



Teknologi Hijau Pengelolaan Bijih Nikel Laterit (*Nickel Laterite Spent Ore Treatment "Green Technology"*)

Rizky Aisyah Septi Maharani^{1✉}, Zulkarnaen Muin²

PT Bukit Makmur Resources, Equity Tower 48th Floor Suite E, SCBD 9 South Jakarta, Indonesia⁽¹⁾

PT Muin Bangun Persada, Jl. Kliningan III/22, Turangga Bandung, West Java, Indonesia⁽²⁾

DOI: 10.31004/jutin.vxix.xx

✉ Corresponding author:

[risky.maharani@bmrnickel.com]

Article Info

Kata kunci:
Limbah;
Lingkungan;
Nikel laterit;
Spent ore;
Teknologi hijau

Abstrak

Industri nikel terus mengalami perkembangan pesat seiring dengan meningkatnya produksi kendaraan listrik. Pada tahun 2022 Indonesia memproduksi 500.882,27 ton Ferro Nikel dan berhasil menjual 197.758 ton atau 30,01%. Berkembangnya tambang nikel juga diiringi dengan kemajuan teknologi yang digunakan, salah satunya teknologi pengelolaan *spent ore* sebagai limbah yang dihasilkan pada proses pemurnian nikel. Penelitian ini bertujuan untuk mengelola *spent ore* menjadi suatu produk yang bernilai dan dapat dimanfaatkan untuk fungsi pengelolaan lingkungan. Metode yang digunakan adalah uji toksisitas (TCLP dan LD50), pengujian skala laboratorium, dan pengujian skala lapangan. Uji toksisitas dan uji tanam pada 14 ton *spent ore* yang merupakan ampas sisa proses dari teknologi Hidrometalurgi *heap leaching* yang akan dikomersialkan oleh PT BMR. Pada prosesnya, komposit *spent ore* dan Fe residu dilakukan netralisasi baik menggunakan batu kapur maupun dengan campuran biolite, agromax, ND-201®. Hal tersebut bertujuan untuk membuat ampas sisa proses pelindian, air limpasan yang dihasilkan aman terhadap lingkungan serta dapat menghasilkan tanaman yang layak untuk dikonsumsi. Hasil Pengujian menyimpulkan bahwa *treated spent ore* merupakan *nontoxic material* dan bukan termasuk kategori limbah B3 dan dapat digunakan sebagai media tanam yang baik untuk tumbuhan pangan maupun tanaman keras. Hasil uji laboratorium pangan menunjukkan bahwa tanaman pangan yang dihasilkan dari proses penanaman menggunakan media *spent ore* layak untuk dikonsumsi berdasarkan baku mutu BPOM pada UU No. 23 Tahun 2017.

Keywords:

Environment;

Green technology;

Laterite nickel;

Spent ore;

Waste

Abstract

In pace with the rising output of electric vehicles, the nickel sector is still developing quickly. In 2022, Indonesia will manufacture 500,882.27 tons of ferro nickel, of which 197,758 tons, or 30.01%, will be able to be sold. Along with the growth of nickel mines comes technological advancements, one of which is the ability to manage wasted ore, a waste product of the nickel refining process. With the help of this study, used ore will be transformed into a useful product that can be used to control the environment. Laboratory scale testing, field scale tests, and toxicity tests (TCLP and LD50) are the techniques used. Testing for toxicity and planting on 14 tonnes of wasted ore, a byproduct of hydrometallurgical heap leaching. Limestone or a combination of biolite, agromax, and ND- 201® were used to neutralize the spent ore and Fe residue composites during the process. This seeks to make the leftovers from the leaching process, the resulting runoff water, and the plants that can come from it edible. According to the test results, processed spent ore is a harmless substance that does not fall under the B3 waste category and may be utilized as an excellent planting medium for perennials and food plants. Based on BPOM quality criteria in Law No. 23 of 2017, the results of food laboratory testing revealed that food crops grown through the planting procedure utilizing discarded ore media were suitable for eating.

1. PENDAHULUAN

Nikel laterit merupakan mineral logam hasil dari proses pelapukan dan pengayaan mineral pada batuan ultramafic yang mengakibatkan pengkayaan unsur Ni, Fe, Mn, Co secara residual dan sekunder (Wang et al., 2023). Nikel laterit dicirikan oleh adanya logam oksida yang berwarna coklat kemerahan mengandung Ni dan Fe (Helvacı et al., 2017). Proses terbentuknya nikel laterit dimulai dari proses pelapukan yang intensif pada batuan peridotit (Liang et al., 2022). Batuan tersebut banyak mengandung olivine, magnesium silikat dan besi silikat. Batuan peridotit sangat mudah terpengaruh oleh proses pelapukan dimana air tanah yang kaya CO₂ yang berasal dari udara luar dan tumbuh-tumbuhan akan menghancurkan olivine. Penguraian Olivin, Magnesium, besi, nikel, dan silikat ke dalam larutan, cenderung membentuk suspensi koloid dan partikel-partikel silika (Menzel, 2019). Larutan besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida seperti Goethite FeO(OH), hematite (Fe₂O₃) (de Obeso & Kelemen, 2018).

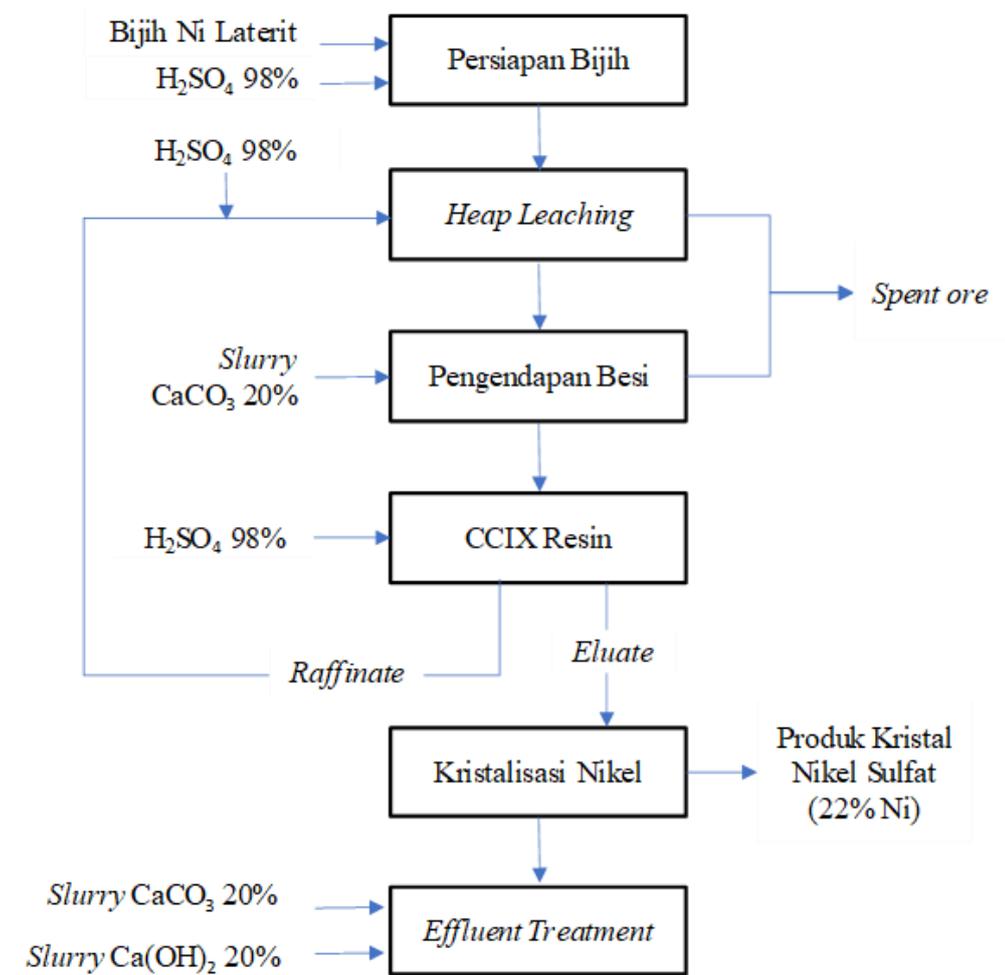
Magnesium dan nikel silikat tertinggal di dalam larutan selama air tanah bersifat asam, tetapi jika bereaksi dengan batuan dan tanah maka zat-zat tersebut cenderung mengendap sebagai hidroksida (Dojcinovic et al., 2023). Endapan-endapan hidroksida ini yang membuat bijih nikel laterit bersifat basa secara alamiah (Zhang et al., 2020). Oleh karena itu, bijih nikel laterit secara alamiah tidak akan membentuk air asam tambang yang terjadi pada bijih sulfida.

Berdasarkan data pada Booklet Nikel yang dirilis Kementerian ESDM (2020) jumlah cadangan nikel RI tercatat mencapai 72 juta ton nikel (termasuk nikel limonite/ kadar rendah). Jumlah ini mencapai 52% dari total cadangan nikel dunia sebesar 139.419.000 ton nikel. Hal ini menjadikan Indonesia memiliki cadangan nikel pada peringkat dua dunia. Cadangan tersebut berupa bijih nikel oksida yang lazim disebut laterit, berada di Kawasan Timur Indonesia (KTI) terutama di Sulawesi Tenggara dan Halmahera. Saprolit berkadar Ni > 1,8 % sudah diolah di Sulawesi Tenggara dengan jalur *pyrometalurgi*. Laterit kadar rendah yang terdiri dari limonit dan saprolit dengan kandungan Ni < 1.6%, belum diolah di dalam negeri. Oleh karena itu, PT Bukit Makmur Resources (BMR) melakukan pengolahan bijih nikel laterit kadar rendah untuk memanfaatkan sumber daya alam yang terdapat di dalam negeri dengan teknologi *heap leaching*. Metode ini selain memungkinkan konservasi mineral, juga merupakan teknologi yang efektif dan ramah terhadap lingkungan.

Pada proses pengolahannya, bijih nikel laterit kadar rendah tersebut dilakukan proses aglomerasi dan ditumpuk diatas lapisan kedap air, kemudian diirigasi menggunakan asam sulfat encer (Ghorbani et al., 2016). Pada saat asam sulfat menetes dari bagian permukaan tumpukan, tetesan tersebut mengalir ke bagian dalam tumpukan secara gravitasi sambil melindi Nikel yang terdapat dalam tumpukan bijih yang dilewatinya (Pyper et al., 2019).

Metode pelindian tumpuk ini membutuhkan waktu yang lama dalam melindi Ni, namun memiliki selektivitas pelindian yang lebih baik, yakni dapat memaksimalkan pelindian logam berharga Ni dan Co serta sekaligus menahan/ membatasi pelindian logam pengotor yang tidak diperlukan (Ghorbani et al., 2016). Oleh karena itu, ampas dari sisa proses *heap leach* di sebut dengan "*spent ore*" yang memberi makna bahwa penampakan dan karakter fisiknya masih menyerupai "*ore*" asalnya namun dengan kandungan logam berharga yang telah habis atau "*spent*".

Larutan yang dihasilkan dari proses pelindian akan di olah lebih lanjut pada pabrik hilir sehingga menjadi produk akhir berupa nikel kristal dan padatan sisa yang berasal dari pabrik hilir di sebut sebagai residu Fe. Selain produk yang dihasilkan, terdapat pula padatan sisa hasil proses pelindian yaitu *spent ore*. Kedua padatan sisa tersebut memiliki pH sekitar 3 akibat adanya proses irigasi menggunakan asam sulfat. Diagram alir proses seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Alur Proses Heap Leaching Nikel Laterit

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan hasil pengujian kimia di laboratorium, menunjukkan bahwa padatan *spent ore* hasil pelindian tergolong "*infertile soil*" seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Kesuburan Tanah

No	Parameter	Satuan	Nilai	Keterangan
1	pH	-	3,48	Keasaman tinggi
2	C/N Ratio	-	66,68	Tinggi
3	CEC	Me/100 g	15,4	Sedang
4	Total N	Mg/dry kg	60	-
5	P* tersedia	%	<0,1	Rendah
6	K* tersedia	%	<0,01	Rendah
7	Total carbon	% dry	0,4	Rendah
8	Kelembaban	%	63,4	Tinggi
9	Kategori kesuburan			Rendah

Sumber: data primer penelitian (2023)

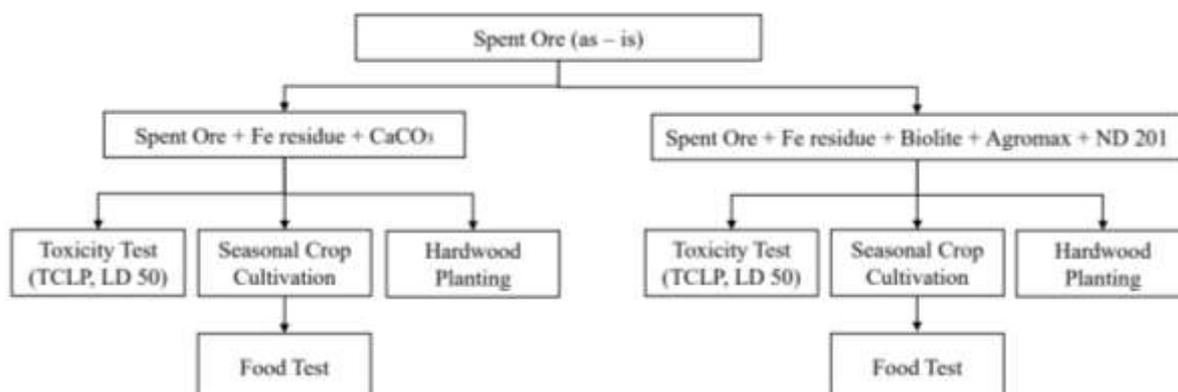
Hal ini disebabkan karena keasaman yang cukup tinggi pada *spent ore* serta rendahnya total posphor dan karbon yang terkandung pada *spent ore* hasil pelindian. Oleh karena itu, untuk memperbaiki kondisi keasaman yang terdapat dalam *spent ore*, PT Bukit Makmur Resources melakukan penambahan batu kapur maupun campuran biolite, agromax, dan ND 201® ke dalam komposit *spent ore* dan residu Fe. Selain itu, untuk meningkatkan jumlah P, K pada komposit *spent ore* dan residu Fe perlu adanya penambahan pupuk kompos yang dihasilkan dari pengolahan limbah domestik PT BMR. Apabila kedua kondisi tersebut tercapai, maka *spent re* dan residu Fe yang dihasilkan dapat di tumpuk dengan aman pada *waste dump* serta dapat dijadikan sebagai media tanam yang baik.

2. METODE

Pengujian hasil pengelolaan *spent ore* atau yang disebut *spent ore treatment* dalam skala pilot juga dilakukan PT Bukit Makmur Resources menggunakan lubang tanam dengan dimensi 30 x 30 x 50 cm. *Spent ore* tersebut diberikan 2 perlakuan yang berbeda yaitu:

- a. *Spent ore* + Fe residu + batu kapur.
- b. *Spent ore* + Fe residu + biolite + agromax + ND 201 ®

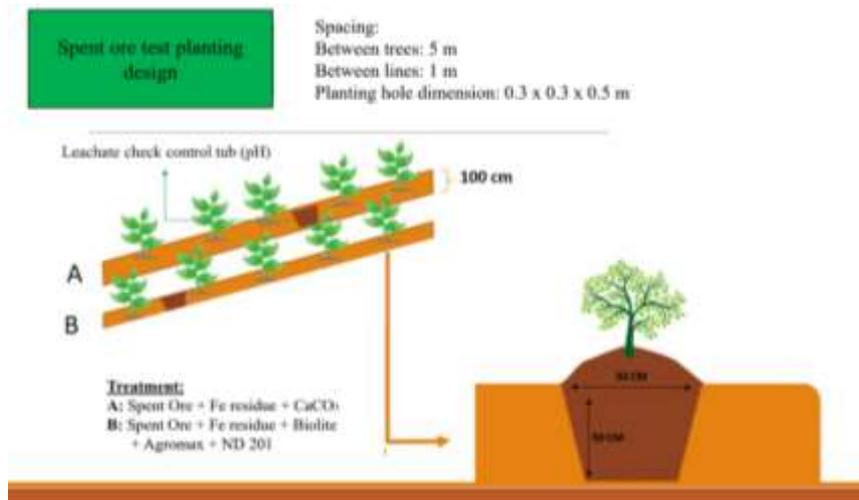
Setiap perlakuan pada komposit *spent ore* dilakukan analisis toksisitas (TCLP, LD 50) serta penanaman tanaman keras seperti jati, Nangka, sirsak, mete, jagung. Pengujian ini bertujuan untuk membuktikan bahwa komposit *spent ore* yang merupakan ampas proses *heap leaching* ramah terhadap lingkungan dan dapat dijadikan media untuk tumbuh tanaman serta menghasilkan tanaman yang layak untuk dikonsumsi. Oleh karena itu, tanaman yang dihasilkan selanjutnya dilakukan analisis untuk memastikan tanaman tersebut layak untuk di konsumsi sesuai BPOM. Adapun sistematika dan skema pengujian *spent ore treatment* seperti pada Gambar 4 dan desain penanaman uji *spent ore* skala pilot pada Gambar 5.



Gambar 4. Skema Pengujian Skala Pilot

Sumber: data primer penelitian (2023)

Pengujian skala pilot juga dilakukan untuk menguji *spent ore* sebagai media tanam daun bawang dan lobak. Mekanisme pengujian penanaman skala pilot dilakukan sebagai pendahuluan atas *spent ore* yang telah dikelola dengan tujuan mengevaluasi hasil *spent ore* yang dijadikan media tanam apakah sudah sesuai dengan kriteria tumbuh tanaman atau perlu pengelolaan lebih lanjut. Skema yang diterapkan ialah membuat lubang tanam sedalam 50 cm dengan diameter 30 cm. Pada lubang tanam tersebut diberi *spent ore* yang sebelumnya telah dikelola dengan perlakuan pemberian residu Fe dan CaCO₃ dan perlakuan lainnya dengan pemberian residu Fe, biolite, agromax, dan ND 201. Pada lubang tanam tersebut dilakukan penanaman jenis tumbuhan yang sama dengan perlakuan yang sama, sehingga respon pertumbuhan hanya dipengaruhi oleh perbedaan perlakuan pada *spent ore* Gambar 5.



Gambar 5. Desain Penanaman Uji *Spent Ore* Skala Pilot

Sumber: data primer penelitian (2023)

Hasil uji coba skala pilot sesuai Gambar 5 telah diimplementasikan di site Kabaena Utara sesuai pada Gambar 6. Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa lokasi uji coba telah ditanami oleh jagung, kacang, jambu mete, sirsak, dan jati. Foto lokasi uji coba skala pilot dapat dilihat Pada Gambar 6.



Gambar 6. Lokasi Uji Coba Sakala Lapangan Spent Ore di Kabaena

Sumber: data primer penelitian (2023)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan analisis kandungan *spent ore* dan residu Fe yang meliputi parameter Ni, Co, Fe, Mg, dan Si Komposisi *spent ore* dan residu Fe (Fe cake) seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Spent Ore dan Residu Fe

Sampel	Ni (%)	Co (&)	Fe (%)	Mg (%)	Si (%)
<i>Spent ore</i>	0,23	0,005	9,1	6,83	29,12
Fe residu	0,46	0,01	27	3,6	0,53

Hasil pengujian pH komposit *spent ore* sebelum dan sesudah diberikan perlakuan pengelolaan (*treatment*) dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data pH Sebelum dan Sesudah Pengelolaan

Parameter Uji	Spent ore + Fe residu + Batu kapur	Spent ore + Fe residu + Biolite + Agromax + ND 201 ®
pH komposit <i>spent ore</i> sebelum pengelolaan	3	3
pH komposit <i>spent ore</i> setelah pengelolaan	6	5

Sumber: data primer penelitian (2023)

Pengujian yang dilakukan berhasil menurunkan tingkat keasaman *spent ore* mendekati nilai normal. Meskipun keduanya masih tergolong asam, namun tingkat keasamannya telah menurun dan dari asam kuat menjadi asam lemah. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan yang dilakukan menunjukkan kecenderungan positif namun perlu ditingkatkan agar komposit *spent ore* memiliki tingkat keasaman yang netral.

3.1 SKALA LAB

A. Pengujian Internal PT BMR

Pengujian *spent ore treatment* atau *spent ore* yang telah dilakukan pengelolaan yang dilakukan pada skala laboratorium menghasilkan kualitas air limpasan (*seepage*) seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Kualitas Air Limpasan

No	Deskripsi	Satuan	Nilai	
			Hasil	Permen No. 9 Tahun 2006
Pengujian Fisik				
1	pH	S.U.	7,58	6-9
2	Total Suspended Solids, TSS	mg/L	<1	100
Logam Terlarut				
1	Cadmium, Cd	mg/L	<0,0001	0,05
2	Chromium, Cr	mg/L	0,002	0,5
3	Chromium Hexavalent, Cr ⁶⁺	mg/L	<0,002	0,1
4	Cobalt, Co	mg/L	<0,001	0,4
5	Copper, Cu	mg/L	0,003	2
6	Iron, Fe	mg/L	0,034	5
7	Lead, Pb	mg/L	<0,001	0,1

8	Nickel, Ni	mg/L	0,126	0,5
9	Zinc, Zn	mg/L	0,018	5

Sumber: data primer penelitian (2023)

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian memiliki kadar logam yang terkandung di dalam air limpasan sudah sesuai dengan baku mutu. Seluruh parameter baik pengujian fisik maupun pengujian logam mendapatkan nilai di bawah baku mutu sesuai dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 09 Tahun 2006 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pertambangan Bijih Nikel. Hasil yang didapatkan sangat baik dan menandakan bahwa proses pengelolaan *spent ore* nikel yang dilakukan telah memenuhi kaidah pengelolaan lingkungan. Berdasarkan nilai hasil pengujian tersebut *spent ore* nikel yang dihasilkan tidak memberikan dampak negatif lingkungan, sehingga dapat dimanfaatkan untuk keperluan pertanian. Temuan ini diperkuat Wang et al. (2023) yang menyatakan bahwa sludge dan air limpasan yang dikelola dengan baik pada industri pengolahan nikel memiliki kandungan limbah yang aman bagi lingkungan. Nilai TSS yang rendah juga menunjukkan bahwa kualitas airnya sangat baik dan tidak mengakibatkan penurunan kualitas air di lingkungan sekitarnya apabila terkena air hujan dan masuk ke badan air permukaan. Hal ini sesuai dengan Abu Amr et al. (2023) yang menyatakan bahwa industri pengolahan logam yang menerapkan prinsip lingkungan menerapkan teknologi bersih dan menghasilkan limbah yang memenuhi standar sesuai peraturan yang berlaku, sehingga tidak mengganggu lingkungan.

Guna memperkuat bukti kualitas *spent ore* yang dikelola sudah sesuai dengan baku mutu dan aman bagi lingkungan, dilakukan pengujian TCLP. Apabila ditinjau dari hasil pengujian *TCLP* komposit *spent ore* dan residu Fe menggunakan batu kapur dikategorikan sebagai limbah non-B3 karena berdasarkan hasil pengujian *TCLP* sampel tersebut telah memiliki nilai sesuai dengan baku *TCLP-A* dan *TCLP-B* yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian TCLP

No.	Deskripsi Pengujian	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
TCLP Anions					
1	Chloride, Cl ⁻	mg/L	9,7	75000	12500
2	Cyanide (Total), CN ⁻	mg/L	<0,005	21	3,5
3	Fluoride	mg/L	<0,02	450	75
4	Nitrate, NO ₃ -N	mg/L	0,047	40	5
5	Nitrite, NO ₂ -N	mg/L	<0,001	15000	2500
TCLP Inorganics					
1	Antimony, Sb	mg/L	<0,0005	6	1
2	Arsenic, As	mg/L	<0,0005	3	0,5
3	Barium, Ba	mg/L	<0,1	210	35
4	Beryllium, Be	mg/L	<0,01	4	0,5
5	Boron, B	mg/L	<0,1	150	25
6	Cadmium, Cd	mg/L	<0,005	0,9	0,15
7	Chromium Hexavalent, Cr ⁶⁺	mg/L	<0,002	15	2,5
8	Copper, Cu	mg/L	<0,01	60	10
9	Iodide, I ⁻	mg/L	0,03	40	5
10	Lead, Pb	mg/L	<0,05	3	0,5

11	Mercury, Hg	mg/L	<0,00005	0,3	0,05
12	Molybdenum, Mo	mg/L	<0,1	21	3,5
13	Nickel, Ni	mg/L	1,57	21	3,5
No.	Deskripsi Pengujian	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
TCLP Inorganics					
14	Selenium, Se	mg/L	0,001	3	0,5
15	Silver, Ag	Mg/L	<0,02	40	5
16	Tributyl Tin Oxide (as Organotins) **	mg Sn/L	<0,001	0,4	0,05
17	Zinc, Zn	mg/L	0,028	300	50

Sumber: data primer penelitian (2023)

Tabel 5 menunjukkan hasil uji TCLP yang terdiri atas komponen anion dan anorganik. Seluruh parameter yang diuji nilainya berada pada batas aman dibawah baku mutu TCLP-A dan TCLP-B. Hasil uji TCLP memperkuat bukti ilmiah bahwa proses pengelolaan *spent ore* ini telah dilakukan dengan sangat baik, sehingga seluruh parameter yang diuji nilainya aman berada di bawah baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah. Hasil ini membuktikan bahwa industri nikel yang dijalankan memiliki komitmen dan tanggungjawab tinggi pada pelestarian lingkungan. Hasil uji ini memperkuat penelitian sebelumnya yang dilakukan Liang et al. (2022) yang menyatakan bahwa proses industri nikel harus dilakukan dengan landasan prinsip industri hijau mengingat produk yang dihasilkan selalu digaungkan untuk mendukung transisi energi guna menurunkan laju perubahan iklim. Karuniasa & Pambudi (2022) menegaskan bahwa pengendalian laju perubahan iklim harus dilakukan secara terintegrasi antara hulu dan hilir guna mendapatkan manfaat yang lebih optimal sekaligus mencegah dampak yang lebih buruk. Pambudi et al. (2023) turut memperkuat temuan ini bahwa industri yang memiliki komitmen lingkungan secara partisipatif melakukan inisiatif pengelolaan dan mengevaluasinya untuk terus meningkatkan kualitas lingkungan di sekitarnya.

Pada prinsipnya kandungan logam dan zat kimia lain yang berada di bawah baku mutu menandakan bahwa aktivitas industri memiliki keselarasan dengan lingkungan. Dengan demikian seluruh proses alamiah yang ada di kawasan tersebut dapat berlangsung dengan normal atau bahkan lebih optimal karena adanya intervensi manusia yang berupaya memperbaiki kondisi di sekitarnya. Hal ini diperkuat oleh Harvey et al. (2017) yang menyatakan bahwa pertumbuhan ekonomi dan pengelolaan lingkungan dapat berjalan beriringan jika sektor perekonomian memiliki kepedulian dan berani melakukan terobosan-terobosan untuk meningkatkan fungsi lingkungan di sekitarnya. Menurut Rudke et al. (2020) industri yang telah menurunkan indikator capaian pembangunan berkelanjutan ke dalam sistem bisnisnya memiliki kontrol dan evaluasi ketat pada setiap tahapan proses yang dilakukan. Merujuk pada penelitian sebelumnya tersebut, maka dapat diketahui bahwa industri ini telah memiliki komitmen pada pencapaian tujuan pembangunan yang berkelanjutan.

Spent ore nikel yang dihasilkan sebagai limbah heap leach dapat dimanfaatkan untuk media tanam yang dapat meningkatkan ketebalan permukaan tanah dan memperbesar persentase lapisan humus. Melalui hal tersebut industri ini dapat memberikan manfaat yang lebih luas, tidak hanya menyumbangkan produk untuk transisi energi berbasis kendaraan listrik tetapi juga meningkatkan potensi sumber daya lahan sebagai sentra produksi hortikultura dan agroforestri. Pada sisi lain, juga dilakukan analisis LD 50 untuk mengetahui tingkat toksisitas pada organisme hidup, sesuai Gambar 7.

Industrial Hygiene and Toxicology Laboratory Faculty of Civil and Environmental Engineering Institute of Technology Bandung	
ACUTE TOXICITY TEST DATA SUMMARY	
Client	: PT. CAHAYA NIKEL INDONESIA
Work Order No	: 02/LabHIT/Sampel/2021
Analyst	: Ade Supriatin
Test type	: Oral 14 day LD ₅₀
Method	: U.S. EPA OPPTS 870.1100
Test Initiation Date	: February 16 th , 2021
Test Final date	: March 1 st , 2021
SAMPLE:	
ID	: Spent Ore
Color	: Brown
Amount Received	: ± 2.000 grams
Date Collected	: January, 2021
Date Received	: January 25 th , 2021
TEST SPECIES INFORMATION:	
Organism	: Mice (<i>Mus musculus</i>) male and female
Source	: Animal Laboratory Department of Biology – Institute of Technology Bandung
Collection Date	: February 11 th , 2021
Age	: 6 weeks
TEST CONDITION:	
Temperatur Range	: 23 – 26 °C
Humidity Range	: 52 – 59 %
Photoperiod	: 12 : 12 (light : darkness)
No. Organism/Cage	: 5
Dosage (mg/kg BW)	: 50; 500; 5,000; 15,000; and 30,000
Value of LD ₅₀	: > 30,000 mg/kg BW
Toxicity Test Results	: Non Toxic Material (Refer to Peraturan Pemerintah RI No. 101 Tahun 2014)
Test Conducted By	: Ade Supriatin

Gambar 7. Hasil Pengujian LD 50
Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan hasil LD 50 menunjukkan bahwa komposit *spent ore* dan residu Fe tergolong “Non Toxic Material”. Gambar 7 menunjukkan bahwa uji toksisitas *spent ore* nikel pada tikus (*Mus musculus*) jantan dan betina dengan dosis 50 mg/kg BW, 500 mg/kg BW, 5.000 mg/kg BW, 15.000 mg/kg BW, dan 30.000 mg/kg BW teruji sebagai non toxic material. Hasil pengujian ini membuktikan secara ilmiah bahwa komposit *spent ore* dan residu Fe tidak beracun pada organisme hidup (Razika & Djouani, 2022). Dengan demikian *spent ore* dan residu Fe ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan yang bersangkutan dengan organisme hidup tidak terkecuali manusia (Meshram et al., 2019). Oleh karena itu, jika *spent ore* dimanfaatkan untuk media tanam maka dapat mendukung kelangsungan hidup tanaman. Mempertimbangkan ini, *spent ore* dapat digunakan sebagai media tanam potensial untuk meningkatkan lapisan tanah yang ada di lokasi penelitian.

B. Pengujian di PT. Muin Bangun Persada

Pada penelitian ini juga dilakukan pengujian *spent ore* sebelum dan sesudah diberikan perlakuan. Proses ini penting untuk mengetahui seberapa efektif hasil perlakuan terhadap kandungan kimia tertentu di dalam *spent ore* nikel. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Spent Ore Nikel Sebelum dan Sesudah Pengelolaan

Parameter	Nilai
pH <i>spent ore</i> as is	3,33
pH <i>spent ore</i> + biolite + zeolite + ND 201 ®	6,86

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan Tabel 6 pH *spent ore* setelah dilakukan *treatment* berada pada rentang 6-7 dengan nilai rata-rata 6,86. Nilai pH *spent ore* setelah diberi pengelolaan adalah normal sesuai ambang batas pH netral yakni 6,5-7,5. Berdasarkan hasil pengelolaan *spent ore* dengan nilai 6,86 ini menunjukkan bahwa pengelolaan yang diberikan telah berhasil menetralkan tingkat keasaman. Sehingga *spent ore* ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan termasuk media tanam berbagai jenis tumbuhan. Berdasarkan hasil *treatment spent ore* dengan hasil pH 6,86 tentu akan sangat menguntungkan karena normalnya hampir seluruh jenis tumbuhan dapat tumbuh dengan baik pada pH netral diantara 6,5-7,5 (Pramudianto et al., 2019). Dengan demikian *spent ore* yang telah di *treatment* dapat dijadikan sebagai media tanam potensial untuk berbagai jenis tanaman.

Selain tingkat keasaman, analisis kandungan logam sangat penting dilakukan sebagai dasar menentukan pola pemanfaatan *spent ore* secara tepat guna. Hasil pengujian kandungan logam di dalam *spent ore* sebelum dan sesudah perlakuan ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kandungan Metal pada *Spent Ore* Sebelum dan Sesudah Pengelolaan

Parameter	Satuan	Sebelum Pengelolaan	Setelah Pengelolaan	Nilai Referensi*
Ni	mg/kg	970	515	1000
Co	mg/kg	30,69	20,05	50
Zn	mg/kg	27,82	61,29	500
Pb	mg/kg	18,38	2,25	300
ca	mg/kg	NA	<0,01	5
US	mg/kg	NA	4,01	30
M N	mg/kg	380	390	NA
TiO2	mg/kg	400	357	NA
SiO2	%	67,85	57,89	NA
cr	%	0,28	0,18	0,25
Fe	%	4,54	ND	NA
Al	%	0,72	ND	NA
Mg	%	5,73	ND	NA
Cu	mg/kg	15,75	ND	100

Sumber: data primer penelitian (2023)

Tabel 7 menunjukkan bahwa pemberian perlakuan pada *spent ore* berhasil menurunkan konsentrasi seluruh parameter logam kecuali Zn meningkat 120,3% dan Mn meningkat 2,63%. Pemberian *treatment* berhasil menurunkan konsentrasi logam berat Pb mencapai 87,75% dan Cr mencapai 35,71%. Perlakuan yang dilakukan untuk mengelola *spent ore* terbukti mampu menurunkan kandungan logam secara umum sehingga semakin memperkuat bukti bahwa *spent ore* ini layak dimanfaatkan sebagai media tanam. Hasil penelitian ini didukung Pambudi et al. (2023) yang menyatakan bahwa bagian terberat dari proses pemulihan lingkungan adalah mengelola limbah, baik dalam bentuk cair maupun padat, seringkali pengelolaan limbah ini menjadi kendala bagi perusahaan. Namun demikian, berdasarkan hasil perlakuan pada *spent ore*, PT BMR telah berhasil membuktikan bahwa limbah industri nikel dapat dikelola dengan baik dan menghasilkan produk ramah lingkungan serta multi manfaat.

Spent ore yang diberi perlakuan tersebut diuji coba secara terbatas untuk menanam lobak dan daun bawang dengan hasil pertumbuhan optimal. Hasil uji coba penanaman kedua jenis tanaman tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil pengujian Penanaman Daun Bawang dan Lobak Pada Spent Ore yang Dikelola

Sumber: data primer penelitian (2023)

Gambar 8 menunjukkan bahwa *spent ore* nikel yang telah dikelola dengan perlakuan pemberian tambahan biolite, zeolite, dan ND-201 berhasil dimanfaatkan sebagai media tanam lobak dan daun bawang. Keberhasilan uji coba ini menandakan bahwa *spent ore* yang telah dikelola dapat diaplikasikan pada lahan skala lapangan untuk uji coba skala besar dengan pilihan tanaman yang lebih beragam. Menurut Omon (2010) umumnya keberhasilan uji coba skala laboratorium memiliki nilai yang sebanding dengan uji coba skala lapangan, hanya saja perlu dilihat variabel kontrol dan variabel kendalinya antara lain kelembaban tanah dan suhu udara. Pada prinsipnya jika kondisinya sama maka hasilnya juga akan sama (Schalau, 2015). Gambar 8 membuktikan bahwa *spent ore* jika dikelola dengan tepat dapat memberikan manfaat yang besar bagi lingkungan dan masyarakat di sekitarnya.

3.2 PILOT TEST

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari percobaan skala laboratorium, PT BMR melakukan pilottest pada pengujian *treatment spent ore* ini menggunakan beberapa variasi yaitu.

3.2.1.1 *Spent ore* + batu kapur

3.2.1.2 *Spent ore* + biolite + agromax + ND 201®

Percobaan tersebut dilakukan untuk mengetahui *treatment* yang sesuai baik secara biologi maupun kimiawi untuk penanganan *spent ore* sehingga tidak mencemari lingkungan dan dapat dijadikan media tanam baik tanaman konsumsi maupun tanaman keras sebagai upaya untuk menjaga ketahanan pangan dan melestarikan tanaman lokal yang berada di Kawasan sekitar area PT Bukit Makmur Resources.

Pengujian toksisitas juga dilakukan untuk memastikan sekaligus mengkonfirmasi komposit *spent ore* yang telah di *treatment* tidak berbahaya terhadap lingkungan terutama saat dilakukan penumpukan pada *waste dump*. Adapun Hasil pengujian toksisitas baik TCLP maupun LD 50 pada variasi *treatment spent ore* menggunakan batu kapur ataupun agromax seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil TCLP Spent Ore + CaCO₃

No.	Deskripsi Pengujian	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
TCLP Anions					
1	Chloride, Cl ⁻	mg/L	409	75000	12500
2	Cyanide (Total), CN ⁻	mg/L	<0,005	21	3,5
3	Flouride	mg/L	0,12	450	75

4	Nitrate, NO ₃ -N	mg/L	0,121	40	5
5	Nitrate, NO ₂ -N	mg/L	0,121	40	5

No.	Deskripsi Pengujian	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
TCLP Inorganik					
1	Antimony, Sb	mg/L	<0,0005	6	1
2	Arsenic, As	mg/L	0,0006	3	0,5
3	Barium, Ba	mg/L	<0,1	210	35
4	Beryllium, Be	mg/L	<0,01	4	0,5
5	Boron, B	mg/L	<0,1	150	25
6	Cadmium, Cd	mg/L	<0,005	0,9	0,15
7	Chromium Hexavalent, Cr ⁶⁺	mg/L	<0,002	15	2,5
8	Copper, Cu	mg/L	<0,01	60	10
9	Iodide, I ⁻	mg/L	0,05	40	5
10	Lead, Pb	mg/L	<0,05	3	0,5
11	Mercury, Hg	mg/L	0,00006	0,3	0,05
12	Molybdenum, Mo	mg/L	<0,1	21	3,5
13	Nickel, Ni	mg/L	2,12	21	3,5
14	Selenium, Se	mg/L	<0,0005	3	0,5
15	Silver, Ag	mg/L	<0,02	40	5
16	Tributyl Tin Oxide (as Organotins) **	mg Sn/L	<0,001	0,4	0,05
17	Zinc, Zn	mg/L	0,079	300	50

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan hasil uji TCLP sesuai Tabel 8, menunjukkan bahwa netralisasi campuran bijih bekas dengan residu Fe menggunakan agromax dan biolit lolos uji TCLP A tetapi tidak lolos uji TCLP B. Sementara itu, hasil TCLP pada bijih bekas yang diolah menggunakan CaCO₃ terbukti lolos TCLP A dan TCLP B. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa perlakuan dengan CaCO₃ adalah metode yang paling efektif dan berhasil untuk menetralkan bijih bekas dan residu Fe.

Secara umum pada Tabel 8 terlihat bahwa hasil uji TCLP pada bijih bekas yang telah dicampur dengan batugamping (CaCO₃) memberikan hasil yang sangat baik. Semua parameter uji TCLP memiliki nilai di bawah batas TCLP-A dan TCLP-B, sehingga kualitas bijih yang diolah lebih baik dan layak untuk digunakan sebagai media tanam. Nilai parameter kunci untuk logam berat seperti Hg, Cd, Zn, Cr, dan As semuanya sangat jauh di bawah baku mutu sehingga tidak memberikan dampak negatif bagi tanaman dan produk yang dihasilkannya serta tidak menimbulkan kerugian apapun. gangguan terhadap lingkungan. Dengan demikian, pengolahan ini memberikan manfaat positif yang optimal dan mengurangi dampak negatif, sehingga dapat dikategorikan sebagai kegiatan yang ramah lingkungan dan patut dijadikan panutan. Temuan ini didukung oleh Ann-Kathrin & Harm (2019), yang menyatakan bahwa suatu kegiatan industri yang memiliki komitmen terhadap upaya pengelolaan lingkungan perlu diberikan apresiasi karena telah berhasil melampaui sistem produksi konvensional yang hanya mengejar profil semaksimal mungkin dan meniadakan lingkungan. Gatto & Busato (2020) menekankan bahwa industri yang bergerak di sektor energi bersih harus menerapkan prinsip ramah lingkungan secara total dari hulu hingga hilir.

Sehubungan dengan hal tersebut, pekerjaan yang dilakukan oleh PT. BMR berhasil membuktikan bahwa perusahaan ini memiliki komitmen tinggi terhadap lingkungan untuk memperkuat bukti ini, dilakukan uji TCLP dengan hasil tercantum pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil TCLP Spent Ore + Fe residu + Biolite + Agromax + ND-201®

No.	Deskripsi Pengujian	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
TCLP Anions					
1	Chloride, Cl ⁻	mg/L	1,3	75000	12500
2	Cyanide (Total), CN ⁻	mg/L	<0,005	21	3,5
3	Flouride	mg/L	<0,02	450	75
4	Nitrate, NO ₃ -N	mg/L	0,059	40	2500
5	Nitrate, NO ₂ -N	mg/L	<0,001	15000	150
TCLP Inorganik					
1	Antimony, Sb	mg/L	<0,0005	6	1
2	Arsenic, As	mg/L	0,0011	3	0,5
3	Barium, Ba	mg/L	<0,1	210	35
4	Beryllium, Be	mg/L	<0,01	4	0,5
5	Boron, B	mg/L	<0,1	150	25
6	Cadmium, Cd	mg/L	<0,005	0,9	0,15
7	Chromium Hexavalent, Cr ⁶⁺	mg/L	<0,002	15	2,5
8	Copper, Cu	mg/L	<0,01	60	10
9	Iodide, I ⁻	mg/L	<0,01	40	5
10	Lead, Pb	mg/L	<0,05	3	0,5
11	Mercury, Hg	mg/L	<0,00005	0,3	0,05
12	Molybdenum, Mo	mg/L	<0,1	21	3,5
13	Nickel, Ni	mg/L	11,5	21	3,5
14	Selenium, Se	mg/L	0,0006	3	0,5
15	Silver, Ag	mg/L	<0,02	40	5
16	Tributyl Tin Oxide (as Organotins) **	mg Sn/L	<0,001	0,4	0,05
17	Zinc, Zn	mg/L	0,07	300	50

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan hasil pengujian TCLP menunjukkan bahwa netralisasi campuran *spent ore* dengan Fe residu menggunakan agromax dan biolite lolos uji TCLP A namun tidak untuk TCLP B. Sedangkan, hasil TCLP pada *spent ore* yang dikelola dengan memberikan CaCO₃ terbukti lolos TCLP A maupun TCLP B. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa treatment dengan CaCO₃ adalah metode yang paling efektif dan sukses menetralkan *spent ore* dan Fe residu.

Berdasarkan hasil uji LD50, netralisasi campuran *spent ore* dan Fe residu baik menggunakan agromax dan biolite ataupun CaCO₃ menunjukkan hasil "*nontoxic material*" seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9 menunjukkan bahwa pengolahan bijih bekas + residu Fe + biolit + agromax + ND-201® merupakan bahan yang tidak beracun. Hasil uji LD 50 membuktikan bahwa perlakuan ini efektif dan hasilnya tidak beracun bagi organisme hidup. Dalam proses pengujian ini digunakan tikus putih (*Mus musculus*). Hasil uji bahan tidak beracun memperkuat bukti komitmen perusahaan terhadap pengelolaan lingkungan. Dengan hasil pengujian tersebut, limbah yang dihasilkan tidak perlu ditangani lebih rumit karena pengolahan yang ada telah berhasil menjadikannya sebagai bahan yang tidak beracun sehingga dapat digunakan untuk berbagai keperluan terutama sebagai media tanam yang potensial (Sriningsih et al., 2022). Spent ore yang digunakan sebagai media tanam telah diuji pada skala pilot di lapangan dengan hasil data biologi tumbuhan sesuai Gambar 10.

ACUTE TOXICITY TEST DATA SUMMARY	
Client	: PT. BUKIT MAKMUR RESOURCES
Work Order No	: 04/Labhit/2022
Test type	: Oral 14-day LD ₅₀
Method	: U.S. EPA OPPTS 870.1100
Test Initiation Date	: June 1 st , 2022
Test Final date	: June 14 th , 2022
SAMPLE:	
ID	: Spent Ore Treatment
Color	: Brown
Amount Received	: 500 gr
Date Received	: May 13 th , 2022
TEST SPECIES INFORMATION:	
Organism	: Mice (<i>Mus musculus</i>) male and female
Source	: Animal Laboratory Department of Biology – Institute of Technology Bandung
Collection Date	: May 27 th , 2022
Age	: 6 weeks
TEST CONDITION:	
Temperatur Range	: 26 - 27°C
Humidity Range	: 55 - 78%
Photoperiod	: 12 : 12 (light : darkness)
No. Organism/Cage	: 5
Dosage (mg/kg BW)	: 50; 500; 5,000; 15,000; and 30,000
Value of LD ₅₀ 14-d	: ≥ 30,000 mg/kg BW
Toxicity Test Results	: Non Toxic Material (Refer to Peraturan Pemerintah RI No. 101 Tahun 2014)
Test Conducted By	: Ade Supriatin

Gambar 9. Hasil LD50 Spent Ore + Fe residu + Biolite+ Agromax + ND-201 ®
 Sumber: data primer penelitian (2023)

Air limpasan yang dihasilkan dari proses *treatment* atau pengelolaan *spent ore* tersebut dilakukan analisis kandungan logam untuk menunjukkan kualitas air limpasan yang dihasilkan memenuhi baku mutu lingkungan, ditampilkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Analisis Air Limpasan

No.	Deskripsi	Satuan	Hasil	TCLP-A	TCLP-B
Pengujian Fisik					
1	pH	S.U.	7,14	7,93	6-9
2	Total Suspended Solids, TSS	mg/L	8	15	100
Logam Terlarut					
1	Cadmium, Cd	mg/L	<0,0001	0,0005	0,05
2	Chromium, Cr	mg/L	<0,001	0,036	0,5
3	Chromium Hexavalent, Cr ⁶⁺	mg/L	<0,002	<0,002	0,1
4	Cobalt, Co	mg/L	<0,001	0,002	0,4
5	Copper, Cu	mg/L	0,012	0,003	2
6	Iron, Fe	mg/L	<0,005	1,94	5
7	Lead, Pb	mg/L	<0,001	0,002	0,1
8	Nickel, Ni	mg/L	0,093	0,154	0,5
9	Zinc, Zn	mg/L	<0,005	0,012	5

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan data pada tabel, air limpasan yang dihasilkan dari kedua pengujian sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah.

Berdasarkan hasil analisis TCLP, LD 50 serta data kandungan logam pada air limpasan yang menunjukkan bahwa "treated komposit spent ore" tergolong *nontoxic material*. Oleh karena itu, PT Bukit Makmur Resources menjadikan *treated spent ore* sebagai media tanam. Hasil pengujian *spent ore* sebagai media tanam seperti pada Tabel 11.

Tabel 11. Rekap Data Pertumbuhan Tanaman

Tinggi Batang (cm)		
- Nangka	69	39
- Sirsak	62	40
- Mete	18	23
- Jati	290	220
Jumlah Daun (cm)		
- Nangka	62	18
- Sirsak	59	16
- Mete	21	21
- Jati	36	11
Diameter Batang (cm)		
- Nangka	9,5	6
- Sirsak	9,5	5
- Mete	6,5	9
- Jati	4,2	31

Sumber: data primer penelitian (2023)

Berdasarkan Tabel 11 dapat diketahui bahwa *treated composite spent ore* dapat digunakan sebagai media tanam yang baik dan di nilai efektif serta efisien untuk mengaktualisasi konsep "zero waste" yang di usung PT BMR . Hal ini ditunjukkan dengan pertumbuhan tanaman yang baik (subur).

Selain empat komoditas tersebut, PT BMR juga melakukan penanaman jagung menggunakan kedua variasi komposit *treated spent ore* sebagai media tanam. Jagung yang telah di panen selanjutnya dilakukan analisis di laboratorium Pangan PT Intertek Utama Service. Hasil analisis jagung seperti pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Uji Laboratorium Pangan

Parameter	Standar Kualitas*	Sampel Jagung**	Sampel Jagung***	Bawang Perai****
As	mg/kg	0,2	ND <0,07	ND <0,07
CD	mg/kg	0,01	ND <0,02	ND <0,02
Kr	mg/kg	0,2	ND <0,06	ND <0,06
HG	mg/kg	0,03	ND <0,03	ND <0,03
Ni	mg/kg	0,2	ND <1	ND <1
Pb	mg/kg	0,2	ND <0,07	ND <0,07

Sumber: data primer penelitian (2023)

Keterangan: ND = tidak terdeteksi (angka yang ditampilkan sesuai dengan batas deteksi laboratorium Layanan Intertek Utama).

*UU BPOM No. 23 Tahun 2007;

** media tanam bijih bekas + residu Fe + CaCO₃;

*** Media tanam: bijih bekas + residu Fe + Agromax + Biolite + ND 201

**** Media tanam: bijih bekas + agromax + biolit + ND 201

Berdasarkan hasil pengujian jagung di laboratorium pangan menunjukkan bahwa jagung yang ditanam menggunakan komposit *spent ore* baik menggunakan batu kapur maupun agromax, biolite dan ND 201[®] sebagai media tanam layak untuk dikonsumsi berdasarkan BPOM UU No. 23 tahun 2017.

Berdasarkan hasil pengujian jagung di laboratorium pangan, sesuai Tabel 12 menunjukkan bahwa tanaman jagung dan daun bawang yang ditanam dengan komposit bijih bekas baik menggunakan media tanam kapur atau agromaks, biolit, atau ND 201[®] layak dikonsumsi berdasarkan BPOM. UU No. 23 Tahun 2017. Hasil tersebut memperkuat bukti bahwa biji bekas yang dihasilkan oleh PT BMR sebagai limbah industri nikel telah berhasil dikelola dan dapat dimanfaatkan sebagai media tanam yang potensial, dan hasil pertanian yang ditanam pada media tersebut layak untuk dikonsumsi. Dengan demikian, PT BMR telah benar-benar berkomitmen dalam upaya pengelolaan lingkungan dan telah berhasil mengelola sampah menjadi komoditas yang menjadi masukan bagi proses lainnya. Prinsip-prinsip yang diterapkan sesuai dengan konsep tujuan pembangunan berkelanjutan, tujuan dua belas produksi dan konsumsi yang bertanggung jawab.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian TCLP dan LD 50, menunjukkan bahwa komposit bijih nikel yang diolah merupakan bahan yang tidak beracun dan tidak termasuk limbah B3. Perlakuan bijih *spent ore* juga berhasil meningkatkan pH dari asam kuat 3,33 menjadi netral 6,86 dan membuat bijih *spent ore* nikel berpotensi digunakan sebagai media tanam berbagai jenis komoditas hortikultura. Perlakuan tersebut juga berhasil menurunkan konsentrasi logam berat Pb menjadi 87,75% dan Cr menjadi 35,71% yang menunjukkan bahwa pengolahan bijih bekas yang tepat dapat menjadikannya sebagai bahan yang berpotensi untuk digunakan sebagai pengayaan sumber daya lahan di lokasi penelitian. Berdasarkan hasil uji skala pilot, bijih *spent ore* yang telah diberi dua perlakuan berbeda memiliki kandungan logam yang semuanya berada di bawah baku mutu sesuai ketentuan yang berlaku dan berhasil digunakan sebagai media tanam empat jenis tanaman berkayu yaitu nangka, sirsak, jambu mete, dan jati yang pertumbuhan setelah diamati selama enam bulan sangat baik dan optimal dengan hasil nangka memiliki tinggi 69 cm, jumlah daun 62, dan diameter batang 9,5 cm; sirsak tinggi 62 cm, jumlah daun 59, dan diameter batang 9,5 cm; mete memiliki tinggi 18 cm, jumlah daun 21, dan diameter batang 6,5 cm; serta jati memiliki tinggi 290 cm, jumlah daun 36, dan diameter 4,2 cm. Hasil penelitian membuktikan bahwa *spent ore* tidak beracun (hasil uji LD 50) dan telah berhasil digunakan sebagai media tanam berbagai jenis tanaman. Di sisi lain, bijih bekas yang sama juga diuji untuk menanam jagung dan daun bawang, hasilnya juga sangat baik dan dinyatakan aman untuk dikonsumsi menurut hasil uji makanan yang pertumbuhannya setelah diamati selama enam bulan sangat baik dan optimal.

5. REFERENSI

- Abu Amr, S. S., Abujazar, M. S. S., Karaağaç, S. U., Mahfud, R., Alazaiza, M. Y. D., & Hamad, R. J. A. (2023). Application of plant-based natural coagulant for sustainable treatment of steel and iron industrial wastewater, Karabuk, Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 287, 39–45. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29393>
- de Obeso, J. C., & Kelemen, P. B. (2018). Fluid rock interactions on residual mantle peridotites overlain by shallow oceanic limestones: Insights from Wadi Fins, Sultanate of Oman. *Chemical Geology*, 498(September), 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.09.022>
- Dojcinovic, M. P., Vasiljevic, Z. Z., Rakocevic, L., Pavlovic, V. P., Ammar-Merah, S., Vujancevic, J. D., & Nikolic, M. V. (2023). Humidity and Temperature Sensing of Mixed Nickel–Magnesium Spinel Ferrites. *Chemosensors*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/chemosensors11010034>
- Ghorbani, Y., Franzidis, J. P., & Petersen, J. (2016). Heap leaching technology - Current State, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(2), 73–119. <https://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
- Harvey, E., Gounand, I., Ward, C. L., & Altermatt, F. (2017). Bridging ecology and conservation: from ecological networks to ecosystem function. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 371–379.

<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12769>

- Helvacı, C., Oyman, T., Gündoğan, İ., Sözbilir, H., Parlak, O., Kadir, S., & Güven, N. (2017). Mineralogy and genesis of the Ni-Co lateritic regolith deposit of the Çaldağ area (Manisa, western Anatolia), Turkey. *Canadian Journal of Earth Science*, 55(3). <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0184>
- Karuniasa, M., & Pambudi, P. A. (2022). The analysis of the El Niño phenomenon in the East Nusa Tenggara Province, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 52(I-III), 180–185. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140388>
- Kementerian ESDM. (2020). Peluang Investasi Nikel Indonesia. In *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia* (pp. 1–40). Kementerian ESDM. [file:///C:/Users/User/Documents/Skripsi/Skripsi Bab 4/Dokumen DS 592/Booklet-Nikel-FA.pdf](file:///C:/Users/User/Documents/Skripsi/Skripsi%20Bab%204/Dokumen%20DS%20592/Booklet-Nikel-FA.pdf)
- Liang, X., Tang, J., Li, L., Wu, Y., & Sun, Y. (2022). A review of metallurgical processes and purification techniques for recovering Mo, V, Ni, Co, Al from spent catalysts. *Journal of Cleaner Production*, 376(September), 134108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134108>
- Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 09 Tahun 2006 Tentang Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pertambangan Bijih Nikel, (2006).
- Peraturan pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah bahan Berbahaya dan Beracun, Pemerintah Republik Indonesia (2014)
- Menzel, M. D. (2019). *The Role of Peridotite and Serpentine in the Deep Carbon Cycle*.
- Meshram, P., Abhilash, & Pandey, B. D. (2019). Advanced Review on Extraction of Nickel from Primary and Secondary Sources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(3), 157–193. <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1514300>
- Omon, R. M. (2010). Experiment Test on Seedling Quality of Red Meranti in Forest Concession Holder PT Erna Juliawati , Centre Kalimantan. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 7(4), 191–199.
- Pambudi, P. A., Utomo, S. W., Soelarno, S. W., & Takarina, N. D. (2023). Adaptive Vegetation Landscape Profile on Post-Coal Mining in Indonesia. *Wahana Forestra*, 18(1), 60–71. <https://doi.org/10.31849/forestra.v18i1.11939>
- Pambudi, P. A., Utomo, S. W., Soelarno, S. W., & Takarina, N. D. (2023). *Coal mining reclamation as an environmental recovery effort: a review*. 10(4), 1001–1011. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.104.0000>
- Pramudianto, A., Sudaryanto, Utomo, S. W., & Pambudi, P. A. (2019). Suitability of agroforestry system against climate conditions in Tugu Utara Village, Cisarua Sub-District, Bogor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 399(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012095>
- Pyper, R., Associates, C. & Seal, T., Uhrie, J. L., & Miller, G. C. (2019). Dump and Heap Leaching. *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*, 31–48.
- Razika, R., & Djouani, D. (2022). Advanced study on the extraction of Nickel from its ores [Oum el Bouaghi University]. In *Oum el Bouaghi University*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03637893>
- Rudke, A. P., Sikora de Souza, V. A., Santos, A. M. dos, Freitas Xavier, A. C., Rotunno Filho, O. C., & Martins, J. A. (2020). Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. *Journal of Environmental Management*, 263(February). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110392>

- Schalau, J. (2015). *Laboratories Conducting Soil , Plant , Feed or Water Testing*. The University of Arizona.
- Sriningsih, W., Iskandar, & Suryaningtyas, D. T. (2022). Utilizing fine coal waste as a topsoil substitute on mine reclamation. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 9(4), 3595–3603. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2022.094.3595>
- Wang, H. Y., Li, Y., Jiao, S. Q., Chou, K. C., & Zhang, G. H. (2023). Recovery of Ni matte from Ni-bearing electroplating sludge. *Journal of Environmental Management*, 326(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116744>
- Zhang, Y., Qie, J., Wang, X. F., Cui, K., Fu, T., Wang, J., & Qi, Y. (2020). Mineralogical Characteristics of the Nickel Laterite, Southeast Ophiolite Belt, Sulawesi Island, Indonesia. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 37(1), 79–91. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00147-y>