

# Potensi pembentukan saluran lombong berasid di Bukit Besi, Dungun, Terengganu

(The potential of acid mine drainage formation at Bukit Besi, Dungun, Terengganu)

NUUR HANI MOHAMMED<sup>1,2,\*</sup>, WAN ZUHAI WAN YAACOB<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Geologi, Pusat Pengajian Sains Sekitaran dan Sumber Alam, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup> No. 24, Jalan Kp 2/2 Taman Kota Perdana, Bandar Putra Permai, 43300 Seri Kembangan, Selangor, Malaysia

\* Corresponding author email address: [nuurhanimohammed@gmail.com](mailto:nuurhanimohammed@gmail.com)

**Abstrak:** Saliran lombong berasid (SLB) di Bukit Besi berkait dengan kepekatan pelbagai logam berat yang tinggi seperti besi, plumbum, kuprum, zink, kadmium, mangan, nikel dan arsenik. Sampel kajian diperoleh daripada tapak lombong aktif Cheng Yu, Bukit Besi. Antara ujian fizikal dan kimia yang digunakan ialah ion kromatografi (IC) dan plasma induktif (ICP), prosedur ketoksikan ciri-ciri larut lesap (toxicity characteristic leaching procedure, TCLP), dan mineralogi lempung dengan menggunakan teknik XRD (X-ray diffraction) dan XRF (X-ray fluorescence). Ujian statik iaitu pengiraan asid-bes digunakan untuk meramal potensi asid dan bes. Hasil analisis air menunjukkan air berasid dengan nilai pH < 3.5 bersama kepekatan logam berat seperti Fe (822.03 mg/L) and sulfat (4455.87 mg/L) yang tinggi. Pengiraan asid-bes batuan menunjukkan hasil yang amat ketara dengan potensi pengeluaran asid yang tinggi (9.5 ke 155.0 kg CaCO<sub>3</sub>/tan). Hasil daripada analisis fizikal dan kimia jelas menunjukkan bahawa kawasan Bukit Besi berpotensi terdedah dengan pembentukan saluran lombong berasid.

**Kata kunci:** Saliran lombong berasid, logam berat, pengiraan asid-bes, analisis penjerapan

**Abstract:** Acid mine drainage (AMD) at Bukit Besi is often accompanied by high concentrations of various heavy metal such as iron, lead, copper, zink, cadmium, manganese, nickel, and arsenic. The samples were collected from active mining site at Cheng Yu, Bukit Besi. The physical and chemical tests used are ion chromatography (IC) and inductively coupled plasma (ICP) test, toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), and clay mineralogy using XRF (X-ray fluorescence) and XRD (X-ray diffraction) techniques. Static test which is acid-base counting are used to predict the potential of AMD. The water analysis showed a very acidic water with pH < 3.5 with high concentration of heavy metals like Fe (822.03 mg/L) and sulfate (4455.87 mg/L). Acid-bases rock calculation shows highly significant results which have high potential of acid production (9.5 to 155.0 kg CaCO<sub>3</sub>/ton). The results from physical and chemical analysis show Bukit Besi area is potentially exposed to formation of acid mine drainage.

**Keywords:** Acid mine drainage, heavy metal, acid-base accounting, adsorption analysis

## PENGENALAN

Bukit Besi merupakan salah satu kawasan yang kaya dengan sumber bijih besi sehingga kawasan ini pernah dicatatkan dalam sejarah sebagai salah satu hub-industri perlombongan yang terpenting di Asia Tenggara pada masa dahulu. Sehingga kini, Bukit Besi masih lagi menjadi kawasan penting bagi industri perlombongan bijih besi.

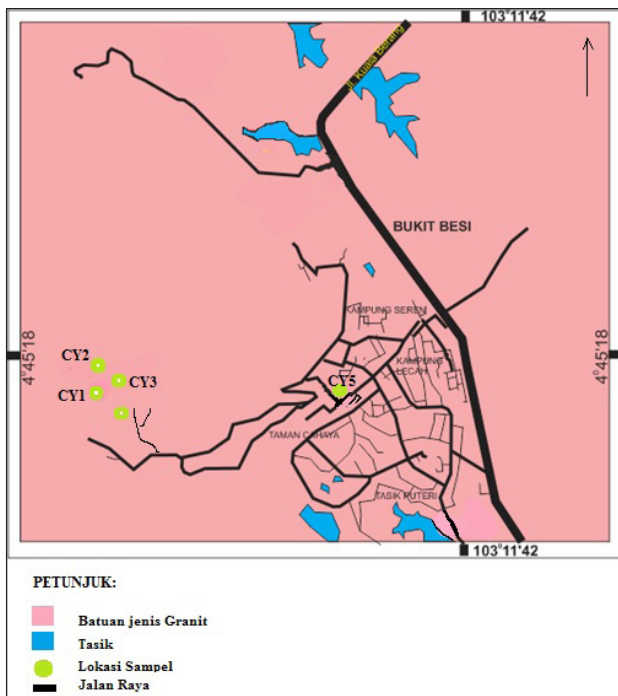
Pembentukan saluran lombong berasid dan pencemaran yang berkaitan dilihat dengan jelas menjadi masalah persekitaran utama yang perlu di hadapi oleh industri perlombongan di Malaysia mahupun seantero dunia (Lapakko, 1993). Kajian dan survei lapangan telah dijalankan pada awal bulan Mac 2015. Pada masa itu, pemerhatian awalan telah dilakukan di lapangan dan ketika itu terdapat beberapa tapak lombong yang masih lagi aktif beroperasi dan terdapat juga beberapa kawasan tapak lombong tinggalan (hasil kegiatan lombong) yang

telah membentuk kolam terbiar dan tasik rekreasi bagi penduduk setempat (Rajah 1).

Oleh yang demikian, beberapa sampel kajian telah diambil berdekatan dengan tapak lombong dan ramalan potensi pembentukan saluran lombong berasid (SLB) telah dilakukan untuk mengenal pasti masalah dan punca pembentukan SLB di tapak lombong. Seterusnya, kaedah rawatan yang bersesuaian dikenal pasti bagi mengatasi masalah saluran lombong berasid di tapak lombong Bukit Besi.

## Geologi am Bukit Besi

Kawasan kajian iaitu Bukit Besi, Terengganu terbentuk dan terdiri daripada longgokan bijih besi dan juga bijih timah yang terletak di dalam Jalur Timah Pantai Timur Malaysia (25 km daripada barat Dungun). Formasi batuan tertua yang terdapat di Jalur Timur terdiri daripada batuan



**Rajah 1:** Peta lokasi penyampelan sampel air di kawasan kajian Bukit Besi, Dungun, Terengganu.

sedimen klastik berusia awal Karbon. Batuan ini telah mengalami metamorfisma rantau bergred rendah menjadi metakuarzit dan filit dan umumnya dipanggil metasedimen yang kemudiannya ditindih secara tidak selaras oleh endapan daratan (aluvium) Kuarter (Singh, 1985; Ibrahim, 2004).

Batuan igneus yang terdapat di kawasan Bukit Besi kebanyakannya terdiri daripada batuan jenis granit-biotit dan batuan minor komposisi sederhana yang terbentuk di dalam Granit Jalur Pantai Timur (Ibrahim, 2004). Batuan granit di kawasan ini berusia dalam lingkungan Lewat Perm-Awal Trias dan Lewat Trias (Bignell & Snelling, 1977) serta batuan igneus pertengahan berusia Karbon (Snelling *et al.*, 1968). Batuan granit juga dipotong oleh set kekar secara selari dan sub-selari secara songsang dan dicirikan dengan pembentukan sesar-sesar utama di mana kebanyakan sesar merupakan kawasan yang menggalak pembentukan mineral (Azman, 2004).

Selain itu, lombong bijih besi merupakan longgokan bijih primer Jalur Timah-Tungsten Thai-Melayu yang merangkumi 3500 km negeri Shan, Utara Burma sehingga Pulau Belitung, Indonesia (Hosking, 1977). Pemineralan tungsten lebih ketara di jalur timur bahagian utara berbanding di sebelah selatan yang di dominasi oleh bijih timah di sempadan Thai-Malaysia. Jalur ini merupakan mendapan berusia Paleozoik dan Mesozoik Bawah yang terdiri daripada batu pasir kuarza dan argilit bersama batuan karbonat dan diselangi dengan batuan vulkanik. Longgokan bijih primer seperti longgokan magnetit banyak terdapat di Bukit Besi, Machang Setahun dan Pelepah Kanan di Jalur Pantai Timur Malaysia (Hutchison, 1984; Jackson & Helgeson, 1985).

Pemineralan timah-besi di Bukit Besi diterajui oleh batuan kuarzit basal berusia Karbon Bawah dan ditindih oleh jujukan syal. Jujukan syal ini dilapisi dengan batuan silikat dan marmar yang terdiri daripada kekanta magnetit, pirotit-magnetit dan pirotit-troilit-pirit (Yeap, 2000). Jujukan yang terbentuk kemudiannya dipotong oleh rejahan granit berusia Perm, di mana berlakunya proses pemineralan di kawasan sempadan rejahan (Rajah 2).

**BAHAN DAN KAEDAH**

Kaedah penyelidikan melibatkan dua kaedah iaitu kaedah lapangan dan kaedah makmal yang dijalankan secara berperingkat. Kerja lapangan yang dijalankan di lapangan termasuklah pensampelan bahan kajian seperti larutan SLB, batuan, dan mineral bijih di setiap lokaliti untuk tujuan ujian di makmal. Prosedur makmal yang dilakukan termasuklah analisis air, prosedur ketoksikan ciri-ciri larut lesap (TCLP), pencirian geokimia dan mineral.

**Analisis air**

Analisis efluen saluran lombong berasid di Bukit Besi dilakukan untuk mengenal pasti tahap kualiti air yang terdapat di permukaan tapak lombong. Kaedah ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) sangat sesuai digunakan untuk mengetahui kandungan logam yang hadir di dalam air semula jadi dan air minuman, seterusnya dijadikan sebagai penanda aras terutamanya berkaitan dengan kawasan kawalan yang tercemar dengan logam bertoksik (Voica *et al.*, 2011). ICP-MS digunakan untuk penentuan kehadiran unsur manakala mesin ICP-MS Perkin Elmer Elan DRC (e) digunakan untuk menganalisis sampel air. Sebelum unsur terlarut sampel air dianalisis, sampel air perlu dituras melalui kertas turas bersaiz liang 0.45 µm bertujuan untuk menapis segala kekotoran. Air turasan kemudiannya dititiskan dengan serta-merta dengan asid nitrik supaya nilai pH < 2 untuk memelihara keseimbangan



**Rajah 2:** Sempadan dua jenis batuan yang terdiri daripada jasad granit berwarna hitam dan putih serta batuan sedimen di mana proses pemineralan yang pesat berlaku di kawasan sempadan yang berlaku sentuhan antara kedua-dua jenis batuan berbeza.

larutan dan dicairkan dengan 10x pencairan (1:10) sebelum dianalisis.

### Pencirian unsur dan mineral

Semua jenis sampel seperti batuan, tanah/amang, bijih dan sisa industri dihantar ke makmal CRIM UKM (Centre for Research and Instrumentation) untuk dianalisis dengan kaedah XRD (X-ray diffraction) yang digunakan untuk mengetahui komposisi mineral, manakala pencirian XRF (X-Ray Fluorescence) untuk menganalisis komposisi unsur. Sebelum analisis XRD dan XRF dilakukan, sampel bahan perlu disediakan dalam bentuk pelet yang dipadatkan. Pelet sampel disediakan dengan memberi tekanan terhadap serbuk sampel menggunakan mesin penekan jenis silinder. Sebanyak 9 gram serbuk sampel ditimbang dan dimasukkan ke dalam set silinder. Kemudian pelet pengikat Geo-Quant (~ 2.7 g) dimasukkan di sekeliling dan menutupi sampel. Setelah itu, tekanan (15 ton) dikenakan ke atas sampel dalam set silinder untuk menghasilkan sampel berbentuk pelet. Berat pelet bergantung kepada ciri-ciri dan saiz butiran, dan boleh diperbaiki dengan menghancurkan sampel kepada saiz yang lebih halus (Gakuto, 2015) dan sampel serbuk juga perlu dicampur dengan agen pengikat.

### Prosedur ketoksikan ciri-ciri larut lesap (Toxicity characteristic leaching procedure, TCLP)

Ujian ini dijalankan dengan merujuk kepada kaedah 1311 (USEPA, 1992). Sebelum ujian dijalankan, nilai pH sampel kajian diperolehi terlebih dahulu. Sampel ditimbang sebanyak 5 gram dan dimasukkan ke dalam bikar berisipadu 50 ml. Air suling dipipet sebanyak 25 ml dengan nisbah 1:5. Larutan sampel dikacau dengan menggunakan spatula dan pH awal bagi setiap sampel direkodkan. Larutan dibiarkan selama 24 jam di bawah suhu bilik sebelum nilai pH akhir dicatatkan. Jika nilai pH yang diperolehi melebihi 5, masukkan 3.5 ml larutan 1.0 N HCl ke dalam bikar dan panaskan sehingga mencapai takat 50°C. Setelah bikar dibiarkan selama 10 minit di bawah suhu bilik dan menjadi sejuk, nilai pH direkodkan. Cecair pengekstrak #1 dipilih jika nilai pH tidak melebihi 5, manakala jika nilai pH adalah melebihi 5, cecair pengekstrak #2 digunakan. Setelah cecair pengekstrak dikenal pasti, timbang sampel sebanyak 2.0 gram dan dimasukkan ke dalam tiub plastik (50 ml). Sampel dicampur dengan 40 ml cecair pengekstrak dan digoncang selama 24 jam. Setelah itu, cecair jernih (effluen) dituras dan di pipet sebanyak 1 ml, kemudian effluen dimasukkan ke dalam tiub plastik (10 ml) dan dipenuhkan dengan air suling (pencairan 10x).

### Pengiraan asid-bes

Ujian statik yang digunakan bagi meramal pengeluaran saliran lombong berasid di Bukit Besi ialah pengiraan asid-bes (Acid-base accounting). Prosedur pengiraan asid-bes melibatkan dua ujian berasingan iaitu ujian potensi pengeluaran asid (APP) dan ujian potensi penutralan



**Rajah 3:** Penyediaan ujian potensi pengeluaran asid bagi sampel tanah amang dan batuan yang terdapat di tapak saliran lombong berasid.

(NP). Kedua-dua ujian menggunakan sampel bersaiz 0.2 mm. Ujian NP (ujian “fizz”) dijalankan mengikut kaedah piawaian Sobek (Sobek *et al.*, 1978), manakala ujian APP pula (Rajah 3) mengikut kaedah hidrogen peroksida (Smith *et al.*, 1974).

## HASIL DAN PERBINCANGAN

### Pencirian SLB

Jadual 1 menunjukkan hasil keputusan parameter *ex-situ* seperti nilai pH, konduktiviti, jumlah pepejal terlarut (TDS) dan kemasinan serta kepekatan kation dan anion yang terdapat dalam larutan SLB bagi tapak lombong Bukit Besi. Hasil analisis air lombong mendapati air berada dalam fasa paling berasid dengan nilai pH 2.59 manakala nilai konduktiviti dan TDS yang direkodkan juga adalah amat tinggi masing-masing dengan nilai 4000  $\mu\text{s/cm}$  dan 2070 mg/L. Kolam 5 (CY5) pula mencatatkan nilai pH menghampiri neutral iaitu 6.86 manakala nilai konduktiviti dan TDS adalah paling rendah iaitu 139.4  $\mu\text{s/cm}$  dan 65.3 mg/L. Kawasan tapak lombong Bukit Besi secara umumnya menunjukkan kawasan yang berasid dengan bacaan pH yang rendah (< 3.5) bagi kolam takungan dengan nilai konduktiviti yang tinggi (> 352  $\mu\text{s/cm}$ ). Jenkins *et al.* (2000) menyatakan bahawa saliran lombong berasid berlaku disebabkan oleh proses luluhawa mineral pirit yang teroksida dan menghasilkan air yang sangat berasid (< pH 3). Kajian Liew & Sheppard (2001) pula mendapati bahawa nilai konduktiviti adalah tinggi manakala nilai pH rendah pada

**Jadual 1:** Bacaan parameter *ex-situ* sampel air SLB / effluen bagi tapak lombong Cheng Yu, Bukit Besi.

Lokasi	Suhu (°C)	pH	Konduktiviti ( $\mu\text{s/cm}$ )	TDS (mg/L)
CY1	34.4	2.63	3230	1780
CY2	35.0	3.10	4270	2350
CY3	34.0	3.30	1950	1023
CY4	35.5	2.59	4000	2070
CY5	28.6	6.86	139.4	65.3

persekitaran SLB. Mereka juga mendapati bahawa nilai konduktiviti sangat berkait rapat dengan kandungan sulfat, kehadiran pepejal terlarut serta kepekatan logam.

Jadual 2 menunjukkan analisis kepekatan ion sulfat, klorida dan fluorida. Hasil analisis larutan SLB di tapak lombong Cheng Yu juga mendapati kepekatan ion sulfat adalah tinggi pada CY4 (4455.87 mg/L) dan CY2 (3755.99 mg/L) manakala CY5 menunjukkan nilai kepekatan ion sulfat yang paling rendah iaitu 40.38 mg/L. Merujuk kepada Malin *et al.* (2015), saluran yang terbentuk daripada batuan yang kaya dengan logam sulfida akan menyebabkan gangguan pada alam sekitar melalui pembentukan sulfat yang tinggi serta pencemaran logam berat. Selain itu, menurut Gurdeep Singh (1907), sifat jasad air yang kurang berasid atau neutral (pH 6 – pH 7) mempengaruhi kandungan ion sulfat yang terkandung dalam air manakala air yang lebih alkali dihasilkan daripada bahan berkapur daripada batuan perumah yang bertindak meneutralkan air yang berasid.

Jadual 3 menunjukkan perbandingan antara nilai kepekatan unsur logam berat di tapak lombong dengan nilai Akta Kualiti Alam Sekitar (EQA 1974) dan Indeks Kualiti Air (IKA) mengikut piawai A (Jabatan Alam Sekitar, 2008).

**Jadual 2:** Keputusan analisis kepekatan ion  $SO_4^{2-}$ , Cl<sup>-</sup> dan F<sup>-</sup> (mg/L) dalam larutan SLB.

Tapak Lombong	Purata Kepekatan Ion (mg/L)		
	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Klorida (Cl <sup>-</sup> )	Fluorida (F <sup>-</sup> )
CY1	2944.95±62.9	2.57±0.17	0.15±0.06
CY2	3755.99±57.85	2.38±0.18	0.82±0.07
CY3	1501.43±14.79	2.22±0.01	0.45±0.01
CY4	4455.87±112.44	2.46±0.24	0.66±0.07
CY5	40.38±1.19	2.88±0.03	0.04

Berdasarkan analisis kepekatan logam berat yang diperolehi didapati bahawa keseluruhan tapak lombong telah dicemari oleh unsur-unsur logam berat kadmium (Cd), ferum (Fe) dan mangan (Mn). Kepekatan Fe paling tinggi dicatatkan di tapak lombong CY2 (827.92 mg/L) diikuti oleh CY3 iaitu 193.24 mg/L, CY4 iaitu 82.20 mg/L dan CY1 iaitu 73.52 mg/L. Logam berat Mn pula direkodkan tinggi di tapak lombong CY2 (40.16 mg/L) diikuti dengan CY4 (19.97 mg/L), CY3 (18.82 mg/L) dan CY1 (8.54 mg/L). Selain dicemari dengan logam berat Cd, Mn dan Fe, tapak lombong CY1, CY2, CY3 dan CY4 turut dicemari dengan logam berat Pb (0.13 mg/L, 1.74 mg/L, 1.92 mg/L dan 0.19 mg/L) dan logam berat Cu (0.20 mg/L, 0.42 mg/L, 0.25 mg/L dan 1.07 mg/L). Selain itu, tapak lombong CY2 juga mencatatkan kehadiran logam berat Zn yang tinggi iaitu 3.27 mg/L. Kehadiran SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Fe dan Mn dikenali sebagai unsur-unsur penting yang terdapat di dalam SLB yang sangat berasid di mana nilai pH larutan adalah rendah (Nordstrom *et al.*, 2000; Charles & Cravotta, 2006).

### Pencirian mineral dan unsur

Jumlah deposit sulfida juga adalah berbeza dari segi jumlah, jenis dan tekstur. Analisis XRD dilakukan untuk mendapatkan maklumat berkenaan dengan komposisi mineralogi yang terdapat dalam sampel batuan (Jadual 4) dan untuk mengesan kehadiran mineral penyebab SLB terutamanya mineral sulfida dan mineral peneutral asid terutamanya mineral karbonat. Keputusan analisis XRD bagi sampel B1 (Syerit alkali feldspar) lebih didominasi oleh mineral sulfida seperti mineral pirit manakala batuan B3 (syerit alkali feldspar kuarza) pula menunjukkan peratus kehadiran mineral karbonat yang lebih tinggi seperti kalsit. Analisis XRD bagi batuan B4, B5 dan B6 menunjukkan sampel mengandungi mineral silika (kuarza) yang lebih dominan berbanding mineral lain melebihi 35%. Pencirian dan analisis kimia IUGS berdasarkan jumlah alkali (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) melawan SiO<sub>2</sub> mendapati ketiga-tiga batuan adalah merupakan batuan igneus jenis vulkanik iaitu andesit (B4), dasit (B5) dan foidit (B6).

**Jadual 3:** Perbandingan analisis kepekatan logam berat (mg/L) bagi tapak lombong Bukit Besi dibandingkan dengan nilai Piawaian EQA 1974 dan Piawaian A (JAS, 2008).

Tapak Lombong	(mg/L)						
	Pb	Cd	Cu	Mn	Zn	Fe	As
CY1	0.13	0.05	0.20	8.54	0.38	73.52	0.04
CY2	1.74	0.01	0.42	40.16	3.27	827.92	0.02
CY3	1.92	0.01	0.25	18.82	1.51	193.24	0.01
CY4	0.19	0.01	1.07	19.97	0.83	82.20	0.01
CY5	0.01	0.01	0.01	2.09	0.34	0.25	0.01
<b>EQA 1974</b>	0.1	-	0.2	-	2.0	1.0	0.05
<b>Piawaian A</b>	0.10	0.01	0.20	0.20	2.00	1.00	0.05

Jadual 5 menunjukkan komposisi elemen-elemen yang membentuk batuan di tapak lombong Cheng Yu. Berdasarkan jadual, batuan B1 terbentuk daripada komposisi elemen  $SO_3$  dan  $Fe_2O_3$  yang tinggi iaitu 56.6 % dan 39.06 %, yang juga

merupakan komponen utama dalam pembentuk mineral pirit. Batuan B2 pula terbentuk dengan ferik oksida iaitu magnetit yang lebih mendominasi (68.41 %) diikuti dengan mineral silika iaitu kuarza sebanyak (20.17 %). Batuan B3 yang terletak di dalam jasad permineralan antara dua jenis batuan iaitu igneus dan sedimen telah membentuk CaO (kapur terbakar) hasil daripada penguraian terma (suhu yang tinggi) dan menghasilkan mineral kalsit dengan komposisi 67.39 % diikuti dengan  $SiO_2$  (7.44 %). Batuan B4 dan B5 pula merupakan batuan dari kumpulan igneus yang terdiri daripada mineral kuarza ( $SiO_2$ ) yang tinggi iaitu sebanyak 61.64 % dan 65.39%, diikuti dengan aluminium oksida yang lebih tinggi dalam batuan B4 (13.13 %) manakala mineral kalsit yang lebih tinggi dalam batuan B5 (10.39 %). Komposisi elemen yang membentuk batuan B6 pula terdiri daripada  $SiO_2$  (38.33 %), diikuti dengan  $Fe_2O_3$  (23.66%) dan CaO (18.35 %).

Jadual 6 menunjukkan analisis komposisi mineralogi yang terdapat dalam sampel bijih pirit, magnetit dan hematit yang terdapat di tapak lombong Cheng Yu. Jadual 7 mendapati bijih pirit terdiri daripada pirit sebagai mineral utama dengan kandungan sulfur yang tinggi (62.59 %) serta ferum oksida (34.38 %). Bijih magnetit pula didominasi oleh

**Jadual 4:** Pengelasan mineralogi utama bagi sampel batuan yang terdapat di tapak lombong Cheng Yu Bukit Besi, Terengganu.

Bil.	Jenis Batuan	Mineral
1	B1	Pirit, kuarza, korundum
2	B2	Magnetit, Tridimit, kalsit
3	B3	Kalsit, albit, hematit
4	B4	Kuarza, korundum, biotit
5	B5	Kuarza, albit, kalsit
6	B6	Kuarza, magnetit, kalsit

**Jadual 5:** Peratus komposisi elemen pembentuk batuan berdasarkan analisis XRF.

Formula	Peratus (%)					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
$SO_3$	56.6	0.61	0.26	0.16	0.25	3.32
$Fe_2O_3$	39.06	68.41	1.02	3.11	3.2	23.6
$SiO_2$	1.2	20.17	7.44	61.64	65.39	38.3
$Al_2O_3$	0.55	2.33	2.14	13.13	12.97	2.27
CaO	0.08	5.08	67.39	2.31	10.39	18.3
MgO	0.05	2.06	2.43	0.31	0.26	5.37
$K_2O$	0.04	0.29	0.5	3.84	2.66	0.31
$TiO_2$	0.02	0.09	0.08	0.24	0.21	0.07
MnO	0.01	0.3	0.07	0.03	0.03	0.41
$P_2O_5$	-	0.09	0.06	0.1	0.09	0.14
ZnO	-	0.07	-	-	0.03	0.09
$ZrO_2$	-	-	0.02	0.02	0.02	0.04
CuO	0.15	-	-	-	0.05	0.02
$As_2O_3$	0.08	-	-	-	0.08	0.05
Cl	-	0.23	-	0.03	0.02	0.16
$Na_2O$	-	0.17	-	3.86	4.39	0.15
$WO_3$	-	0.05	-	0.22	0.13	-

mineral magnetit sebagai mineral pembentuk bijih dengan kehadiran ferum oksida yang sangat tinggi iaitu sebanyak 82.28 % manakala bijih hematit terdiri daripada mineral

kristabolit serta hematit dengan kehadiran ferum oksida yang tinggi (85.73 %). Magnetit boleh dibahagikan kepada dua jenis iaitu bijih kaya- fosforus sehingga 0.1% - 4 % dan kurang-fosforus iaitu < 0.1 % (Harlov *et al.*, 2002).

**Jadual 6:** Hasil keputusan analisis XRD menunjukkan kehadiran mineral bijih utama seperti pirit, hematit dan magnetit.

Bil.	Lokaliti	Sampel bijih	Mineral
1	CY1	Pirit	Pirit, kuarza, korundum
2	CY2	Magnetit	Magnetit, siderit, kuarza

**Jadual 7:** Komposisi elemen utama yang membentuk bijih pirit dan magnetit di tapak lombong Bukit Besi berdasarkan analisis XRF.

Formula	Pirit	Magnetit
Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	34.38	82.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.64	0.38
SiO <sub>2</sub>	0.96	5.7
SO <sub>3</sub>	62.59	9.7
K <sub>2</sub> O	0.02	0.03
CuO	0.08	0.08
CaO	0.01	0.19
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	-
MnO	-	0.39
WO <sub>3</sub>	0.05	-
ZnO	-	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-
MgO	-	0.9

**Prosedur ketoksikan ciri-ciri larut lesap (TCLP)**

Kaedah TCLP mengelaskan bahan buangan sebagai berbahaya apabila terdapat salah satu unsur dalam kumpulan logam berbahaya melebihi piawaian yang dibenarkan berdasarkan jumlah ketoksikan terlarut (Teresa & Alfredas, 2014). Jadual 8 merupakan hasil analisis TCLP bagi bahan batuan lombong Bukit Besi. Merujuk kepada jadual, hasil analisis ujian TCLP terhadap kesemua sampel lombong mendapati kepekatan bahan Arsenik (As) dan Barium (Ba) yang terdapat dalam semua bahan kajian adalah tidak berbahaya kepada sekitaran tapak lombong kerana jumlah kepekatan tidak melebihi had yang ditetapkan oleh EPA (1994) masing-masing dengan kepekatan kurang daripada 0.150 mg/L (As) dan kurang daripada 1 mg/L (Ba). Namun begitu, kepekatan logam unsur Cd, Cr, dan Pb yang hadir dalam sampel kajian adalah melebihi had piawaian CCC (EPA, 1994) yang ditetapkan iaitu masing-masing dengan kepekatan melebihi 0.005 mg/L (Cd), 0.007 mg/L (Cr) dan 0.003 mg/L (Pb). Kepekatan logam Se pula adalah dalam kategori berbahaya bagi batuan B1 (0.005 mg/L), B2 (0.014 mg/L) dan B3 (0.011 mg/L) kerana melebihi had piawaian CCC iaitu 0.005 mg/L.

**Ujian pengiraan asid-bes**

Nilai APP dan NP bagi 6 sampel batuan adalah seperti yang terdapat dalam Jadual 9. Hasil analisis pengiraan asid-bes di tapak kajian mendapati sampel batu B1 mempunyai potensi yang paling tinggi untuk mengeluarkan asid kepada persekitaran masing-masing mencatatkan nilai tertinggi iaitu 155 kg CaCO<sub>3</sub>/tan. Sampel batuan ini berpotensi menyebabkan saluran lombong berasid kerana mengandungi sulfur yang tinggi (>50%) yang merupakan elemen penting bagi pembentukan mineral pirit. Tindak balas pengoksidaan yang berlaku pada mineral pirit menyebabkan sampel ini lebih bersifat asid berbanding sampel lombong yang lain dan seterusnya akan mempengaruhi keasidan kolam takungan

**Jadual 8:** Perbandingan antara keputusan ujian prosedur ketoksikan ciri-ciri larut lesap (TCLP) bagi sampel lombong Bukit Besi, Dungun dibandingkan dengan piawaian CCC EPA, 1994.

Sampel/ Logam	B1 (mg/L)	B2 (mg/L)	B3 (mg/L)	B4 (mg/L)	B5 (mg/L)	B6 (mg/L)	Had EPA 1994 (mg/L)
As	0.006	0.010	0.010	0.008	0.007	0.001	0.150
Ba	0.030	0.101	0.110	0.146	0.067	0.106	1.000
Cd	<b>1.014</b>	<b>0.074</b>	<b>0.010</b>	<b>0.537</b>	<b>0.116</b>	<b>0.015</b>	0.005
Cr	<b>0.042</b>	<b>0.049</b>	<b>0.111</b>	<b>0.068</b>	<b>0.054</b>	<b>0.074</b>	0.007
Pb	<b>1.173</b>	<b>0.020</b>	<b>0.027</b>	<b>0.025</b>	<b>0.009</b>	<b>0.025</b>	0.003
Se	<b>0.005</b>	<b>0.014</b>	0.011	0.004	0.001	0.002	0.005

**Jadual 9:** Anggaran pembentukan asid lombong menggunakan kaedah pengiraan asid- bes bagi kesemua sampel lombong batuan.

Jenis Sampel	Nilai pH	Jumlah NP (kg CaCO <sub>3</sub> /tan)	Jumlah APP (kg CaCO <sub>3</sub> /tan)	Jumlah NNP (kg CaCO <sub>3</sub> /tan)	Jumlah NNR (kg CaCO <sub>3</sub> /tan)
B1	1.99	1.55	155.00	-153.45	0.01
B2	7.52	3.45	10.00	-6.55	0.34
B3	8.37	266.66	9.50	257.16	28.07
B4	6.34	3.66	12.50	-8.84	0.29
B5	7.17	50.88	33.00	17.88	1.54
B6	8.84	57.68	25.75	31.93	2.24

dan saliran berdekatan tapak lombong. Selain itu, hasil ujian ke atas sampel B5 dan B6 juga mendapati sampel batuan ini mempunyai potensi menjana asid kepada tapak lombong dengan nilai APP iaitu 33 kg CaCO<sub>3</sub>/tan (B5) dan 25.75 kg CaCO<sub>3</sub>/tan (B6). Manakala sampel B2, B3 dan B4 kurang berpotensi kepada pembentukan SLB masing-masing mencatatkan nilai APP terendah. Berdasarkan jumlah potensi peneutralan yang diperoleh daripada pengiraan ini, sampel batuan B3 mempunyai potensi yang paling tinggi dengan nilai NP 266.66 kg CaCO<sub>3</sub>/tan untuk meneutralkan saliran berasid di samping menjadi pengawal utama kepada pembentukan SLB di sekitar tapak lombong. Kandungan karbonat yang tinggi seperti mineral kalsit di dalam batuan B3 (67.39%) membolehkan batuan ini menjadi agen peneutralan semula jadi yang baik kepada persekitaran.

Selain itu, nilai pH sampel juga turut mempengaruhi pengelasan nilai pengeluaran dan peneutralan asid. Nilai APP bagi sampel B1, B2 dan B4 menunjukkan nilai APP tinggi melebihi nilai NP. Secara keseluruhannya, sampel lombong mempunyai nilai NNP berjulat di antara -153.45 hingga 257.16 kg CaCO<sub>3</sub>/tan dengan sampel B3 mencatatkan bacaan paling tinggi manakala sampel B1 mencatatkan bacaan paling rendah. Jumlah NNR adalah berkadar terus dengan jumlah NNP yang diperoleh di mana semakin tinggi jumlah NNR semakin tinggi jumlah NNP. Hasil kajian Brady & Hornberger (1990) telah membuktikan bahawa sampel batuan dengan nilai NP melebihi 30 kg CaCO<sub>3</sub>/tan merupakan sumber utama yang mempengaruhi faktor kealkalian kawasan tapak lombong bertepatan dengan hasil analisis NP bagi sampel B3, B5 dan B6 yang bersifat alkali dengan nilai pH masing-masing 8.37, 7.17 dan 8.84. Batuan dengan nilai NNP melebihi 20 kg CaCO<sub>3</sub>/tan seperti yang dicatatkan oleh B3 (257.16 kg CaCO<sub>3</sub>/tan) dan B6 (31.93 kg CaCO<sub>3</sub>/tan) akan menghasilkan saliran beralkali (Ferguson & Morin, 1991). Nisbah NP/APP dengan nilai kurang daripada 1 (< 1) akan menghasilkan saliran berasid dan jika nisbah ialah melebihi 3:1, kajian telah membuktikan bahawa risiko pembentukan SLB adalah rendah (Brodie *et al.*, 1991; Patterson & Ferguson, 1994). Nisbah NP/APP

dengan nilai 2 secara teorinya diperlukan supaya peneutralan asid berlaku dengan lengkap (Cravotta *et al.*, 1990).

## KESIMPULAN

Secara kesimpulannya, objektif utama kajian untuk mengetahui potensi pembentukan saliran lombong berasid di Bukit Besi telah diperoleh berdasarkan hasil kajian lapangan dan makmal. Kesemua kolam air takungan di tapak lombong menunjukkan kehadiran SLB yang tinggi yang berbeza dari segi nilai pH, kandungan sulfat dan kepekatan logam berat. Tapak lombong yang tidak lagi beroperasi dan ditinggalkan juga boleh menggalakkan pembentukan SLB dalam jangka masa tertentu. Air kolam yang jernih tetapi mempunyai nilai pH yang begitu rendah (fasa berasid) adalah disebabkan oleh kehadiran tumbuh-tumbuhan dan alga di dalam air dan sekeliling kolam yang membantu menapis serta menyerap kehadiran logam-logam berat. Komposisi mineralogi dan jenis deposit bijih yang dilombong turut mempengaruhi peratus pembentukan SLB. Batuan berasid yang terdiri daripada mineral sulfida yang tinggi seperti pirit lebih menggalakkan pembentukan saliran berasid berbanding batuan karbonat yang bertindak sebagai bahan peneutral semula jadi yang bertindak mengurangkan peratus keasidan di sekitar tapak.

## PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi penghargaan kepada semua pihak yang terlibat sepanjang kajian dilakukan terutamanya Kementerian Pengajian Tinggi dan Fakulti Sains dan Teknologi untuk bantuan kewangan. Kami juga menghargai sumbangan pihak CRIM UKM dalam menganalisis sampel kajian dan para pewasit diatas cadangan penambahbaikan.

## SUMBANGAN PENGARANG

NHM menentukan konsep dan rekabentuk, membuat interpretasi dan penulisan, manakala WZWY menyelia serta menyediakan kemudahan sampingan bagi tujuan penyelidikan.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Para pengarang tidak mempunyai konflik kepentingan yang berkaitan dengan kandungan artikel ini untuk diisytiharkan.

## RUJUKAN / REFERENCES

- Azman, A.G., 2004. Chemical characteristics of some of the granitic bodies from Terengganu area, Peninsular Malaysia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 49, 31-35.
- Bignell, J.D., & Snelling, N.J., 1977. Geochronology of Malayan Granite. *Overseas Geol. And Min. Resources* 47. H.M Stationary Office, London. 72 p.
- Brady, K.B.C., & Hornberger, R.H., 1990. The prediction of mine drainage quality in Pennsylvania. *Water Pollution Control Association Pa. Magazine*, 23(5), 8-15.
- Brodie, M.J., Broughton, L.M., & Robertson, A., 1991. A conceptual rock classification system for waste management and a laboratory method for ARD prediction from rock piles. *Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage. Conference Proceedings, Volumes 1 – 4.*
- Chapman, H.D., 1965. Cation-exchange capacity. In: C.A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties*. *Agronomy*, 9, 891-901.
- Charles, A., & Cravotta, II., 2006. Relations among pH, sulphate, and metals concentrations in anthracite and bituminous coal mine-discharges. *The 7<sup>th</sup> International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD)*, 378-404.
- Cravotta, C.A.I., Brady, K.B.C., Smith, M.W., & Beam, R.L., 1990. Effectiveness of alkaline addition at surface mines in preventing or abating acid mine drainage: part 1, geochemical considerations. *Proceedings of the 1990 Mining and Reclamation Conference and Exhibition, Charleston, West Virginia, West Virginia University*, 221-226.
- Ferguson, K.D., & Morin K.A., 1991. The prediction of acid rock drainage - Lessons from the database. In *Second International Conference on the Abatement of Acidic Drainage. Conference Proceedings Montreal, Canada*, 1 – 4, 16-18.
- Gakuto, T., 2015. Sample preparation for X-Ray Fluorescence analysis. *Journal of Rigaku*, 31(1), 26-30.
- Gurdeep Singh, 1987. Mine water quality deterioration due to acid mine drainage. *International Journal of Mine Water*, 6(1), 49-61.
- Hosking, K.F.G., 1977. Known relationships between the hard-rock tin deposits and the granites of Southeast Asia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 9, 141-157.
- Hutchison, C.S., 1984. Mineral concentration and hydrocarbon accumulations in the ESCAP region. *Geology of Tin Deposits in Asia and the Pacific*, 3, 594-605.
- Ibrahim, A., 2004. On the presence of pre-Carboniferous metasediments in the Eastern Belt: A structural view. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 49, 79-84.
- Jackson, K.J., & Helgeson, H.C., 1985. Chemical and thermodynamic constraints on the hydrothermal transport and deposition of Tin: II. Interpretation of phase relations in the southeast Asian Tin belt. *Economy Geology*, 80, 1365-1378.
- Jenkins, D.A., Johnson, D.B., & Freeman, C., 2000. Mynydd Parys Cu-Pb-Zn mines: Mineralogy, microbiology and acid mine drainage. In: Cotter-Howells, J.D., Campbell, L.S., Valsami-Jones, E., & Batchelder, M. (Eds.), *Environmental mineralogy: Microbial interactions, anthropogenic influences, contaminated land and waste management. The Mineralogy Society Series*, 9, 161-180.
- Lapacko, K., 1993. Mine waste drainage quality prediction: A literature review. *Draft Paper. Minnesota Department of Natural Resources, Division of Minerals, St. Paul, MN.*
- Liew, D., & Sheppard, J., 2001. Use of conductivity to monitor the treatment of acid mine drainage and sulphate-reducing bacteria. *Water Resource*, 35(8), 2081-2086.
- Malin, B., Mona, A., & Paivi, K., 2015. Characterization of the bacterial and sulphate reducing community in the alkaline and constantly cold water of the closed Kotalahti mine. *Minerals*, 5, 452-472.
- Nordstrom, D.K., Alpers, C.N., Ptacek, C.J., & Blowes, D.W., 2000. Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California. *Environmental Science & Technology*, 34, 254-258.
- Patterson, R.J., & Ferguson, K.D., 1994. The Gibraltar North project assessing acid rock drainage. *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage. U.S. Bureau of Mines Special Publication SP 06B-94*, 12-21.
- Singh, D.S., 1985. *Geological map of West Malaysia. 8<sup>th</sup> Edition. Geological Survey of Malaysia.*
- Smith, R.M., Grube, W.E., Arkle, T.A., & Sobek, A.A., 1974. Mine spoil potentials for soil and water quality. *U.S. Environmental Protection Agency, EPA-670/2-74-070.*
- Sobek, A.A., Schuller, W.A., Freeman, J.R., & Smith, R.M., 1978. Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. *US Environmental Protection Agency, EPA-600/2-78-054.*
- Snelling, N.J., Bignell, J.D., & Harding, R.R., 1968. Age of Malayan granites. *Geol. En. Mijnbouw*, 47, 358-359.
- Teresa, R., & Alfredas, L., 2014. Assessment of general toxicity of the selected industrial wastes on the basis of the analysis of the total metals concentration. *9<sup>th</sup> International Conference on Environmental Engineering, May 22-23, 2014, Vilnius, Lithuania.*
- U.S. EPA, 1992. *Guidelines for exposure assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum, Washington, DC, EPA/600/Z-92/001.*
- Voica, C., Kovacs, M.H., Dehelean, A., Ristoiu, D., & Iordache, A., 2011. ICP-MS determinations of heavy metals in surface waters from Transylvania. *Journal of Environmental Physical* 57(7-8), 1184-1193.
- Yeap, E.B., 2000. The prospects for hardrock gold and tin deposits in Malaysia. *Proceeding of the Geological Society of Malaysia Annual Geological Conference, Sept. 8-9, Pulau Pinang, Malaysia.*

*Manuscript received 18 August 2020;  
Received in revised form 6 February 2021;  
Accepted 8 March 2021  
Available online 30 November 2022*