

**ENVIRONMETRIK KUALITI AIR DI BEKAS
LOMBONG TEMBAGA MAMUT DAN
SUNGAI MAMUT, RANAU SABAH**

ROHANA BINTI TAIR



PERPUSTAKAAN
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

**TESIS INI DIKEMUKAKAN UNTUK
MEMENUHI SYARAT MEMPEROLEH
IJAZAH DOKTOR FALSAFAH**

**FAKULTI SAINS DAN SUMBER ALAM
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH
2024**

UNIVERSITI MALAYSIA SABAH
BORANG PENGESAHAN STATUS TESIS

JUDUL : **ENVIRONMETRIK KUALITI AIR DI BEKAS LOMBONG
TEMBAGA MAMUT DAN SUNGAI MAMUT, RANAU SABAH**

IJAZAH : **DOKTOR FALSAFAH SAINS SEKITARAN**

BIDANG : **SAINS SEKITARAN**

Saya **ROHANA BINTI TAIR**, Sesi **2016-2024**, mengaku membenarkan tesis Doktor Falsafah ini disimpan di Perpustakaan Universiti Malaysia Sabah dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut:-

1. Tesis ini adalah hak milik Universiti Malaysia Sabah
2. Perpustakaan Universiti Malaysia Sabah dibenarkan membuat salinan untuk tujuan pengajian sahaja.
3. Perpustakaan dibenarkan membuat salinan tesis ini sebagai bahan pertukaran antara institusi pengajian tinggi.
4. Sila tandakan (/):

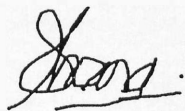
SULIT

(Mengandungi maklumat yang berdarjah keselamatan atau kepentingan Malaysia seperti yang termaktub di dalam AKTA RAHSIA 1972)

TERHAD

(Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh organisasi/badan di mana penyelidikan dijalankan)

TIDAK TERHAD

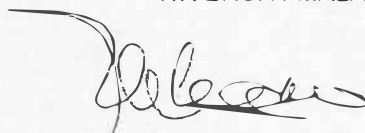


ROHANA BINTI TAIR
DS1621020T



ALBERTO ANING
(Tandatangan Pustakawan)
PUSTAKAWAN KANAN

UNIVERSITI MALAYSIA SABAH



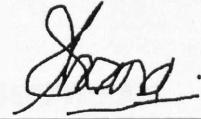
(Prof. Datuk. Dr. Mohd Harun Abdullah)
Penyelia Utama

Tarikh : 18 Januari 2024

PENGAKUAN

Saya mengaku bahawa Tesis Doktor Falsafah ini merupakan hasil usaha dan kerja saya sendiri, melainkan petikan dan ringkasan yang setiap satunya saya telah jelaskan sumbernya.

28 November 2023



ROHANA BINTI TAIR
DS1621020T



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

PENGESAHAN

NAMA : ROHANA BINTI TAIR
NO MATRIK : DS1621020T
TAJUK : ENVIRONMETRIK KUALITI AIR DI BEKAS
LOMBONG TEMBAGA MAMUT DAN SUNGAI
MAMUT, RANAU SABAH
IJAZAH : DOKTOR FALSAFAH SAINS SEKITARAN
BIDANG : SAINS SEKITARAN
TARIKH VIVA : 28 NOVEMBER 2023

DISAHKAN OLEH;

1. PENYELIA UTAMA

Prof. Datuk Dr. Mohd Harun Abdullah

Tandatangan

2. PENYELIA BERSAMA

Prof. Dr. Baba Musta

3. PENYELIA BERSAMA

Prof. Dr. Hafizan Juahir

PENGHARGAAN

Segala puji-pujian bagi Allah s.w.t kerana dengan izinNya memberikan saya kesihatan, masa, idea dan kematangan fikiran untuk menyempurnakan tesis ini.

Pertama sekali saya mengucapkan jutaan terima kasih kepada penyelia saya iaitu Prof Datuk Dr Mohd Harun Abdullah, Prof Dr Baba Musta dan Prof Dr Hafizan Juahir (UniSza) yang telah membimbing, mendidik dan membentuk diri saya sehingga berjaya menyiapkan pengajian PhD ini. Selain itu, setinggi penghargaan juga diberikan kepada Universiti Malaysia Sabah dan Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia yang memberi tajaan biasiswa SLAB serta kepada Pejabat Daerah Ranau yang telah memberi keizinan untuk saya memasuki bekas lombong tembaga Mamut untuk persampelan data. Penghargaan ini turut diberikan kepada Dekan Fakulti Sains dan Sumber Alam (FSSA) Prof. Dr Jualang @ Azlan Gansau, Timbalan Dekan Akademik FSSA Prof Madya Dr. Darmesah Gabda, Pengarah SIRC Dr Farrah Anis F. Adnan, Unit Penyelidikan Air UMS (WRU), Makmal Mikologi dan Patologi Tumbuhan FSSA (Makmal Kualiti Air) dan Geran Pasca UMSGreat GUG0420-2/2019.

Penghargaan juga kepada seluruh ahli keluarga tersayang terutamanya Pn. Rabinah Buntoi (ibu), En. Tair Hj Mohd Norddin (baba), Pn. Rupiah Buhu (ibu mertua), En. Ag. Adi Hj Abd Rajak (suami), anak-anak Arfan Hakim Qushairi, Dayang Nur Juma Arissa, Dayang Adawiyah Huda, adik beradik dan sahabat handai yang telah banyak memberi sokongan moral yang padu untuk menghabiskan pengajian ini.

Penghargaan ini juga khas buat individu-individu yang sentiasa memberikan saya khidmat nasihat, bimbingan, tunjuk ajar serta sokongan ikhlas iaitu Prof Dr Sahibin Abd Rahim, Prof Dr Kawi Bidin, En. Sharizal Milin, En. Mohd Recyheidy Abd Rashid, Pn. Rozita (PDR), Cik Noraini Jaminin, pensyarah-pensyarah Program Sains Sekitaran dan FSSA, pembantu-pembantu Makmal FSSA, semua kakitangan FSSA, serta sahabat-sahabat yang sentiasa mendoakan kejayaan saya. Kepada semua yang terbabit, jutaan terima kasih diucapkan dan semoga segala pertolongan yang dihulurkan mendapat ganjaran daripada Allah s.w.t.

Rohana Binti Tair
28 November 2023

ABSTRAK

Masalah alam sekitar di kawasan bekas lombong adalah satu isu yang perlu diberi perhatian serius terutamanya takungan air berasid di bekas lombong tembaga Mamut (BLMCM) yang terbiar sejak tahun 1999 dan sehingga kini masih mencari penyelesaian. Aliran air berasid yang bertakung berhubung secara langsung dengan Sg.Mamut di kawasan hulu dan mengalir ke kawasan hilir yang merupakan kawasan perkampungan dan terdapat aktiviti pertanian. Keperluan kos pemulihan yang tinggi menyebabkan pemantauan terhadap air berasid di BLMCM merupakan satu pilihan yang ada sebelum langkah penyelesaian yang tepat diperolehi. Maka, kajian ini dilakukan bagi menyumbang kepada data untuk mengetahui situasi terkini keadaan air berasid di BLMCM dan Sg.Mamut serta Sg.Mokodou sebagai kawalan. Sebanyak tujuh lokasi terpilih (M1, MB, T2, SG3, P4, N5 dan PC6) dan persampelan sebanyak enam kali (Ogos19, Dis19, Feb20, Jun20, Julai20 dan Ogos20) dilakukan bagi 34 jenis parameter; kualiti air (TS, TDS, TSS, COD, BOD, DO, pH, EC, kekeruhan, fosfat, sulfat, suhu, Cl⁻, S^{%o}); logam berat (Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb & Zn), ketinggian altitud dan tekanan atmosfera dalam air. Pendekatan envirometrik dengan menggunakan analisis kluster (CA), analisis diskriminasi (DA) dan analisis komponen utama (PCA) digunakan untuk analisis data. Analisis CA menunjukkan status kualiti air variasi ruang terbahagi kepada empat kluster lokasi iaitu kawasan pencemaran tinggi (PT-M1 & MB), percampuran (PP- T2 & SG3), mata air panas Poring (PHS- P4) dan pembauran (PC – N5 & PC6). Manakala status variasi masa terbahagi kepada empat kluster iaitu fasa garis asas (F1- Ogos19), fasa sederhana (F2- Dis19 & Ogos20), fasa tinggi (F3- Feb20) dan fasa rendah (F4- Jun20 & Julai20). Analisis DA mengesahkan semua kluster berada di antara 64.29% sehingga 100% pengesahan. Status variasi ruang didapati membentuk tujuh kumpulan corak kepekatan parameter kualiti air iaitu 1) pH, Cr, Cd, BOD (PC>PP>PHS>PT), 2) EC, kemasinan, SO₄, Cl, TDS, TS, Na, Ca, K, Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Mn, Li (PT>PHS>PC>PP), 3) suhu (PC>PT>PHS>PP), 4) TSS, kekeruhan, DO (PHS>PC>PP>PT), 5) COD, Ag (PP>PC>PHS>PT), 6) PO₄ (PC>PHS>PT>PP) dan 7) Ba, As (PT>PC>PHS>PP). Manakala status variasi masa menunjukkan empat corak naik dan turun kepekatan parameter kualiti air didapati mengikut musim iaitu F1 adalah penghujung musim kering, F2 adalah permulaan musim hujan, F3 adalah penghujung musim hujan dan F4 adalah menghampiri musim kering. Corak perubahan kualiti air mengikut variasi masa berkemungkinan sentiasa berulang mengikut musim. Seterusnya, analisis PCA menunjukkan terdapat enam komponen yang didapati mempengaruhi kualiti air di BLMCM dan Sg.Mamut iaitu 1) faktor antropogenik dan garam mineral (pH, TSS, COD, BOD, DO, TDS, TS, SO₄, Cl, EC, kemasinan, Al, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Zn), 2) faktor abiotik (ketinggian altitud, suhu tekanan atmosfera), 3) faktor fizikal (kekeruhan, PO₄, As, Pb), 4) pemalar Ba, 5) pemalar Cd, Cr dan 6) pemalar Ag. Manakala, di Sg.Mokodou analisis PCA menunjukkan enam komponen dan SO₄ adalah komponen terakhir iaitu faktor paling lemah. Perbandingan faktor SO₄ di kawasan tidak tercemar (kawalan) dan tercemar (bekas lombong) menjadikan ia adalah indikator yang sesuai bagi kawasan BLMCM dan Sg.Mamut. Secara keseluruhannya, kawasan BLMCM dan Sg.Mamut mempunyai senario corak perubahan kualiti air mengikut variasi ruang dan masa yang masing-masing dipengaruhi oleh faktor geologi, hidrologi dan fizikal persekitaran sekelilingnya.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL IN WATER QUALITY AT EX-MAMUT COPPER MINING AND MAMUT RIVER, RANAU SABAH

The environmental problem related to the ex-mining area is an issue that needs to be given serious attention, especially the acidic water reservoir in the ex-Mamut copper mine (BLMCM) which has been abandoned since 1999 and is still looking for a solution. The stagnant acidic water is directly flow connected to Mamut river at the upstream area and flows to the downstream which is the village area and there are agricultural activities. The high remedial costs for mining recovery may cause the monitoring is an option to monitor the acidic water at BLMCM before appropriate remedial measures are obtained. So, this study was done to contribute to the data to find out the current situation of acidic water in BLMCM, Mamut river and Mokodou river as a control. A total of seven selected locations (M1, MB, T2, SG3, P4, N5 and PC6) and six sampling times (August19, Dec19, Feb20, June20, July20 and August20) were done for 34 types of parameters; water quality (TS, TDS, TSS, COD, BOD, DO, pH, EC, turbidity, phosphate, sulfate, temperature, Cl⁻, S²⁻); heavy metals (Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb & Zn), altitude and atmospheric pressure in water. An envirometric approach using cluster analysis (CA), discriminant analysis (DA) and principal component analysis (PCA) was done for data analysis. CA analysis shows the status of water quality spatially for four clusters which are high pollution areas (PT-M1 & MB), mixing (PP- T2 & SG3), Poring Hot Spring (PHS- P4) and diffusion (PC – N5 & PC6) . While the status of temporal variation is as many as four clusters, namely the baseline phase (F1- August 19), medium phase (F2- Dec 19 & August 20), high phase (F3- Feb 20) and low phase (F4- June 20 & July 20). DA analysis confirmed all clusters were between 64.29% up to 100% confirmation. The spatial variation status was found to form seven groups of water quality parameter, which were 1) pH, Cr, Cd, BOD (PC>PP>PHS>PT), 2) EC, salinity, SO₄, Cl, TDS, TS, Na, Ca, K, Mg, Al, Fe, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Mn, Li (PT>PHS>PC>PP), 3) temperature (PC>PT>PHS>PP), 4) TSS, turbidity, DO (PHS>PC>PP>PT), 5) COD, Ag (PP>PC>PHS>PT), 6) PO₄ (PC>PHS>PT>PP) and 7) Ba, As (PT>PC>PHS >PP). The temporal variation status shows four patterns of up and down the water quality concentration according to the season, which were F1 is the end of the dry season, F2 is the beginning of the rainy season, F3 is the end of the rainy season and F4 is approaching the dry season. Temporal-varying patterns of water quality changes are likely to repeat seasonally. Next, PCA analysis shows that there are six components that affect water quality in BLMCM and Mamut river, which were 1) anthropogenic factors and salts mineral (pH, TSS, COD, BOD, DO, TDS, TS, SO₄, Cl, EC, salinity, Al, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Zn), 2) abiotic factors (altitude, temperature, atmospheric pressure), 3) physical factors (turbidity, PO₄, As, Pb), 4) Ba constant, 5) Cd, Cr constant and 6) Ag constant. Meanwhile, for Mokodou river, the PCA analysis shows six components and SO₄ is the last component which shows the weakest factor. The comparison of the SO₄ factor between the unpolluted (control) and polluted areas (ex-mining) were select it as a suitable indicator for the areas of BLMCM and Mamut river. Overall, the BLMCM and Mamut river have scenarios of water quality patterns according to spatial and temporal variation which are influenced by geological, hydrological and environmental factors, respectively.

SENARAI KANDUNGAN

	Halaman
TAJUK	i
PENGAKUAN	ii
PENGESAHAN	iii
PENGHARGAAN	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
SENARAI KANDUNGAN	vii
SENARAI JADUAL	xi
SENARAI RAJAH	xiii
SENARAI TATANAMA	xvi
SENARAI SIMBOL DAN UNIT	xvii
SENARAI SINGKATAN	xviii
SENARAI LAMPIRAN	xix
BAB 1 : PENGENALAN	
1.1 Pengenalan	1
1.2 Permasalahan Kajian	4
1.3 Objektif Kajian	6
1.4 Kepentingan Kajian	7
1.5 Skop Kajian	9
1.6 Keterbatasan Kajian	10
BAB 2 : SOROTAN LITERATUR	
2.1 Pengenalan	11
2.2 Bekas Lombong	11
2.3 Saliran Lombong Berasid (AMD)	13
2.4 Pencemaran Air Berasid	15
2.4.1 Mineral Sulfida	16
2.4.2 Luluhawa Batuan dan Interaksi Batuan-Air	17
2.4.3 Aktiviti Perlombongan	23
2.4.4 Potensi Redox	25
2.5 Kualiti Air	26
2.6 Status Kualiti Air	27
2.7 Status Ruang dan Masa	30
2.8 Indikator Kualiti Air	32
2.9 Bekas Lombong Tembaga Mamut (BLMCM)	35

2.9.1	Persekitaran BLMCM di Utara Kepulauan Borneo	35
2.9.2	Bekas Lombong Tembaga Mamut (BLMCM) dan Sg.Mamut	37
2.9.3	Kajian lepas di BLMCM-Sg.Mamut	37
2.10	Analisis Multivariate dan Teknik Environmetrik	46
2.10.1	Analisis Kluster (CA)	49
2.10.2	Analisis Diskriminasi (DA)	50
2.10.3	Analisis Komponen Utama (PCA)	50
2.10.4	Aplikasi Teknik Environmetrik Bagi Data Alam Sekitar	51

BAB 3 : METODOLOGI KAJIAN

3.1	Pengenalan	54
3.2	Kajian Tinjauan	54
3.2.1	Kenalpasti stesen kajian	55
3.2.2	Parameter kajian	55
3.3	Reka bentuk kajian	56
3.4	Lokasi Kajian	59
3.5	Bahan dan Reagen	63
3.6	Kawalan Kualiti	64
3.6.1	Standard Kualiti	64
3.6.2	Kalibrasi	66
3.6.3	Replikasi	66
3.6.4	Pengosong (Blank)	66
3.6.5	Penyediaan Alat Radas	66
3.7	Persampelan	67
3.7.1	Persampelan Air	67
3.7.2	Persampelan Sedimen	67
3.8	In situ Parameter (Nilai pH, Suhu, DO, EC, Kekeruhan)	68
3.9	Bahan Pepejal (TS, TSS dan TDS)	68
3.10	Klorida (Cl ⁻)	69
3.11	Permintaan Oksigen Kimia (COD)	70
3.12	Sulfat (SO ₄)	70
3.13	Fosfat (PO ₄)	70
3.14	Permintaan Oksigen Biologi (BOD)	71
3.15	Logam Berat	72
3.15.1	Air	72
3.15.2	Sedimen	73
3.16	Nilai pH dan % bahan organik dalam Sedimen	73
3.17	Luahan Sungai (Q)	74
3.18	Aplikasi Analisis Multivariate Dalam Kajian Ini	74

BAB 4 : DAPATAN KAJIAN		
4.1	Parameter Kualiti Air dan sedimen BLMCM-Sg. Mamut dan Sg. Mokodou	76
4.2	Parameter Fisikokimia	78
4.3	Parameter Pepejal Terlarut	83
4.4	Parameter Oksigen	85
4.5	Parameter Logam Berat	87
BAB 5 : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN KLUSTER RUANG		
5.1	Pengenalan	99
5.2	Keputusan Analisis Kluster Ruang	99
5.3	Analisis Diskriminasi (DA)- Ruang	101
5.4	Status Kualiti Air Kluster Ruang	101
	5.4.1 Pencemaran Tinggi (PT)	103
	5.4.2 Percampuran (PP)	108
	5.4.3 Mata air panas Poring (PHS)	113
	5.4.4 Pembauran (PC)	117
5.5	Hubungan Regresi nilai pH dengan parameter kualiti air	121
BAB 6 : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN KLUSTER MASA		
6.1	Pengenalan	123
6.2	Keputusan Analisis Kluster Masa	123
	6.2.1 BLMCM-Sg.Mamut	123
	6.2.2 Sg.Mokodou	125
6.3	Luahan Sungai BLMCM-Sg.Mamut	126
6.4	Analisis Korelasi Pengaruh Luahan Sungai	131
6.5	Hubungan Regresi Luahan Sungai (Q) dengan parameter kualiti air	133
6.6	Status Kualiti Air Pada Kluster Temporal	140
	6.6.1 Fasa Garis Asas (F1)	140
	6.6.2 Fasa Sederhana (F2)	144
	6.6.3 Fasa Tinggi (F3)	146
	6.6.4 Fasa Rendah (F4)	149
BAB 7 : KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN (PENGARUH DAN INDIKATOR PENCEMARAN)		
7.1	Pengenalan	151
7.2	Keputusan Analisis PCA	151
	7.2.1 Analisis PCA di Sg.Mokodou	151
	7.2.2 Analisis PCA di BLMCM-Sg.Mamut	153
7.3	Sumber-sumber dan pengaruh pencemaran di BLMCM-Sg.Mamut	154
	7.3.1 PCA Komponen 1- Faktor Antropogenik dan Garam Mineral	155

7.3.2	PCA Komponen 2- Faktor Abiotik	157
7.3.3	PCA Komponen 3- Faktor Fizikal	158
7.3.4	PCA Komponen 4- Pemalar Ba	159
7.3.5	PCA Komponen 5 dan 6- Pemalar Cd, Cr dan Ag	160
7.4	Indikator Kualiti Air di kawasan BLMCM dan Sg.Mamut	161

BAB 8 : KESIMPULAN DAN CADANGAN

8.1	Kesimpulan	164
8.2	Cadangan Kajian Seterusnya	166

RUJUKAN	167
----------------	-----

LAMPIRAN	182
-----------------	-----



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

SENARAI JADUAL

		Halaman
Jadual 2.1 :	Komposisi mineral dan sumber batumannya	20
Jadual 2.2 :	Sumber elemen bijih daripada kumpulan mineral	21
Jadual 2.3 :	Kumpulan unsur	21
Jadual 2.4 :	Interaksi mineral dan reaksi kimianya di dalam air dan batuan	22
Jadual 2.5 :	Mobiliti relative bagi elemen di persekitaran mengikut keadaan redox	26
Jadual 2.6 :	Pentafsiran petunjuk kualiti air mengikut parameter hasil daripada analisis PCA.	33
Jadual 2.7 :	Lokasi pilihan pada kajian yang lepas dan sumber mineral di kawasan BLMCM dan Sg.Mamut	36
Jadual 2.8 :	Beban logam sebelum dan selepas TSP	39
Jadual 2.9 :	Kepekatan in situ parameter dalam air di kawasan BLMCM dan TSP	41
Jadual 2.10 :	Kepekatan logam berat dalam air di kawasan BLMCM dan TSP (Fe, Al, Cu, Zn, Mn, Ca, Mg, Na, K, Ni, Co, Cr)	41
Jadual 2.11 :	Kepekatan logam berat dalam air di kawasan BLMCM dan TSP (Cd, Ba, Pb, As, Ag dan Li)	42
Jadual 2.12 :	Kepekatan parameter dalam sedimen di kawasan BLMCM dan TSP (pH, OM, Ca, Mg, Na, K, Fe, Zn, Cu, Co, Mn, Ni)	42
Jadual 2.13 :	Kepekatan parameter dalam sedimen di kawasan BLMCM dan TSP (Pb, As, Cd, Cr, Ba, Al, Ag, Li)	43
Jadual 2.14 :	Senarai objektif dan limitasi kajian-kajian lepas di BLMCM dan Sg.Mamut	44
Jadual 3.1 :	Prosedur penyimpanan dan penjagaan sampel air mengikut parameter	55
Jadual 3.2 :	Persampelan tinjauan dan 6 siri persampelan	57
Jadual 3.3 :	Koordinat lokasi kajian	59
Jadual 3.4 :	Senarai bahan dan reagen	63
Jadual 3.5 :	SRM1640a untuk kawalan kualiti bagi sampel air	65
Jadual 3.6 :	Keputusan SRM2711A untuk kawalan kualiti bagi sampel sedimen	65
Jadual 4.1 :	Keseluruhan kualiti air di BLMCM, Sg.Mamut dan Sg.Mokodou, Ranau Sabah.	76
Jadual 4.2 :	Data keseluruhan sedimen di BLMCM, Sg.Mamut dan Sg.Mokodou, Ranau Sabah.	77
Jadual 5.1 :	Jadual pengesahan hasil analisis diskriminasi bagi kluster ruang	101
Jadual 5.2 :	Parameter kualiti air dan sedimen di kawasan	106

	pencemaran tinggi (PT)	
Jadual 5.3 :	Korelasi di kawasan PT	107
Jadual 5.4 :	Parameter kualiti air dan sedimen di kawasan percampuran (PP)	111
Jadual 5.5 :	Korelasi di kawasan PP	112
Jadual 5.6 :	Parameter kualiti air dan sedimen di kawasan Mata Air Panas Poring (PHS)	115
Jadual 5.7 :	Korelasi di kawasan PHS	116
Jadual 5.8 :	Parameter kualiti air dan sedimen di kawasan pembauran (PC)	119
Jadual 5.9 :	Korelasi di kawasan PHS	120
Jadual 5.10 :	Persamaan regresi nilai pH dengan parameter kualiti air	122
Jadual 6.1 :	Pengesahan hasil analisis diskriminasi bagi kluster masa	125
Jadual 6.2 :	Jadual pengesahan hasil analisis diskriminasi bagi Sg.Mokodou	126
Jadual 6.3 :	Kepekatan maksimum (mak) dan minimum (min) bagi parameter kualiti air variasi ruang dan masa di kawasan BLMCM dan Sg.Mamut.	130
Jadual 6.4 :	Korelasi Q terhadap parameter kualiti air di BLMCM-Sg.Mamut	132
Jadual 6.5 :	Persamaan luahan sungai (Q) terhadap parameter kualiti air	133
Jadual 6.6 :	Korelasi F1	136
Jadual 6.7 :	Korelasi F2	137
Jadual 6.8 :	Korelasi F3	138
Jadual 6.9 :	Korelasi F4	139
Jadual 6.10 :	Purata kualiti air di fasa garis asas (F1) pada setiap kluster ruang (purata \pm SD)	140
Jadual 6.11 :	Purata kualiti air di fasa sederhana (F2) pada setiap kluster ruang (purata \pm SD)	145
Jadual 6.12 :	Purata kualiti air di fasa tinggi (F3) pada setiap kluster ruang (purata \pm SD)	148
Jadual 6.13 :	Purata kualiti air di fasa rendah (F4) pada setiap kluster ruang (purata \pm SD)	150
Jadual 7.1 :	Jadual analisis komponen utama (PCA) bagi Sg.Mokodou	152
Jadual 7.2 :	Jadual analisis komponen utama (PCA) keseluruhan bagi BLMCM-Sg.Mamut	154

SENARAI RAJAH

	Halaman
Rajah 2.1 :	Kitaran hidrologik dan geologik 18
Rajah 2.2 :	Interaksi kualiti air dengan persekitaran 24
Rajah 3.1 :	Kerangka reka bentuk kajian 58
Rajah 3.2 :	Peta lokasi kajian 60
Rajah 3.3 :	Stesen kajian di BLMCM (a) stesen M1, (b) stesen MB dan Sg.Mamut (c) stesen T2, (d) stesen SG3, (e) stesen P4, (f) stesen N5 dan (g) stesen PC6 61
Rajah 3.4 :	Stesen kajian di Sg.Mokodou 62
Rajah 3.5 :	YSI Multimeter PRODSS 68
Rajah 3.6 :	Analisis environmetrik 75
Rajah 4.1 :	Graf nilai pH dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 80
Rajah 4.2 :	Graf suhu dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 81
Rajah 4.3 :	Graf konduktiviti dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 81
Rajah 4.4 :	Graf kemasinan dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 81
Rajah 4.5 :	Graf kekeruhan dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 82
Rajah 4.6 :	Graf sulfat dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 82
Rajah 4.7 :	Graf konduktiviti dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 82
Rajah 4.8 :	Graf konduktiviti dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 83
Rajah 4.9 :	Graf TDS dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 84
Rajah 4.10 :	Graf TSS dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 84
Rajah 4.11 :	Graf TS dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 85
Rajah 4.12 :	Graf DO dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 86
Rajah 4.13 :	Graf COD dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 86
Rajah 4.14 :	Graf BOD dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 86
Rajah 4.15 :	Graf Ag dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut mengikut lokasi dan masa persampelan 88
Rajah 4.16 :	Graf Al dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut 88

Rajah 4.17 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf As dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	88
Rajah 4.18 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Ba dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	90
Rajah 4.19 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Ca dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	90
Rajah 4.20 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Cd dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	90
Rajah 4.21 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Co dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	91
Rajah 4.22 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Cr dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	91
Rajah 4.23 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Cu dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	91
Rajah 4.24 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Fe dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	93
Rajah 4.25 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf K dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	93
Rajah 4.26 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Li dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	93
Rajah 4.27 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Mg dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	95
Rajah 4.28 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Mn dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	95
Rajah 4.29 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Na dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	96
Rajah 4.30 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Ni dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	96
Rajah 4.31 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Pb dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	96
Rajah 4.32 :	mengikut lokasi dan masa persampelan Graf Zn dalam sampel air di BLMCM dan Sg. Mamut	97
Rajah 5.1 :	Dendrogram bagi kluster Ruang	99
Rajah 5.2 :	Lokasi kajian mengikut aras ketinggian (m) dan pembahagian 4 kluster	100
Rajah 5.3 :	Corak kepekatan parameter kualiti air mengikut kluster ruang (PT= Pencemaran Tinggi, PP= Percampuran, PHS= Mata Air Panas Poring, PC= Pembauran dan skala 1-4= kepekatan tinggi ke rendah)	102
Rajah 6.1 :	Dendrogram BLMCM-Sg.Mamut mengikut kluster masa	124

Rajah 6.2 :	Dendrogram Sg.Mokodou (MK12) mengikut kluster masa	126
Rajah 6.3 :	Rajah luahan sungai (Q) di stesen SG3 dan PC6 di BLMCM-Sg.Mamut	127
Rajah 6.4 :	Rajah fasa persampelan fasa garis asas, fasa sederhana, fasa tinggi dan fasa rendah di BLMCM-Sg.Mamut	127
Rajah 6.5 :	Rajah gabungan luahan sungai (Q) dan fasa persampelan di BLMCM-Sg.Mamut	129
Rajah 7.1 :	Ketinggian dan tekanan atmosfera bagi lokasi kajian di BLMCM-Sg.Mamut dan Sg.Mokodou (MK12)	157
Rajah 7.2 :	Taburan suhu di BLMCM dan Sg.Mamut serta Sg.Mokodou (MK12)	157
Rajah 7.3 :	Rajah faktor <i>loading</i> analisis PCA bagi parameter kualiti air mengikut kluster lokasi a) Pencemaran Tinggi (PT), b) Percampuran (PP), c) Mata air panas Poring (PHS) dan d) Pembauran (PC)	162
Rajah 7.4 :	Rajah faktor <i>loading</i> analisis PCA bagi parameter kualiti air mengikut kluster persampelan di BLMCM-Sg.Mamut a) Fasa garis asas, b) Fasa sederhana, c) Fasa tinggi dan d) Fasa rendah	163



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

SENARAI TATANAMA

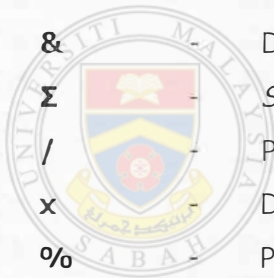
UMS	-	Universiti Malaysia Sabah
UniSza	-	Universiti Sultan Zainal Abidin
FSSA	-	Fakulti Sains dan Sumber Alam
KPT	-	Kementerian Pengajian Tinggi
PDR	-	Pejabat Daerah Ranau
WRU	-	Pusat Penyelidikan Air
HS11	-	Program Sains Sekitaran
ICP-OES	-	<i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission spectroscopy</i>
USEPA	-	<i>United State Environmental Protection Agency</i>
WHO	-	<i>World Health Organization</i>
NWQSM	-	Standard Kualiti Air Kebangsaan Malaysia
WQI	-	Index Kualiti Air



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

SENARAI SIMBOL DAN UNIT

mg/L	-	Miligram per Liter
NTU	-	<i>Nephelometric turbidity unit</i>
μS/cm	-	Mikrosiemens per sentimeter
cm	-	sentimeter
m	-	Meter
ppt	-	Bahagian per seribu
S‰	-	Peratus <i>salinity</i>
mmHg	-	Milimeter merkuri
°C	-	Darjah celcius
±	-	Tambah tolak
μ	-	Mikro
<	-	Lebih kecil daripada
>	-	Lebih besar daripada
&	-	Dan
Σ	-	<i>Sum of</i>
/	-	Per
x	-	Darab
%	-	Peratus
√	-	Punca kuasa
Mt	-	Metrik Tan
t	-	Tan
SD	-	Sisihan piawai
a.s.l	-	<i>Above sea level</i>



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

SENARAI SINGKATAN

BLMCM	-	Bekas Lombong Tembaga Mamut
TSS	-	Bahan Pepejal Terampai (<i>Total Suspended Solid</i>)
TS	-	Bahan Pepejal (<i>Total Solid</i>)
TDS	-	Bahan Pepejal Terlarut (<i>Total Dissolved Solid</i>)
pH	-	Nilai pH
Cl⁻	-	Korida
SO₄	-	Sulfat
PO₄	-	Fosfat
COD	-	Keperluan Oksigen Kimia (<i>Chemical Oxygen Demand</i>)
BOD	-	Keperluan Oksigen Biologi (<i>Biological Oxygen Demand</i>)
EC	-	Konduktiviti Elektrik (<i>Electrical conductivity</i>)
DO	-	Keperluan Oksigen (<i>Oxygen Demand</i>)
Sal	-	Kemasinan (<i>Salinity</i>)
Ag	-	Perak (<i>Argentum</i>)
Al	-	Aluminium
As	-	Arsenik
Ba	-	Barium
Ca	-	Kalsium
Cd	-	Kadmium
Co	-	Kobalt
Cr	-	Kromium
Cu	-	Kuprum/Tembaga
Fe	-	Ferum
K	-	Kalium
Li	-	Litium
Mg	-	Magnesium
Mn	-	Mangan
Na	-	Natrium
Ni	-	Nikel
Pb	-	Plumbum
Zn	-	Zink
Sg	-	Sungai
MK12	-	Sg.Mokodou

SENARAI LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A : Standard Kualiti Air Kebangsaan Malaysia (NWQSM)	181
Lampiran B : Jadual B1. Data keseluruhan kualiti air mengikut stesen persampelan di BLMCM, Sg.Mamut dan Sg.Mokodou (MK12)	182
Jadual B2. Data keseluruhan sedimen mengikut stesen persampelan di BLMCM, Sg.Mamut dan Sg.Mokodou (MK12)	
Jadual B3. Data keseluruhan kualiti air mengikut siri persampelan di Sg.Mokodou (MK12)	
Jadual B4. Data keseluruhan sedimen mengikut siri persampelan di Sg.Mokodou (MK12)	
Lampiran C : Boxplot Kluster Ruang	186



UMS
UNIVERSITI MALAYSIA SABAH

BAB 1

Pengenalan

1.1 Pengenalan

Penutupan kawasan perlombongan adalah satu perkara yang dilakukan apabila kawasan perlombongan mempunyai hasil yang semakin berkurang atau kehabisan sumber (Kuan *et al.*, 2020). Kawasan yang mempunyai aktiviti perlombongan berpotensi berakhir dengan lombong yang terpaksa ditutup dan seterusnya ia akan dikenali sebagai bekas lombong. Antara negara yang mempunyai kawasan perlombongan adalah seperti Afrika (Rakotondrabe *et al.*, 2018), China (Liang *et al.*, 2011), Ghana (Arthur-Holmes *et al.*, 2022), Nigeria (Akindele *et al.*, 2023), German (Tran *et al.*, 2022), Indonesia (Hakim *et al.*, 2023; Palapa & Maramis, 2015) dan juga Malaysia (Kusin *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2022).

Penutupan kawasan lombong boleh memberi kesan yang signifikan kepada kesejahteraan penduduk yang tinggal berhampiran lombong (León-Venegas *et al.*, 2023). Prinsip pertama yang dinyatakan di dalam Dasar Alam Sekitar Deklarasi Rio 1992, adalah "*Human beings are at the centre of concerns for sustainable development. They are entitled to a healthy and productive life in harmony with nature*" (United Nation, 1992). Prinsip yang dinyatakan dalam pernyataan tersebut berfungsi sebagai panduan untuk memastikan bahawa penutupan lombong perlu berjalan dengan baik dan memberikan manfaat positif kepada penduduk berhampiran. Setelah lombong ditutup, usaha untuk memulihkan tanah dan air yang tercemar dapat meningkatkan kualiti hidup penduduk. Ini juga dapat membantu mencegah kesan negatif jangka panjang terhadap kesihatan dan kehidupan penduduk.

Masalah utama di kawasan bekas lombong adalah air berasid (Wei & Wolfe, 2013). Air berasid terbentuk kerana kandungan asid sulfurik yang tinggi di dalam air akibat daripada tindakbalas air dan tanah di kawasan lombong (Hakim *et al.*, 2023; Moreno-González *et al.*, 2022). Perlombongan seperti batu arang dan bijih seperti emas, perak dan tembaga berpotensi menghasilkan mineral sulfida yang seringkali dikaitkan dengan sumber sulfur. Apabila ia terdedah dengan air dan udara ketika perlombongan, pirit dan lain-lain batuan ferum sulfida menghasilkan asid sulfurik. Apabila asid sulfurik terbentuk, pirit berpotensi larut dalam air dan melepaskan logam berat dan metaloid seperti Al dan As ke dalam persekitaran alam sekitar (Jacobs & Testa, 2014).

Di Semenanjung Malaysia, kawasan bekas lombong diselenggara agar berpotensi menjadi kawasan rekreasi, kawasan tadahan banjir dan menjadi kawasan pembuangan sisa efluen daripada kawasan perumahan seperti bekas lombong di Puchong and Lembah Klang, Selangor (Koki *et al.*, 2018). Seterusnya, bekas lombong di Tasik Biru Chin-Chin, Jasin Melaka dan Tasik Rantau, Negeri Sembilan turut menjadi kawasan rekreasi dan kawasan pertanian. Selain itu, kawasan ini menjadi sumber bekalan air untuk pertanian (Koki *et al.*, 2018). Namun, kawasan yang berjaya diselenggara dengan baik adalah sedikit dan ada kawasan perlombongan yang masih memerlukan masa dan kos yang tinggi untuk proses pemulihan seperti perlombongan bijih timah di Bestari Jaya, Selangor (Ashraf *et al.*, 2010).

Di Sabah, terdapat bekas lombong tembaga terbesar di Malaysia yang masih memerlukan proses pemulihan iaitu bekas lombong tembaga Mamut (BLMCM). BLMCM terletak di bahagian tenggara Gunung Kinabalu pada ketinggian 1300-1600 m dari paras laut (Ali *et al.*, 2004). Kedudukan BLMCM yang terletak di kawasan tanah tinggi amat membimbangkan lebih-lebih lagi dengan kapasiti isipadu air berasid yang sangat banyak. Tapak perlombongan yang bersaiz 1200 m lebar dan kedalaman 144 m, kini dipenuhi dengan air berasid (Ent & Edraki, 2018). Kawasan BLMCM menerima taburan hujan dua kali ganda berbanding kawasan pekan Ranau (Osborne, 2000). Taburan hujan adalah dianggarkan 2500 sehingga 3500 mm (Mohd. Azizli *et al.*, 1995). Keadaan cuaca berubah setiap tahun, dan fenomena perubahan iklim (*climate change*) semakin membawa lebih banyak taburan hujan di kawasan kepulauan Borneo.

Taburan hujan yang tinggi menyebabkan aliran air berasid semakin banyak memasuki sistem sungai. Longgokan sisa-sisa batuan terbuang yang tidak diselenggara terdedah dengan hujan dan membawa sisa-sisa batuan yang larut dalam air mengalir memasuki sistem sungai. Sisa longgokan batuan dan amang (*tailing*) yang telah dihasilkan semasa perlombongan BLMCM dijalankan adalah masing-masing dianggarkan 250 Mt dan 100 Mt (Jopony & Tongkul, 2009). Akibat tiada penyelenggaraan yang sempurna semasa penutupan aktiviti perlombongan, BLMCM menjadi kawasan terbiar dan dipantau oleh pihak berkuasa tempatan agar faktor keselamatan sentiasa menjadi keutamaan. Namun, interaksi alam masih berjalan di mana air berasid masih terus bertakung dan limpahnya memasuki Sg.Mamut sehingga kini.

Takungan air berasid yang banyak di kawasan bekas lombong memberi impak yang besar terhadap alam sekitar. Ancaman air berasid dalam memudaratkan kesihatan manusia sering menjadi perhatian yang serius (Kusin *et al.*, 2018). Air larian daripada bekas lombong yang memasuki sungai dan seterusnya ke kawasan pertanian akan menjejaskan sumber makanan dan minuman secara tidak langsung kepada penduduk asal yang tinggal berhampiran (Blanco *et al.*, 2023). Selain air sungai, air berasid turut memberi impak dengan komposisi logam berat yang mengganggu kualiti sumber air bawah tanah (Alexander & Ndambuki, 2022).

Penyelesaian bagi takungan air berasid masih belum ada penyelesaian muktamad. Cadangan penyelesaian telah diusulkan bagi BLMCM namun masih belum ada pelaksanaan (Osborne, 2009). Faktor kos rawatan dan penyelenggaraan air berasid yang tinggi perlu difikirkan bagi memastikan tindakan bagi keputusan yang dibuat kerana kapasiti air berasid yang sangat luar biasa isipadunya dan kedudukan BLMCM pada altitud tinggi >3000 m dari aras laut (Ent & Edraki, 2018; Osborne, 2009). Oleh itu, takungan air berasid di kawasan bekas lombong BLMCM kini semakin membimbangkan dan memberikan impak yang besar terhadap alam sekitar.

1.2 Permasalahan Kajian

Pemantauan kualiti air di BLMCM dan Sg. Mamut menjadi isu utama kerana bahaya air berasid kepada alam sekitar dan penduduk kampung yang tinggal di kawasan berdekatan dengan Sg.Mamut. Isu di kawasan BLMCM yang mencetuskan pelbagai masalah alam sekitar adalah perlu diberi perhatian.

Takungan air berasid BLMCM berada di kawasan altitud tinggi dengan ketinggian lebih daripada 1300 m dari aras laut adalah sangat membimbangkan lebih-lebih lagi kawasan ini berhampiran dengan gunung Kinabalu yang potensi terdedah dengan gempa bumi. Komposisi air berasid yang banyak dianggarkan mempunyai nilai pH diantara 2.9 -3.9 (Tongkul & Jopony, 2009; Yen & Saibeh, 2013; van der Ent & Edraki, 2018. Sifat air berasid yang mengakis dan berada dalam kuantiti yang banyak amat merisaukan kerana ia berpotensi mengganggu ekosistem semulajadi terutamanya komponen air dan tanah.

Kawasan BLMCM menerima kekerapan hujan yang tinggi menyebabkan takungan air akan melimpah keluar dan arah limpahan aliran air berasid mengalir ke kawasan Sg.Mamut. Sg.Mamut membawa aliran air dari kawasan hulu (*upstream*) iaitu BLMCM mengalir ke kawasan hilir (*downstream*) iaitu kawasan perkampungan dan kawasan rekreasi. Kebimbangan terhadap air berasid di kawasan hilir menjadi perhatian yang lebih serius kerana penduduk kampung terdedah kepada bahaya air berasid dan tercemar. Air berasid berpotensi mengganggu kesihatan, terutamanya penduduk kampung yang bergantung kepada sungai sebagai sumber air untuk kegunaan harian, air minum, pertanian, dan rekreasi.

Keperluan maklumat dan data yang lebih terperinci berkenaan BLMCM dan Sg.Mamut adalah diperlukan bagi mengetahui keadaan kawasan hulu dan hilir terutamanya kepekatan air berasid dan kualiti air kawasan tersebut. Dengan adanya maklumat yang lebih mendalam dapat memberikan gambaran yang lebih jelas terhadap situasi semasa BLMCM dan Sg.Mamut. Data dan maklumat awal yang diperolehi menjadi persediaan sebelum tiba kecemasan yang melibatkan kawasan BLMCM dan Sg.Mamut.