (GaAs) tabanlı yarı iletkenlerdeki kritik rolü nedeniyle stratejik bir hammadde olarak önem kazanmıştır. Arsenikle ilişkili çevresel riskler, başlıca arsenopirit (FeAsS), realgar (As_4S_4) ve orpiment (As_2S_3) gibi sülfürlü minerallerde bulunmasından kaynaklanmaktadır. Madencilik ve mineral işleme faaliyetleri sırasında bu minerallerin oksitleyici koşullara maruz kalması, asidik maden drenajı (AMD) oluşumuna ve özellikle As(III) ile As(V) türlerindeki toksik arsenik bileşiklerinin mobilizasyonuna neden olmaktadır. Bu süreç geniş çaplı çevresel kirlenmeye ve ciddi halk sağlığı sorunlarına yol açmaktadır.

Geleneksel arsenik yönetimi yaklaşımları çoğunlukla stabilizasyon ve bertaraf yöntemlerine dayanmakta, genellikle kireç bazlı arıtma sistemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arsenik hareketliliğini azaltmada etkili olmakla birlikte yüksek miktarda ikincil atık oluşumuna neden olmakta ve arsenik geri kazanımını sağlamamaktadır. Buna karşılık modern yaklaşımlar, arseniğin hem birincil hem de ikincil kaynaklardan geri kazanılması ve katma değerli bir ürüne dönüştürülmesine odaklanmaktadır. Pirometalurjik proseslerde arsenik, ergitme tesisi baca gazlarından arsenik trioksit (As_2O_3) formunda tutulabilmekte; hidrometalurjik yöntemlerde ise seçici liç ve çöktürme teknikleri kullanılarak bakır, altın ve bor gibi değerli bileşenlerden ayrılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, bor içeren asidik çözeltilerden sülfürlü çöktürme yöntemi ile arseniğin seçici geri kazanımı incelenmiştir. Proses, endüstriyel borik asit üretim sistemlerini temsil eden koşullar altında tasarlanmıştır. Sodyum sülfür (Na_2S) kullanılarak arsenik, özellikle üç değerlikli formunda seçici olarak çöktürülmekte ve böylece çözeltiden etkin şekilde ayrılabilmektedir. Geleneksel kireç bazlı yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yaklaşım, ikincil atık oluşumunu önemli ölçüde azaltmakta ve daha ileri saflaştırma işlemleri için arsenikçe zengin bir ara ürün oluşturmaktadır.

Arsenik geri kazanımı yalnızca çevresel iyileştirme açısından değil, aynı zamanda artan arz risklerinin azaltılması bakımından da önem taşımaktadır. Arsenik; üretiminin sınırlı ve coğrafi olarak yoğunlaşmış olması, yan ürün geri kazanımına bağımlılığı ve yüksek jeopolitik hassasiyeti nedeniyle birçok ülke tarafından kritik hammadde olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, teorik olarak yüksek geri dönüşüm potansiyeline sahip olmasına rağmen bu potansiyel günümüzde yeterince değerlendirilememektedir. Çalışma sonuçları, arseniğin tür kontrollü çöktürme mekanizması sayesinde asidik koşullar altında seçici olarak uzaklaştırılabileceğini ve bu yaklaşımın mevcut endüstriyel proses akımlarına entegre edilebileceğini göstermektedir. Bu yaklaşım, çevresel koruma ile kaynak sürdürülebilirliğini birlikte desteklemekte ve modern metalurjik sistemlerde atık yönetiminden kaynak geri kazanımına geçişin önemini ortaya koymaktadır.

Arsenic: From an Environmental Risk to a Strategic Resource

Dr. Taha Boyraz

Arsenic has long been regarded as a hazardous by-product of metallurgical processes, primarily due to its toxicity and its role in environmental contamination, particularly in groundwater and soil systems. However, this traditional perception has been shifting in recent years. Arsenic is now increasingly recognized as a critical raw material due to its indispensable role in advanced technologies, especially in gallium arsenide (GaAs)-based semiconductors used in 5G/6G communication systems, optoelectronics, and defense applications.

The environmental risks associated with arsenic are mainly linked to its occurrence in sulfide minerals such as arsenopyrite (FeAsS), realgar (As_4S_4), and orpiment (As_2S_3). Mining and mineral processing activities expose these minerals to oxidative conditions, leading to the formation of acid mine drainage (AMD) and the mobilization of toxic arsenic species, primarily As(III) and As(V). This process results in widespread environmental contamination and poses serious public health concerns.

Traditionally, arsenic management strategies have focused on stabilization and disposal, often through lime-based treatment methods. While effective in reducing mobility, these approaches generate significant amounts of secondary waste and do not recover arsenic as a usable product. In contrast, modern approaches emphasize the recovery and valorization of arsenic from both primary and secondary sources. Pyrometallurgical processes enable arsenic capture as arsenic trioxide (As_2O_3) from smelter off-gases, while hydrometallurgical methods utilize selective leaching and precipitation techniques to separate arsenic from valuable components such as copper, gold, and boron.

In this context, the present study focuses on the selective recovery of arsenic from boron-containing acidic solutions using sulfide precipitation. The process is designed to operate under conditions representative of industrial boric acid production systems. By applying sodium sulfide (Na_2S), arsenic is selectively precipitated, particularly in its trivalent form, enabling efficient separation from the solution phase. Compared to conventional lime treatment, this approach significantly reduces secondary waste generation and produces an arsenic-rich intermediate that can be further refined.

Beyond environmental remediation, arsenic recovery also addresses emerging supply risks. Arsenic is classified as a critical raw material by several global economies due to its limited and geographically concentrated production, strong dependence on by-product recovery, and high geopolitical sensitivity. At the same time, arsenic exhibits a high theoretical recycling potential, which remains largely underutilized. Therefore, developing efficient recovery strategies from secondary resources is essential for ensuring sustainable and secure supply chains.

The findings of this study demonstrate that arsenic can be selectively removed under acidic conditions through speciation-controlled precipitation, with strong potential for integration into existing industrial flowsheets. This approach supports both environmental protection and resource sustainability, highlighting the importance of transitioning from waste management to resource recovery in modern metallurgical systems.


Introduction
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
TÜBİTAK
BRIN



Altın İşleme Atıklarından Cıva Geri Kazanımı

Arş. Gör. Salih Sıvırcık

Altın madenciliğinde cıva yönetimi, özellikle kontrolsüz uygulamaların dünya genelinde ciddi çevresel riskler oluşturduğu küçük ölçekli ve zanaatkâr tipi altın madenciliği (ASGM) faaliyetlerinde kritik bir konudur. ASGM faaliyetleri, dünya üzerindeki kasıtlı cıva kirliliğinin en büyük kaynağı olarak kabul edilmektedir. Üretilen her 1 kg altın için yaklaşık 2,6 kg cıva doğrudan atık akımlarına ve çevreye karışmaktadır. Bu proseslerdeki düşük geri kazanım verimi nedeniyle atık depolama artıklarında hâlen ekonomik değere sahip metaller bulunmakta, bu nedenle ikincil bir liç aşaması gerekli olmaktadır. Söz konusu atıklara uygulanan geleneksel siyanür liçi, artık cıva ile reaksiyona girerek yüksek derecede toksik siyanür-cıva kompleksleri oluşturmaktadır. Bu kompleksler aynı zamanda çevrede oldukça hareketli yapıdadır. Bu durum yalnızca ekolojik riskleri artırmakla kalmamakta, aynı zamanda atık yönetim maliyetlerini de yükseltmektedir.

Alternatif bir yaklaşım olarak glisin bazlı liç yöntemi öne çıkmaktadır. Glisin, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilen ve çevre dostu bir amino asittir. Altını çözündürürken siyanüre kıyasla çok daha düşük çevresel etki oluşturmaktadır. Ancak burada önemli bir sorun ortaya çıkmaktadır: Glisin liçi uygulandığında çözeltide kalan cıva, altın geri kazanım süreçlerinde operasyonel kısıtlamalara neden olmaktadır. Çözünmüş Hg^{2+} iyonları, aktif karbon ve iyon değişim reçinelerindeki aktif bağlanma bölgeleri için altın kompleksleriyle rekabete girmektedir. Bu rekabet adsorpsiyon kapasitesini düşürmekte, dolayısıyla altın geri kazanım verimini azaltmakta ve reaktif tüketimini artırmaktadır. Bu darboğazın giderilmesi ve cıvanın sistemden güvenli şekilde uzaklaştırılması amacıyla sodyum sülfür (Na_2S) ile kimyasal çöktürme oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu proses sayesinde çözeltide bulunan yüksek reaktifliğe sahip Hg^{2+} iyonları, termodinamik açıdan son derece kararlı olan ve doğada cıvanın en stabil formu olarak bilinen sinabar (HgS) formuna dönüştürülmektedir. 24°C'de HgS'nin çözünürlük çarpımı (Ksp) $2{,}0\times10^{-53}$ gibi son derece düşük bir değere sahiptir. Uçucu olmayan ve reaksiyona girmeyen bu yapı, cıva atıklarının çevresel açıdan güvenli yönetimi ve depolanmasına ilişkin Minamata Cıva Sözleşmesi kriterlerini karşılamaktadır. Prosesin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmak amacıyla Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) yöntemi kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel modele göre en yüksek cıva giderim verimi, 35-40°C sıcaklık aralığında ve cıva miktarına göre stokiyometrik miktarın 40-45 katı Na_2S kullanılması durumunda elde edilmektedir. Bu koşullar altında altın kompleksleri çözeltide kalırken, tüm gümüş, bakırın yaklaşık yarısı ve cıvanın %99'u birlikte çöktürülmektedir. Proses gümüş açısından seçici olmamakla birlikte, altının çözünmüş fazda tutulması sayesinde sonraki geri kazanım aşamalarının saflığını ve verimliliğini korumaktadır.

XRD ve SEM analizleri ile doğrulanan inert HgS çökeltisi, altın işleme tesislerinde cıva içeren liç çözeltilerinin yönetimi için ölçeklenebilir, entegre ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntem, çevresel mevzuata uyumu garanti altına alırken aynı zamanda altın geri kazanım verimini optimize etmektedir.

Mercury Recovery from Gold Processing Tailings

Arş. Gör. Salih Sıvırcık

Mercury management in gold mining is a critical issue, especially in artisanal and small-scale gold mining (ASGM), where uncontrolled practices pose serious environmental risks worldwide. ASGM activities rank as the largest source of intentional mercury pollution on the planet. For every kilogram of gold produced, roughly 2.6 kg of mercury ends up directly in waste streams and the environment. The low recovery efficiency in these processes means that tailings still hold economic value, so a secondary leaching step becomes necessary. Conventional cyanide leaching applied to these tailings reacts with residual mercury and forms highly toxic cyano-mercury complexes, which are also highly mobile in the environment. This not only worsens ecological risks but also drives up waste management costs.

An alternative is glycine-based leaching. Glycine is a non-toxic, biodegradable, and environmentally friendly amino acid. It dissolves gold while leaving a much smaller environmental footprint than cyanide. However, a significant problem arises: when glycine leaching is applied, any mercury remaining in solution creates operational constraints for gold recovery. Soluble mercury ions compete with gold complexes for active binding sites on activated carbon and ion-exchange resins. That competition lowers adsorption capacity, which in turn reduces gold recovery and increases reagent consumption.

To eliminate this bottleneck and safely remove mercury from the system, chemical precipitation with sodium sulfide (Na_2S) offers a very effective solution. This process converts highly reactive Hg^{2+} ions in solution into cinnabar (HgS), thermodynamically extremely stable and the most stable mercury form found in nature. At 24°C, HgS has a solubility product (Ksp) as low as 2.0×10^{-53}. This non-volatile, non-reactive structure meets the criteria of the Minamata Convention for environmentally sound management and storage of mercury waste.

Optimization studies were performed using a Central Composite Design (CCD) to maximize industrial applicability of the process. According to the statistical model, the highest mercury removal efficiency is achieved at 35–40°C, using 40-45 times the stoichiometric amount of Na_2S relative to mercury. Under these conditions, gold complexes stay in solution, while all silver, about half of the copper, and 99% of mercury precipitate together. The process is not selective for silver, but because it keeps gold in the soluble phase, it preserves the purity and efficiency of the downstream recovery steps.

This inert HgS precipitate – confirmed by XRD and SEM analyses – provides a scalable, integrated, and sustainable framework for managing mercury-bearing leach streams in gold processing plants. It guarantees environmental compliance while optimizing gold yield.


Sustainable Mercury
Recovery in ASGM
A Predictive Framework for Chemical
Precipitation and Environmental Compliance


THANK YOU FOR
ATTENTION...

SONUÇ BİLDİRGESİ

- Kritik mineraller ve NTE'lerin, enerji dönüşümü, yenilenebilir enerji teknolojileri, savunma sanayi, elektronik sistemler, batarya teknolojileri ve yüksek teknoloji uygulamaları açısından stratejik öneme sahip olduğu değerlendirilmiştir.
- Küresel ölçekte artan kritik hammadde talebinin, sürdürülebilir tedarik zincirlerinin oluşturulmasını zorunlu hâle getirdiği, bu kapsamda birincil kaynakların yanı sıra ikincil kaynakların değerlendirilmesinin de büyük önem taşıdığı vurgulanmıştır.
- Kırmızı çamur, uçucu kül, atık katalizörler, lityum-iyon piller, kullanım ömrünü tamamlamış mıknatıslar ve madencilik atıkları gibi endüstriyel atıkların, NTE ve kritik metaller açısından önemli birer ikincil kaynak potansiyeli taşıdığı ortaya konulmuştur.
- Hidrometalurjik proseslerin, yüksek geri kazanım verimi, proses esnekliği ve seçicilik avantajları nedeniyle kritik metal geri kazanımında ön plana çıktığı değerlendirilmiştir.
- Geleneksel asit liçi yöntemlerinin yüksek asit tüketimi, düşük seçicilik ve çevresel etkiler gibi dezavantajlara sahip olduğu, bu nedenle organik asitler, biyoliç, iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler ve düşük sıcaklıklı seçici prosesler gibi alternatif teknolojilerin önem kazandığı belirtilmiştir.
- Biyohidrometalurji ve biyoliç uygulamalarının, düşük çevresel etki, enerji verimliliği ve sürdürülebilir proses geliştirme açısından umut verici yaklaşımlar sunduğu değerlendirilmiştir.
- Fitoremediasyon ve fitomadencilik uygulamalarının, özellikle asidik maden drenajı, ağır metal kirliliği ve NTE içeren sahaların rehabilitasyonu açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir.
- Kritik metal geri kazanım süreçlerinde yalnızca teknik başarıların değil, ekonomik uygulanabilirlik, enerji tüketimi, karbon ayak izi, lojistik altyapı ve sürdürülebilir üretim zincirlerinin de belirleyici unsurlar olduğu vurgulanmıştır.
- Lityum-iyon pil geri dönüşümünün, gelecekte kritik metal arz güvenliği açısından stratejik bir sektör hâline geleceği ve bu alanda özellikle hidrometalurjik geri dönüşüm teknolojilerinin önem kazanacağı değerlendirilmiştir.
- Nadir toprak mıknatıslarının geri dönüşüm oranlarının halen düşük seviyelerde olduğu, bu nedenle seçici, ekonomik ve yüksek verimli geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.
- Arsenik gibi geleneksel olarak çevresel risk unsuru olarak değerlendirilen elementlerin, ileri teknoloji uygulamalarındaki kullanımları nedeniyle stratejik hammaddeler arasında yer almaya başladığı ve bu nedenle geri kazanım odaklı yaklaşımların önem kazandığı ifade edilmiştir.

- Türkiye'nin, NTE, kritik mineraller ve ikincil kaynaklar bakımından önemli bir potansiyele sahip olduğu, özellikle kil, boksit, laterit ve endüstriyel atıklar üzerine arama ve değerlendirme çalışmalarının artırılması gerektiği vurgulanmıştır.
- Endonezya'nın monazit, ksenotim, iyon adsorpsiyon killeri ve çeşitli endüstriyel atıklar bakımından önemli bir potansiyel taşıdığı, Türkiye-Endonezya iş birliklerinin teknoloji transferi ve ortak araştırma faaliyetleri açısından stratejik fırsatlar sunduğu değerlendirilmiştir.
- Kritik hammaddeler alanında uluslararası akademik ve teknolojik iş birliklerinin artırılmasının, bilgi paylaşımı, pilot ölçekli uygulamalar, insan kaynağı yetiştirilmesi ve ortak Ar-Ge altyapılarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşıdığı ifade edilmiştir.
- Kritik mineraller ve nadir toprak elementleri alanında sürdürülebilir, çevreci ve ekonomik olarak uygulanabilir teknolojilerin geliştirilmesinin; geleceğin enerji, savunma ve yüksek teknoloji politikaları açısından stratejik bir zorunluluk olduğu sonucuna varılmıştır.

Tüm katkı sunanlara ve katılımcılarımıza teşekkür ederiz.

Çalıştay Düzenleme Kurulu

FINAL DECLARATION

- It was assessed that critical minerals and REEs hold strategic importance for the energy transition, renewable energy technologies, defense industry, electronic systems, battery technologies, and high-tech applications.
- It was emphasized that the increasing global demand for critical raw materials makes the establishment of sustainable supply chains a necessity, and within this scope, the utilization of secondary resources alongside primary resources is of great importance.
- It was demonstrated that industrial wastes such as red mud, fly ash, waste catalysts, lithium-ion batteries, end-of-life magnets, and mining wastes carry significant secondary resource potential in terms of REEs and critical metals.
- It was assessed that hydrometallurgical processes come to the forefront in critical metal recovery due to their advantages of high recovery efficiency, process flexibility, and selectivity.
- It was stated that conventional acid leaching methods have disadvantages such as high acid consumption, low selectivity, and environmental impacts; therefore, alternative technologies such as organic acids, bioleaching, ionic liquids, deep eutectic solvents, and low-temperature selective processes are gaining importance.
- It was assessed that biohydrometallurgy and bioleaching applications offer promising approaches in terms of low environmental impact, energy efficiency, and sustainable process development.
- It was expressed that phytoremediation and phytomining applications have significant potential, especially for the rehabilitation of acid mine drainage, heavy metal pollution, and sites containing REEs.
- It was emphasized that not only technical achievements but also economic feasibility, energy consumption, carbon footprint, logistics infrastructure, and sustainable production chains are decisive elements in critical metal recovery processes.
- It was assessed that lithium-ion battery recycling will become a strategic sector for critical metal supply security in the future, and especially hydrometallurgical recycling technologies will gain importance in this field.
- It was stated that the recycling rates of rare earth magnets are still at low levels; therefore, there is a need to develop selective, economic, and high-efficiency recycling technologies.
- It was expressed that elements conventionally evaluated as environmental risk factors, such as arsenic, have begun to take place among strategic raw materials due to their use in advanced technology applications, and for this reason, recovery-oriented approaches are gaining importance.

- It was emphasized that Türkiye has a significant potential in terms of REEs, critical minerals, and secondary resources, and exploration and evaluation studies should be increased, especially on clay, bauxite, laterite, and industrial wastes.
- It was assessed that Indonesia carries significant potential in terms of monazite, xenotime, ion-adsorption clays, and various industrial wastes, and Türkiye-Indonesia collaborations offer strategic opportunities for technology transfer and joint research activities.
- It was expressed that increasing international academic and technological collaborations in the field of critical raw materials is of great importance for knowledge sharing, pilot-scale applications, human resource training, and the development of joint R&D infrastructures.
- It was concluded that developing sustainable, environmentally friendly, and economically feasible technologies in the field of critical minerals and rare earth elements is a strategic necessity for future energy, defense, and high-tech policies.

Thank you to all contributors and participants.

Workshop Organizing Committee

ÇALIŞTAYDAN FOTOĞRAFLAR























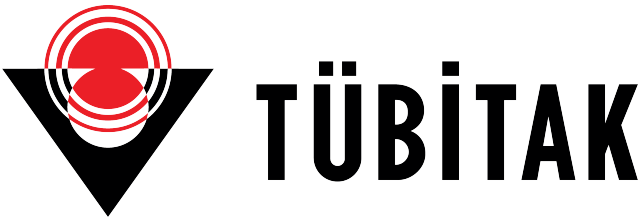


GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ









GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve DOĞA BİLİMLERİ FAKÜLTESİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
Tel: 0456 233 1000 Dahili: 1777
E-posta: maden@gumushane.edu.tr