ITATS

SEMITAN

Jurnal Sumberdaya Bumi Berkelanjutan

https://ejurnal.itats.ac.id/semitan

Indikasi Potensi Skandium Di Zona Limonit Blok Tapunopaka, Konawe Utara, Sulawesi Tenggara

Paskarino, Y. H.[1,2], Sutarto *[1], Soesilo, J.[1], Sutopo, B.[2]

[1] Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Jl. SWK Ring Road Utara No.104, Daerah Istimewa Yogyakarta

[2] PT ANTAM Tbk, Jl. TB Simatupang No. 1, Jakarta Selatan

e-mail: yoseph.hpaskarino@gmail.com, sutarto_geomin@upnvy.ac.id

Info Artikel

Diserahkan:
13 Juni 2022
Direvisi:
31 Juli 2022
Diterima:
2 Agustus2022
Diterbitkan:
6 Agustus 2022

Abstrak

Skandium di dalam 27,22 juta ton sumberdaya terukur limonit di Blok Tapunopaka dengan kadar rata-rata 91,21 ppm atau setara dengan 2.482 ton skandium. Penelitian awal skandium dilakukan pada zona limonit dan batuan asal dari 200 data ICP OES daerah Konawe Utara termasuk 74 data dari Blok Tapunopaka, 8 data hasil petrografi batuan asal, dan 4 data hasil analisis XRD batuan asal. Batuan asal dari limonit mengnadung skandium adalah harsburgit dan klinopiroksenit. Kandungan skandium dalam batuan asal sangat menentukan kandungan skandium di zona limonit Skandium di zona limonit berkorelasi positif dengan alumunium dengan R2=0,6817, menunjukkan bahwa skandium hadir bersama dan evolusi skandium dipengaruhi oleh alumunium. Dengan tidak ditemukannya batuan basa yang kaya alumunium sebagai batuan asal dan teridentifikasinya lizardit ($(Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4$), margarit ($CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$) dan klinoklor ($Mg_{2.8}Fe_{1.75}Al_{2.7}Si_{2.65}O_{10}(OH)_8$) sebagai mineral yang mengandung alumunium pada harsburgit dan klinopiroksenit maka lizardit, margarit, dan klinoklor diduga kuat sebagai mineral pembawa skandium.

Kata kunci: skandium, limonit, tapunopaka, lizardit

Abstract

Scandium, one of the elements forming limonite rocks, is highly prospective to develop economically. In Tapunopaka Block, this element is part of 27.22 million tons of limonite measured resources with the average grade of 91.21 ppm equivalent to 2,482 tons of contained metal. Research was carried on in the limonite zone and host rock taking 200 ICP OES data in North Konawe Region including 74 data from Tapunopaka Block, 8 petrographic data from host rocks and 4 data from XRD analysis of source rocks. The host rocks formed by scandium element are harzburgite and clinopyroxenite. The amount of scandium concentration in the host rocks highly influences scandium content in the limonite zone. Scandium in the limonite zone has a positive correlation with aluminum (R^2=0,6817). This indicates that scandium presence and its evolution should be affected by aluminium. The research shows that no mafic rocks, identified as rich aluminium host rocks, was found and lizardite ($(Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4$), margarite ($CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$) dan clinochlore ($Mg_{2.8}Fe_{1.75}Al_{2.7}Si_{2.65}O_{10}(OH)_8$) is recognized as mineral containing alumimium in the harzburgite and clinopyroxenite. This concludes that lizardite, margarite, and clinochlore is indicatively defined a scandium-bearing mineral.

Keywords: scandium, limonite, tapunopaka, lizardite

1. Pendahuluan

Scandium (Sc) merupakan salah satu *heavy rare earth element (HREE)* di samping *terbium* (Tb), *dysprosium* (Dy), *holmium* (Ho), *erbium* (Er), *thulium* (Tm), *ytterbium* (Yb), *lutetium* (Lu) dan *yttrium* (Y) dan *light rare earth element (LREE)* yang meliputi *lanthanum* (La), *cerium* (Ce), *praseodymium* (Pr), *neodymium* (Nd), *promethium* (Pm), *samarium* (Sm), *europium* (Eu), *gadolinium* (Gd) [12]. Skandium merupakan logam yang sangat dibutuhkan dalam bidang industri sebagai bahan pembuatan alat-alat olahraga dan militer antara lain untuk rangka sepeda, pesawat tempur, bahkan peluru kendali. Penggunaan skandium pada saat ini adalah 35% sebagai *solid oxide fuel cell (SOFC)* untuk alat elektrolisa dalam pengembangan energi berbasis hidrogen, dan 26% di bidang pertahanan dan kedirgantaraan.

Skandium di Indonesia terkandung dalam laterit bauksit dari pelapukan granit [13] dan *laterit* nikel hasil pelapukan batuan ultramafik yaitu di Sulawesi Tenggara antara lain di Soroako dan Pomalaa [7][8], daerah Lapopao, Sulawesi Tenggara [16]. Keberadaan skandium di Indonesia belum dipelajari secara detil [13]. Batuan asal laterit nikel yang mengandung skandium adalah batuan ultramafik meliputi harsburgit, dunit, piroksenit, dan lherzolit terserpentinisasi [7], wehrlit, klinopiroksenit, dan olivin orthopiroksenit [8]. Klinopiroksen yang bersifat aluminous akan menghasilkan smektit melalui proses hidrolisis dan oksidasi pada saat berlangsungnya proses pelapukan supergen, umumnya berkomposisi *ferrosaponit* [8]. *Ferrosapoint* dapat menempati pinggiran dari klinopiroksen dengan kadar skandium dapat mencapai 130 ppm [3]. Pada proses pelapukan selanjutnya, skandium akan larut kemudian terpresipitasi dari gutit Fe-Sc *solid solution* [27], atau diadsorpsi oleh gutit [2][3][15], dapat juga mensubstitusi Fe (III) [19], dan ditambah atau diperkaya oleh gutit yang terlarut di dekat permukaan dan mengalami presipitasi membentuk hematit pada lingkungan kering [3]. Dengan demikian, di zona limonit yang kaya akan oksida besi, kadar skandium memiliki korelasi positif kuat dengan kadar oksida besi, seperti di Kaledonia Baru [24]; Moa Bay, Kuba, dan Falcondo, Republik Dominika [1]; dan di Lapapao, Sulawesi Tenggara [16].

Penelitian pendahuluan di Blok Tapunopaka ini termasuk dalam rangkaian penelitian potensi skandium di zona limonit dalam laterit nikel di Indonesia meliputi daerah Tapunopaka dan Pomalaa, di Sulawesi Tenggara, Daerah Pulau Gag, Papua Barat, dan daerah Sangaji, Maluku Utara, yang bertujuan untuk mengetahui kandungan skandium pada zona limonit dan mineral pembawanya pada batuan asal.

2. Metodologi

Sampel laterit yang dianalisis adalah sampel *pulp* limonit sebanyak 74 (tujuh puluh empat) sampel limonit dari 8 titik hasil pemboran sebelumnya. Analisis kimia *multielement* menggunakan *Induced Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES) Agilent Varian 725ES dilakukan dengan metode *four acid digest* untuk mengetahui kadar skandium dalam setiap sampel limonit. Analisis XRD sebanyak 4 (empat) sampel *pulp dari bedrock* di Plato Barat dan Plato Timur digunakan untuk mengetahui komposisi batuan asal dari laterit nikel, menggunakan alat *Bruker D8 Cu Kα X-Ray Sources dengan LynxEye ID Detector*. Analisis petrografi sayatan tipis sebanyak 8 sampel *core* dilakukan menggunakan mikroskop Nikon Eclipse LV100Pol. Ketiga analisis ini dilakukan di Laboratorium Kimia PT. ANTAM Tbk Jakarta. Sedangkan estimasi sumberdaya limonit sesuai dengan kaidah-kaidah KCMI 2017, dengan tahap meliputi d*omaining*, validasi *database*, pembuatan *drillhole*, *flattening*, embuatan *wireframe*, validasi *drillhole* dan *wireframe*, kemudian dilakukan estimasi sumberdaya. Metode yang digunakan adalah metode *Ordinary Krigging* dengan pembatasan area limonit secara tegas dan memperhatikan distribusi dan korelasi data spasial secara vertikal dan lateral.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Geologi umum

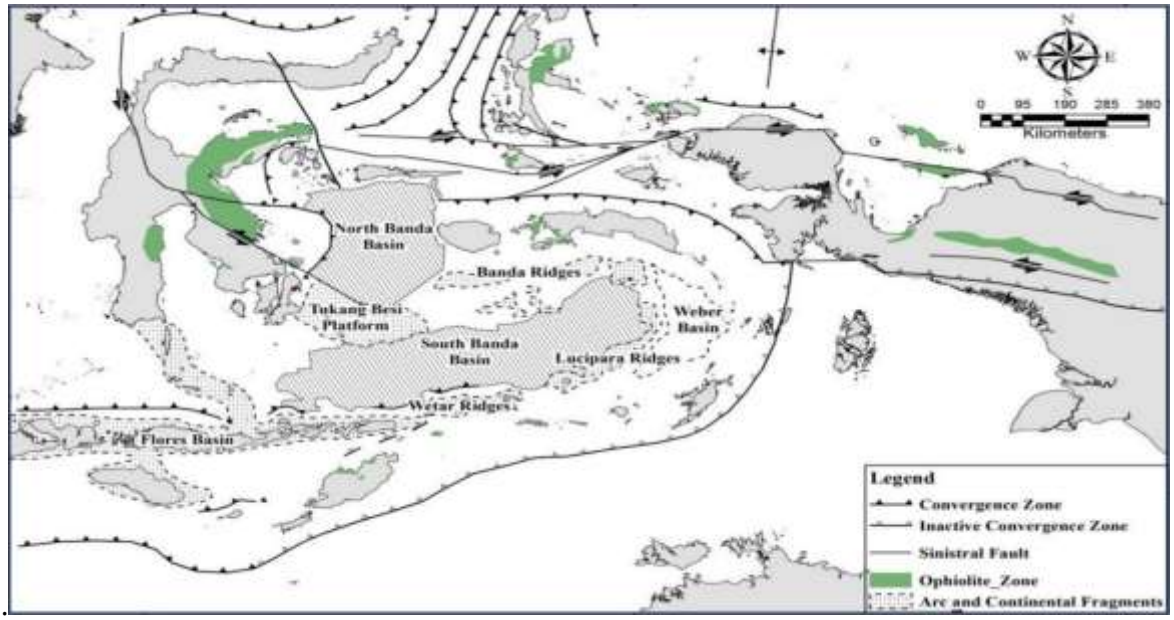
Beberapa peniliti terdahulumenyatakan bahwa subduksi atau tumbukan lempeng Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia memunculkan jajaran pulau-pulau, lipatan-lipatan, cekungan tepi lempeng, pecahan-pecahan benua atau microplate, dan kompleks ofiolit di Indonesia bagian Timur [5][8][9][10][11][14][17][21] (Gambar 1). Pulau Sulawesi yang memiliki bentuk mirip huruf “K” hingga saat ini diyakini sebagai hasil aktifitas konvergen antara microplate Jawa Timur-Sulawesi Barat di Tengah Barat hingga Selatan (bagian dari Lempeng Eurasia). Buton-Tukang Besi di Tenggara,

Banggai-Sula di Tengah Timur (bagian dari Lempeng Australia) dan Caroline (bagian dari Lempeng Philipina) di Utara, yang menghasilkan sesar-sesar mendatar dan sesar naik yang mengangkat kompleks ofiolit ke permukaan. Blok Tapunopaka termasuk di dalam Kompleks Ofiolit Sulawesi Timur (*East Sulawesi Ophiolite / ESO)* yang berasal dari *Superplume Mantle* di Laut Pasifik yang bergerak ke Barat dan terdorong oleh mikrokontinen Banggai-Sula dan menumbuk mikrokontinen Sulawesi hingga muncul ke permukaan pada Kala Miosen (~10 juta tahun lalu) [8].

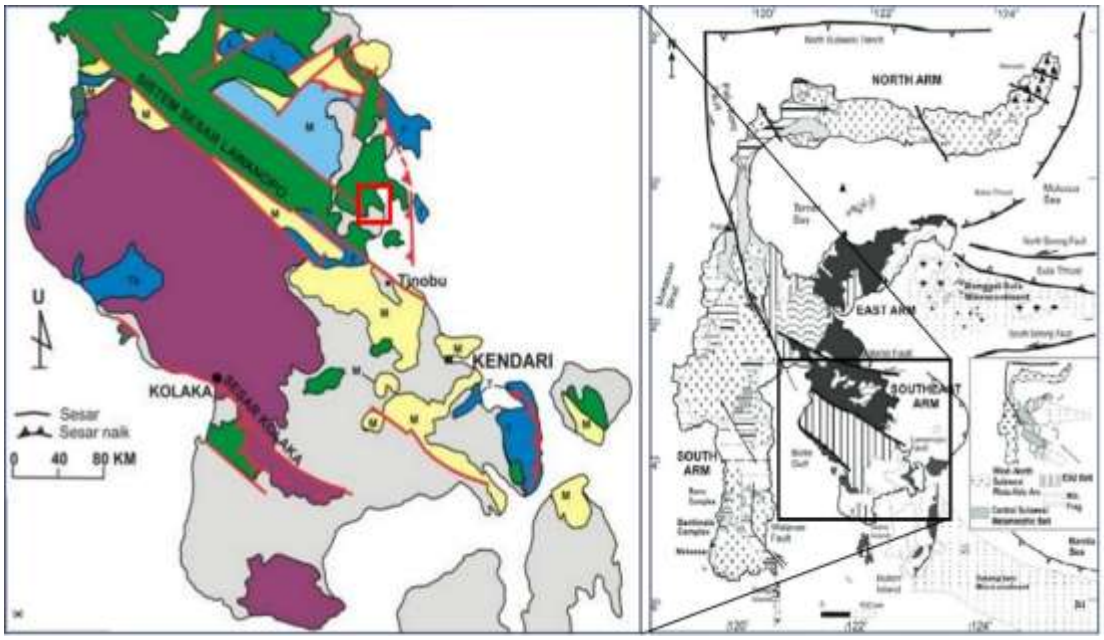
ESO pada umumnya terdiri atas harsburgit, dunit, piroksenit, lherzolite yang berada di atas batuan metamorf Kompleks Pompangeo dan batuan kabonat Yura melalui kontak *thrust fault* dan terdistribusi di daerah Pagimana-Bunta, Balantak-Teluk Poh, Ampana-Boba-Kolonedale (Lengan Timur Sulawesi), Soroako hingga Kabaena (Lengan Tenggara Sulawesi) [8] (Gambar 2b). Batuan penyusun Blok Tapunopaka adalah batuan ultramafik yang meliputi peridotit, dunit dan serpentinit berumur Kapur [22] (Gambar (2a) yang mengalami pelapukan hingga membentuk endapan laterit nikel.

Di Blok Tapunopaka, profil laterit nikel sangat dikontrol oleh morfologi sehingga dapat dikelompokkan menjadi 4 (empat) sub blok [25] (Gambar 3.) yaitu:

1) Plato Barat dengan *top soil* 1,4 meter, *limonit* 19,6 meter (50 meter di puncak), *saprolit*, 7,8 meter, dan *bedrock* berupa dunit dan harsburgit terserpentinisasi lemah hingga sedang.
2) Plato Timur dengan *top soil* 1,2 meter, *limonit* 7,5 meter (30 meter pada puncak), *saprolit* 10 meter, dan *bedrock* berupa dunit dan harsburgit terserpentinisasi lemah hingga sedang.



Gambar 1. Peta tektonik wilayah Indonesia bagian timur [5]



Gambar 2. (a). Peta geologi regional Konawe Utara dan sekitarnya [22]. Kotak merah menunjukkan Blok Tapunopaka; (b). Tatanan tektonik Pulau Sulawesi [8] [13]

3) Tanjung dengan *top soil* 1 meter, *limonit* 2,4 meter, *saprolit* 7,6 meter, dan *bedrock* berupa dunit, harsburgit, dan serpentinite.
4) Tanjung Selatan dengan *top soil* 1 meter, *limonit* 4 meter, *saprolit* 20 meter, dan *bedrock* berupa dunit dan harsburgit terserpentinisasi lemah-sedang. Limonit di Plato Barat dan Timur memiliki ketebalan masing-masing mencapai 30 dan 50 meter memiliki kandungan Fe berkisar antara 45-53% dalam bentuk mineral gutit (FeO(OH), hematit (Fe2O3), dan mineral oksida besi lainnya.

3.2. Pembahasan

Hasil analisis ICP OES menunjukkan kandungan skandium di zona limonit berkisar antara 41-113 ppm dengan rata-rata 91,21 ppm sedangkan kandungan *rare earth element* lainnya menunjukkan kadar rata-rata kurang dari 20 ppm. (Tabel 1).

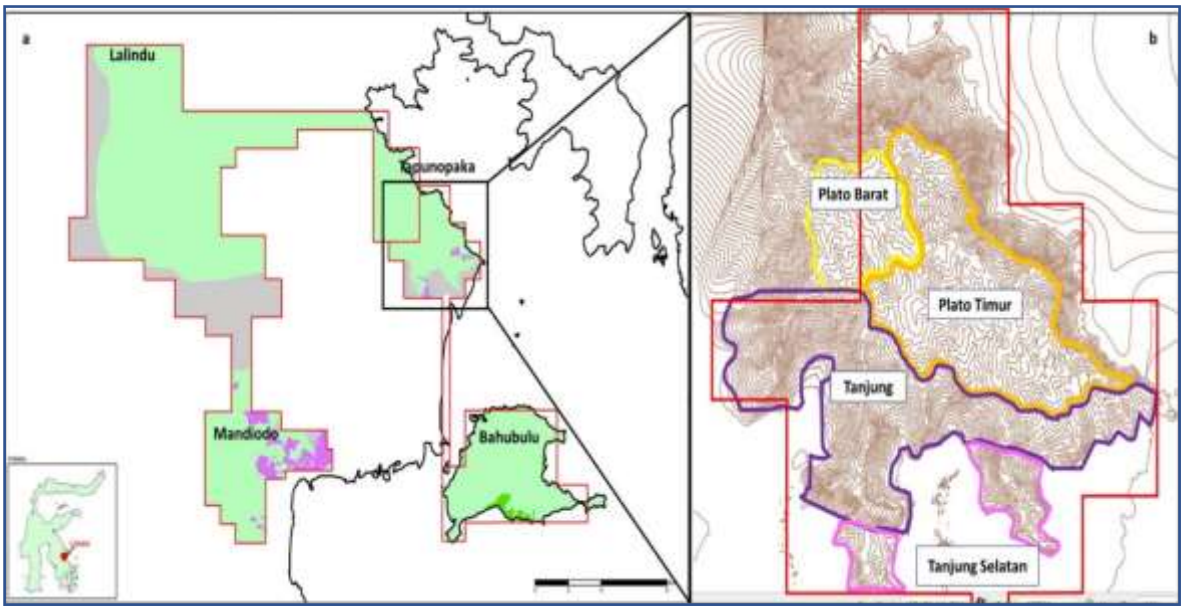
Tabel 1. Kadar skandium dan unsur REE lainnya di Blok Tapunopaka (dalam ppm)

Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	**Sc**	Sm	Tb	Te	Y	Yb
14,07	2,60	1,34	2,00	3,38	<1	6,23	0,50	14,84	5,58	**91,21**	3,75	<1	<10	9,45	2,21

Hal ini menujukkan bahwa skandium terkayakan dengan baik di zona limonit. Sumberdaya terukur limonit Blok Tapunopaka diketahui mencapai 27,22 juta ton [19][25] (Tabel 2), sehingga dengan kadar skandium sebesar rata-rata 91,21 ppm, maka indikasi potensi skandium yang terdapat di zona limonit ini dihitung melalui perkalian kadar skandium dalam limonit dengan tonase limonit (91,2 ppm x 27,22 juta ton) sehinga menghasilkan potensi logam skandium sebesar 2.482 ton.

Tabel 2. Sumberdaya Limonit Blok Tapunopaka

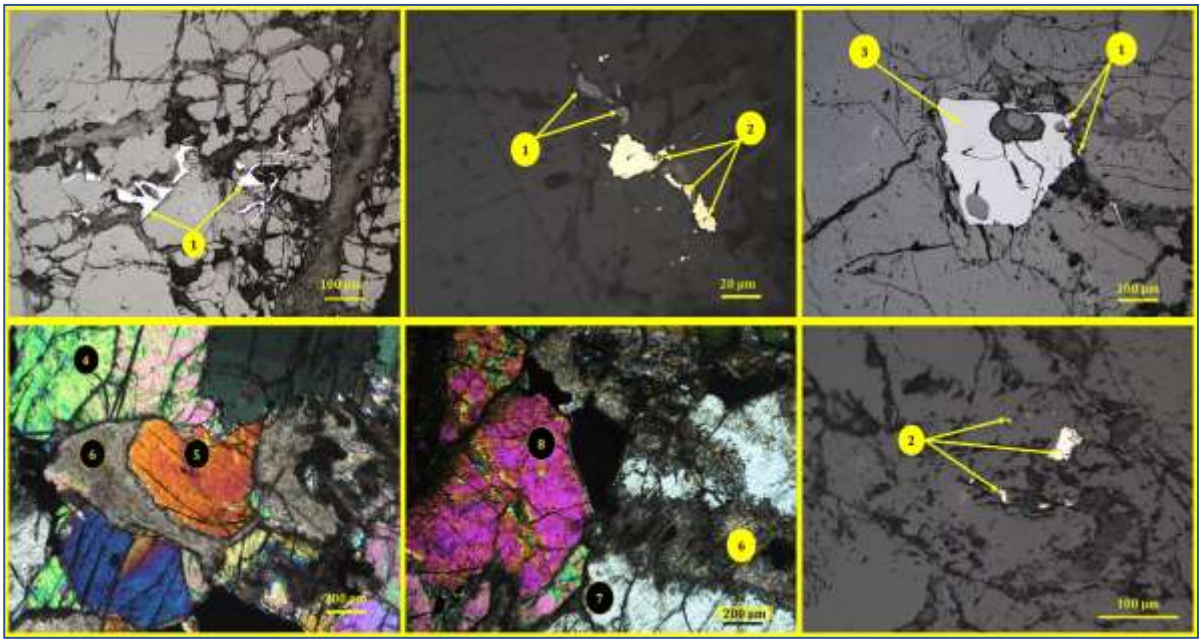
Klasifikasi	**Tonase (juta ton)**
Terukur	27,72
Terindikasi	4,89
Tereka	4,18



Gambar 3. (a). Konsesi IUP OP Tapunopaka (Blok Tapunopaka dan Blok Bahubulu) dan Konsesi IUP OP Lalindu (Blok Lalindu dan Blok Mandiodo. (b). Plato Barat; Plato Timur; Tanjung; Tanjung Selatan.

Analisis petrografi menunjukkan bahwa batuan asal laterit terdiri atas harsburgit dan dunit. Harsburgit mengandung orthopiroksen 15%, olivin 74%, serpentin 8%, 25%, magnesit 3% dan mineral logam berupa kromit, pentlandit, dan hematit. Sedangkan dunit mengandung olivin 93%, ortopiroksen 2%, talk <1%, serpentin 5%, magnesit <1%, kromit <1% dan mineral bijih berupa magnetit, pentlandite, dan kromit (Gambar 4).

Hasil analisis XRD dari 4 sampel bedrock menunjukkan kandungan mineral olivin berupa forsterite 7,91-70,48%, klinopiroksen berupa dopside 5,12-72,7%, dan ortopiroksen berupa enstatite 2,74-24,48%. Sedangkan mineral-mineral ubahan meliputi tremolite 0,15-1,57%, chamosite dan clinochlore 14,42-34,3%, talc 24,21% dan lizardite 2,14-7,58%.



Gambar 4. 1) Hematit; 2) Pentlandit; 3) Kromit; 4) & 8) Olivin; 5) Ortopiroksen; 6) Talk; 7) Klinopiroksen

Seluruh mineral ini mempunyai unsur magnesium dalam mineral penyusunnya sehingga sangat mempengaruhi kandungan unsur skandium dalam batuan asal. Berdasarkan kandungan olivin, ortopiroksen dan klinopiroksennya, maka menurut klasifikasi Steickesen (1976) batuan-batuan tersebut adalah klinopiroksenit dan harsburgit (Tabel 3).

Tabel 3. Jenis-jenis batuan asal Blok Tapunopaka

No	Kode Conto	Olivin (%)	Klinopiroksen (%)	Ortopiroksen (%)	Nama Batuan
1	Y 001	7,91	72,27	2,74	Klinopiroksenit
2	Y 002	68,61	0	24,48	Harsburgit
3	Y 003	29,43	0	6,21	Harsburgit
4	Y 004	70,48	5,12	16,82	Harsburgit

Harsburgit dengan mineral penyusun utama adalah adalah olivin dan ortopiroksen, ternyata dapat menghasilkan limonit berkadar skandium antara 99,4 hingga 113,2 ppm, sedangkan sedangkan klinopiroksenit dengan mineral penyusun utama adalah klinopiroksen menghasilkan limonit berkadar skandium mencapai 109,8 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa kadar skandium pada limonit sangat dipengaruhi jenis batuan asal yang ditentukan oleh komposisi mineral penyusunnya. Menurut [24] kadar skandium pada batuan asal secara berturut-turut yaitu dunit < peridotit < gabro/basalt < amfibolit/piroksenit yang dapat dimaknai bahwa kadar skandium dalam peridotit < piroksenit dan secara normal akan terepresentasikan pada limonit yang terbentuk sebagai hasil pelapukan dan pengendapan di atasnya. Namun di Blok Tapunopaka terjadi kondisi yang sebaliknya yaitu kadar limonit peridotit (harsburgit) > piroksenit (klinopiroksenit) maka dengan demikian kadar skandium dalam limonit di daerah ini diduga dipengaruhi juga oleh faktor-faktor lain yang mempengaruhi lateritisasi dan pengkayaan skandium pada saat pelapukan baik secara lokal maupun regional.

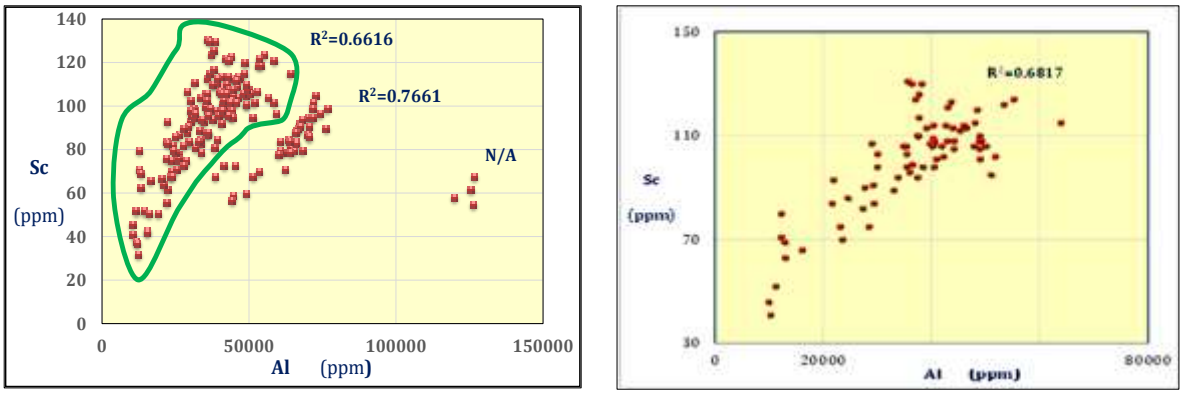
Data dari 200 (dua ratus) sampel yang berasal dari 4 (empat) blok di Konawe Utara, berdasarkan korelasinya dapat dikelompokkan menjadi; 1) Domain 1 (158 data) dengan faktor korelasi (R^2 = 0,,6616); 2) Domain 2 (38 data) dengan faktor korelasi R^2 = 0,7661; dan 3) Domain 3 hanya 4 data (Gambar 4). Blok Tapunopaka termasuk dalam domain 1 dan dipilih karena mempunyai kadar skandium tertinggi. Dari 8 (delapan) titik bor di zona limonit (74 sampel) yang mewakili seluruh bagian dari plato dan tanjung, ternyata unsur skandium memiliki korelasi positif kuat dengan alumunium dan menunjukkan faktor korelasi sebesar 0,6817. Hubungan kenaikan kadar skandium dengan kadar alumunium tergambarkan secara konsisten sehingga diduga kuat bahwa skandium di Blok Tapunopaka ini hadir dan terkayakan di zona limonit dengan peran kuat unsur alumunium. Korelasi positif antara skandium dengan alumunium di luar Blok Tapunopaka juga menunjukkan peran alumunium dalam pengkayaan skandium di daerah Konawe Utara.

Tabel 4. Kadar aluminium dan skandium Blok Tapunopaka

UNSUR SATUAN	Al ppm	Sc ppm	UNSUR SATUAN	Al ppm	Sc ppm
Scc2-i10-2	46592	113	Scc3-j2-6	28823	107
Scc2-i10-3	35514	98	Scc3-j2-7	21917	93
Scc2-i10-4	29905	98	Scc3-j2-8	21750	84
Scc2-i10-5	34887	106	Scc3-j2-9	11304	52
Scc2-i10-6	12383	71	Scc3-j2-10	10234	41
Scc2-i10-7	12364	80	Scc3-j2-11	16285	66
Scc3-j2-3	23235	75	Scc3-j2-12	12978	63
Scc3-j2-4	24614	86	Scc3-j2-13	10097	46
Scc3-j2-5	29854	103	Scc3-j2-14	12952	69

UNSUR SATUAN	Al ppm	Sc ppm
Scx3-j4-2	40411	109
Scc3-j4-3	37487	94
Scc3-j4-4	40658	108
Scc3-j4-5	44299	105
Scc3-j4-6	42059	102
Scc3-j4-7	51657	102
Scd3-a2-2	48846	105
Scd3-a2-3	50231	106
Scd3-a2-4	48857	108
Scd3-a2-5	47865	106
Scd3-a2-6	48766	101
Scd3-a2-7	40760	101
Scd3-a2-8	38372	98
Scd3-a2-9	33036	89
Scd3-a2-10	23376	70
Scd3-a2-11	28338	75
Sck3-522	42965	108
Sck3-523	46089	114
Sck3-524	40214	107
Sck3-525	39803	107
Sck3-526	44213	108
Sck3-527	63884	115
Sck3-528	54978	124
Sck3-530	33825	94
Sck3-531	29078	91
Sck3-535	38264	130
Sck8-622	35668	131
Sck8-624	36856	124

UNSUR SATUAN	Al ppm	Sc ppm
Sck8-625	37833	126
Sck8-626	43755	123
Sck8-627	42822	121
Sck8-628	53188	122
Sck8-629	43984	113
Sck8-630	48281	120
Sck8-631	45346	112
Sck8-632	35493	106
Sck8-633	37575	110
Sck8-638	49068	108
Sck8-639	51069	95
Sck8-640	36551	99
Sck8-641	37381	110
Sck8-642	37727	117
Sck8-643	40627	98
Sck8-644	35866	96
Sck8-645	35358	103
Sck9-051	48842	110
Sck9-052	48130	115
Sck9-053	40392	106
Sck9-054	29462	84
Sck9-055	27350	82
Sck10-819	41979	106
Sck10-820	42669	114
Sck10-821	40295	114
Sck10-22	38994	113
Sck10-23	27547	90



Gambar 4. Korelasi skandium dengan alumunium di zona limonit Konawe Utara dan Blok Tapunopaka termasuk di dalam garis hijau (kiri), korelasi skandium dengan alumunium di zona limonit Blok Tapunopaka dari 74 data (kanan)

Hasil analisis XRD ternyata menunjukkan bahwa mineral yang mengandung alumunium dalam batuan asal adalah lizardit dan margarit dengan komposisi $(Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4$ dan $CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$ (Tabel 4) yang terdapat dalam harsburgit dan klinopiroksenit. Dengan tidak ditemukannya batuan mafik mengandung alumunium dapat diyakini bahwa skandium dalam batuan asal di Blok Tapunopaka terdapat dalam mineral lizardit dan margarit.

Tabel 5. Komposisi Mineral Penyusun Batuan Asal

No	Kode Conto	Hasil XRD	Persentase (%)	Rumus senyawa mineral
1	Y001XRD	Forsterit syn	61,61	$Mg_2(SiO_4)$
		Lizardit-1T	27,54	$(Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4$
		Enstatite	9,71	$Mg(SiO_3)$
		Diopsid	1,15	$(Mg_{0.845}Fe_{0.048}Al_{0.083}Ti_{0.002}Cr_{0.023})(Ca0_{.828}Na_{0.102}Mg_{0.045}Fe_{0.024}Mn_{0.001})((Si_{0.981}Al_{0.019})_2O6)$
2	Y002XRD	Forsterit Fe^{2+} bearing	69,83	$(Mg_{1.72}Fe_{0.28})(SiO_4)$
		Enstatit syn	16,43	$Ca_{0.025}Mg_{0.975}SiO_3$
		Margarite-2M1	6,88	$CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$
		Lizardit-1T	6,86	$Mg_{2.7}Fe_{0.3}Si_2O_5(OH)_4$
3	Y003XRD	Lizardit-1T	37,89	$(Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4$
		Klinoklor-1MIIb Fe^{2+} bearing	30,73	$Mg_{2.8}Fe_{1.75}Al_{2.7}Si_{2.65}O_{10}(OH)_8$
		Forsterit Fe^{2+} bearing	28,37	$(Mg_{1.774}Fe_{0.226})(SiO_4)$
		Magnesioforblend Fe^{2+} bearing	3,01	$Ca^2(Mg,Fe^{+2})_4Al(Si_7Al)O_{22}(OH,F)_2$
4	Y004XRD	Forsterit Fe^{2+} bearing	64,34	$(Mg_{1.72}Fe_{0.28})(SiO_4)$
		Lizardit-1M	16,31	$(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$
		Enstatit	10,26	$MgSiO_3$
		Margarit-2M1	3,97	$CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2$
		Augit	2,38	$(Mg_{0.73}Fe_{0.23}Al0.0_2Ti0.0_2)(Ca_{0.83}Na_{0.02}Mg_{0.04}Fe_{0.11})(Si_{1.92}Al_{0.08O6})$
		Amfibol syn	1,79	$Na_2CaMg_2Ni_3Si_8O_2(OH)_2$
		Akermanit, Fe^{2+} bearing, syn	0,97	$Ca_2Mg_{0.55}Fe_{0.45}(Si_2O_7)$

4. Kesimpulan

Skandium berasal dari batuan harsburgit dan klinopiroksenit yang kemudian terlapukkan sehingga terkayakan dalam zona limonit berketebalan 30-50 meter. Kadar skandium dalam limonit dari batuan harsburgit dapat mencapai 113,2 ppm, sedangkan dari batuan klinopiroksenit dapat mencapai 109,8 ppm.

Dengan sumberdaya limonit terukur di Blok Tapunopaka sebanyak 27,22 juta ton dengan kadar rata-rata skandium sebesar 91,21 ppm, maka terdapat indikasi potensi skandium sebanyak 2.482 ton yang cukup signifikan untuk dikaji keekonomisannya. Mineral pembawa skandium dalam batuan asal adalah lizardit $((Mg,Al)_3((Si,Fe)_2O_5)(OH)_4)$, margarit $(CaAl_2(Si_2Al_2)O_{10}(OH)_2)$ dan klinoklor $(Mg_{2.8}Fe_{1.75}Al_{2.7}Si_{2.65}O_{10}(OH)_8)$ serta pengkayaan skandium di zona limonit dikontrol oleh unsur alumunium.

Penelitian akan dilanjutkan untuk mengetahui mineral pembawa skandium, geokimia limonit, dan evolusi skandium di zona limonit serta kontrol batuan induk terhadap pengkayaan skandium pada zona limonit.

Ucapan Terimakasih

Penelitian atas skandium ini difasilitasi oleh Program Penelitian dan Pengembangan *Rare Earth Elements* Skandium Unit Geomin PT ANTAM Tbk. Terimakasih kepada Bapak Abdul Bari, General Manager Unit Geomin PT ANTAM Tbk, yang telah memberikan persetujuan atas penelitian ini, dan kepada Bapak Hendra Wijayanto, General Manager Unit Bisnis Pertambangan Nikel Konawe Utara PT ANTAM Tbk, yang telah mengizinkan berlangsungnya penelitian ini, juga kepada Bapak Wendy Prayudha, Bapak Elwin Elbur, Bapak Tulus Semedie, Bapak Wanda Ilham Dani, Bapak Arnaszt Purba A, Bapak Duduk Sumargono, dan Tim Eksplorasi Nikel Sulawesi Tenggara, serta semua pihak yang telah mendukung dan membantu dalam pengambilan dan analisis sampel, pengolahan data, referensi, akomodasi dan logistik sehingga penelitian ini dapat berlangsung dengan baik.

Referensi:

[1] T. Aiglsperger *et al.*, "Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic," *Ore Geol. Rev.*, vol. 73, 2016, doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.010.

[2] M. Chassé, W. L. Griffin, S. Y. O'Reilly, and G. Calas, "Scandium speciation in a world-class lateritic deposit," *Geochemical Perspect. Lett.*, vol. 3, no. 2, 2017, doi: 10.7185/geochemlet.1711.

[3] M. Chassé, W. L. Griffin, S. Y. O'Reilly, and G. Calas, "Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 260, 2019, doi: 10.1016/j.gca.2019.06.036.

[4] U. G. & T. D. Exploration Planning & Mining Development, "Laporan Hasil Kegiatan Studi REE (Rare Earth Element) IUP/KK Nikel PT Antam Tbk," 2021

[5] R. Harris, "Geodynamic patterns of ophiolites and marginal basins in the Indonesian and New Guinea regions," *Geol. Soc. Spec. Publ.*, vol. 218, 2004, doi: 10.1144/GSL.SP.2003.218.01.25.

[6] R. A. Indra Kusuma, H. Kamaruddin, M. F. Rosana, and E. Tintin Yuningsih, "Geokimia Endapan Nikel Laterit di Tambang Utara, Kecamatan Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tengara," *J. Geol. dan Sumberd. Miner.*, vol. 20, no. 2, 2019, doi: 10.33332/jgsm.v20i2.418.

[7] A. Ito, T. Otake, A. Maulana, K. Sanematsu, Sufriadin, and T. Sato, "Geochemical constraints on the mobilization of Ni and critical metals in laterite deposits, Sulawesi, Indonesia: A mass-balance approach," *Resour. Geol.*, vol. 71, no. 3, 2021, doi: 10.1111/rge.12266.

[8] A. Kadarusman, S. Miyashita, S. Maruyama, C. D. Parkinson, and A. Ishikawa, "Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia," *Tectonophysics*, vol. 392, no. 1–4, 2004, doi: 10.1016/j.tecto.2004.04.008.

[9] H. Kamaruddin, "Model Konseptual Endapan Laterit Nikel Pomalaa, Sulawesi Tenggara, Indonesia," Padjajaran University Indonesia, 2018.

[10] H. Kamaruddin, R. A. Indrakususma, M. F. Rosana, N. Sulaksana, and E. T. Yuningsih, "PROFIL ENDAPAN LATERIT NIKEL DI POMALAA, KABUPATEN KOLAKA, PROVINSI SULAWESI TENGGARA," *Bul. Sumber Daya Geol.*, vol. 13, no. 2, 2018, doi: 10.47599/bsdg.v13i2.221.

[11] T. M. Van Leeuwen, “Mineral Deposits of Sulawesi,” 2011, p. 130. doi: 10.13140/2.1.3843.2322.

[12] K. R. Long, B. S. Van Gosen, N. K. Foley, and D. Cordier, “The principal rare earth elements deposits of the United States: A summary of domestic deposits and a global perspective,” in *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*, 2012. doi: 10.1007/978-90-481-8679-2_7.

[13] A. Maulana, Sufriadin, K. Sanematsu, and M. Sakakibara, “Study on Sc-bearing Lateritic Ni deposits in Ultramafic Rock from Sulawesi: A New Paradigm in Indonesia Metal Mining Industry,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 676, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/676/1/012032.

[14] C. Monnier, J. Girardeau, R. C. Maury, and J. Cotten, “Back-arc basin origin for the East Sulawesi ophiolite (eastern Indonesia),” *Geology*, vol. 23, no. 9, 1995, doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0851:BABOFT>2.3.CO;2.

[15] J. C. Norman and L. A. Haskin, “The geochemistry of Sc: A comparison to the rare earths and Fe,” *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 32, no. 1, 1968, doi: 10.1016/0016-7037(68)90089-6.

[16] S. Onggang, A. Maulana, Sufriadin, and U. R. Irfan, “Preliminary Study of Scandium Enrichment in Lateritic Profile from Weathered Ultramafic Rock in Lapaopao Area Kolaka Regency of Southeast Sulawesi,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 921, no. 1. doi: 10.1088/1755-1315/921/1/012040.

[17] C. Parkinson, “Emplacement of the East Sulawesi ophiolite: evidence from subophiolite metamorphic rocks,” *J. Asian Earth Sci.*, vol. 16, no. 1, 1998, doi: 10.1016/S0743-9547(97)00039-1.

[18] PT ANTAM Tbk, “Navigating the Challenges for Business Sustainability,” Jakarta, Indonesia, 2020.

[19] PT ANTAM Tbk, “Strengthening Core Business for Sustainable Growth,” Jakarta, Indonesia, 2021.

[20] H. B. Qin, S. Yang, M. Tanaka, K. Sanematsu, C. Arcilla, and Y. Takahashi, “Scandium immobilization by goethite: Surface adsorption versus structural incorporation,” *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 294, 2021, doi: 10.1016/j.gca.2020.11.020.

[21] T. O. Simandjuntak and A. J. Barber, “Contrasting tectonic styles in the neogene orogenic belts of Indonesia,” *Geol. Soc. Spec. Publ.*, vol. 106, 1996, doi: 10.1144/GSL.SP.1996.106.01.12.

[22] Surono, *Geologi Lengan Tenggara Sulawesi*, 2nd ed. Bandung: Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral Republik Indonesia, 2013.

[23] Surono, “A sedimentological investigation of southeastern Sulawesi, Indonesia, with special reference to the Kendari area,” *Univ. Wollongong Diss.*, 1994.

[24] Y. Teitler, M. Cathelineau, M. Ulrich, J. P. Ambrosi, M. Munoz, and B. Sevin, “Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites,” *J. Geochemical Explor.*, vol. 196, 2019, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.10.009.

[25] U. G. & T. D. Tim Eksplorasi Nikel Sulawesi Tenggara, “Laporan Akhir Eksplorasi Nikel Laterit Daerah Tapunopaka Dan Lalindu Timur Provinsi Sulawesi Tenggara,” 2021.

[26] S. Tougaard and A. Ignatiev, “Atomic structure of the scandium (0001) surface,” *Surf. Sci.*, vol. 115, no. 2, 1982, doi: 10.1016/0039-6028(82)90407-1.

[27] M. Ulrich, M. Cathelineau, M. Muñoz, M. C. Boiron, Y. Teitler, and A. M. Karpoff, “The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia,” *J. Geochemical Explor.*, vol. 197, 2019, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.11.017.

[28] A. E. Williams-Jones and O. V. Vasyukova, “The economic geology of scandium, the runt of the rare earth element litter,” *Econ. Geol.*, vol. 113, no. 4, 2018, doi: 10.5382/econgeo.2018.4579.