

Pembentukan Tanah Residu di Malaysia melalui Faktor Kawalan Fizikal Batuan Induk

(The Formation of Residual Soil in Malaysia from the Physical Control Factor of Parent Rocks)

AZLAN SHAH NERWAN SHAH^{1,2} & NOR SHAHIDAH MOHD NAZER^{1,*}

¹*Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM, Bangi, Selangor, Malaysia*

²*Kumpulan Teknologi Bahan, Bahagian Teknologi Industri, Agensi Nuklear Malaysia, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia*

Diserahkan: 6 Mei 2024/Diterima: 3 Oktober 2024

ABSTRAK

Batuan induk utama – igneus, sedimen dan metamorf menghasilkan variasi tanah residu *in situ* yang berbeza di Malaysia. Kajian ini membangunkan nilai fizikal terkini ke atas 38 sampel tanah residu berbeza batuan induk di seluruh Malaysia dengan pengkhususan diberikan ke atas nilai taburan saiz butiran (PSD), had Atterberg melalui penentuan had plastik (PL), had cecair (LL) dan indeks keplastikan (PI), graviti tentu (G_s), indeks tekstur luluhawa (I_w) dan cirian morfologi mikro mineral lempung. Hasil kajian mendapati terdapat variasi unjuran PSD dan darjah ketekalan tanah mengikut jenis tanah baki. Tanah residu igneus mempunyai kandungan pasir (P_r) kasar dan kerikil (K_l) yang tinggi dengan julat nilai 83.5%-93.31%. Peratusan lodak (L_k) dan lempung (L_g) adalah rendah ke sederhana, ber julat 6.69%-16.5% serta nilai G_s ber julat sekitar 2.35-2.56. Darjah keplastikan tanah residu igneus adalah rendah-sederhana dengan nilai PL sekitar 27.7%-40.53%, nilai LL ber julat 40.0%-53.93% dan nilai PI sekitar 8.34%-14.56%. Tanah residu metamorf mempunyai peratus butiran kasar yang tinggi dengan julat peratusan $P_r + K_l$ antara 75.5%-95% dan peratus $L_k + L_g$ yang rendah-sederhana ber julat antara 5%-24.5%. Julat G_s adalah antara 2.52-2.71. Nilai PL dan LL masing-masing ber julat antara 19.21%-36.48% dan 29.55%-61.83% dengan nilai PI sekitar 3.60%-25.35%. Tanah residu igneus dan metamorf memperlihatkan nilai I_w yang rendah berbanding tanah residu sedimen dengan kehadiran mineral lempung stabil seperti kaolinit dan haloisit serta peratus butiran kohesif yang rendah. Sampel tanah residu sedimen mempunyai peratus butiran kasar yang lebih rendah dengan julat $P_r + K_l$ antara 54.07%-88% dan peratusan butiran halus $L_k + L_g$ yang tinggi dengan julat antara 12%-45.93%. Julat G_s adalah antara 2.40-2.70. Tanah baki sedimen juga mempunyai darjah keplastikan yang tinggi dengan julat nilai PL dan LL masing-masing antara 21.58%-40.71% dan 38.95%-88.42% serta nilai PI sekitar 7.24%-51.61%. Tanah ini ditandai dengan kehadiran mineral lempung mengembang seperti montmorilonit dan vermikulit.

Kata kunci: Mineral lempung; sifat fizikal; taburan saiz butiran; tanah residu

ABSTRACT

The main parent rocks – igneous, sedimentary and metamorphic produce different *in situ* residual soil variations in Malaysia. The study developed the latest physical values obtained for 38 soil samples from different parent rock throughout Malaysia, focusing on the particle size distribution (PSD) value, Atterberg limits from the determination of plastic limit (PL), liquid limit (LL) and plasticity index (PI), specific gravity (G_s), weathering textural index (I_w), and micro-morphological properties of clay minerals. The results found varying PSD projections and degree of soil consistency show depending on residual soils type. The residual igneous soil has a high content of coarse sand (P_r) and gravel (K_l) ranging from 83.5%-93.31%. The percentage of silt (L_k) and clay (L_g) is low-medium, ranging from 6.69%-16.5% and the G_s values ranged between 2.35-2.56. The degree of plasticity of the igneous residual soil is low to moderate, with PL and LL values ranging between 27.7%-40.53% and 40.0%-53.93%, respectively, and PI values around 8.34%-14.56%. Metamorphic residual soil has a higher coarse grains percentage with a $P_r + K_l$ percentage ranging between 75.5%-95% and low-medium range of $L_k + L_g$ ranging between 5%-24.5%. The G_s ranges between 2.52-2.71. The PL and LL values each ranging between 19.21%-36.48% and 29.55%-61.83%, respectively, with the PI values between 3.60%-25.35%. Igneous and metamorphic residual soils show a lower I_w values compared to sedimentary residual soils, with the presence of stable clay minerals like kaolinite and halloysite and lower percentage of cohesive particles. The sedimentary residual soils sample has a lower coarse grains percentage with $P_r + K_l$ ranges between 54.07%-88% and a higher finer grains $L_k + L_g$ percentage with a range between 12%-45.93%. The G_s ranges between 2.40-2.70. Sedimentary residual soils also show a high degree of plasticity, with a range of PL and LL values between 21.58%-40.71% and 38.95%-88.42%, respectively, and PI values between 7.24%-

51.61%. This soil is marked by the presence of expanding clay minerals like montmorillonite and vermiculite.

Keywords: Clay minerals; particle size distribution; physical properties; residual soil

PENGENALAN

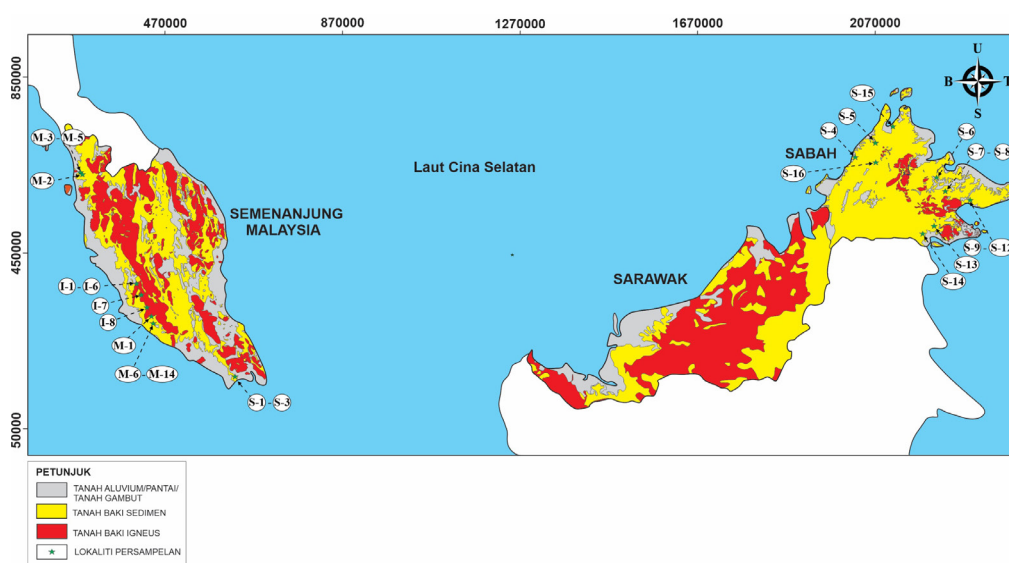
Tanah baki merupakan asalan jasad batuan yang terluluhawa secara *in situ*, iaitu setempat (Duarte & Rodrigues 2018) tanpa melibatkan sebarang proses geomorfologi lain seperti pengangkutan atau pemendapan (Blight 2012). Takrifan ini relevan di kawasan tropika kerana suhu dan keamatan hujan yang tinggi mempercepatkan proses luluhawa yang menyumbang kepada pembentukan tanah (Ishak, Zolkepli & Affendy 2017). Secara amnya, komposisi tanah baki terdiri daripada mineral, bahan organik, udara dan air di samping bahan aktif lain seperti pecahan karbonat dan bahan amorfus oksi-hidroksida (Wan Zuhairi & Nurita 2019). Selain pengaruh iklim, pembentukannya turut didorong oleh beberapa faktor utama yang lain meliputi komposisi kimia batuan asalan, keadaan persekitaran, masa, topografi, aktiviti mikrobiologi serta tahap kepesatan luluhawa (Aloni & Alexander 2020; Chen et al. 2023; Huat, Toll & Prasad 2012).

Di Malaysia, taburan tanah baki meliputi sebahagian besar kawasan pergunungan, bukit-bukau, dataran beralun dan paya (Sung et al. 2017). Berdasarkan Rajah 1, tanah baki intrusif jenis granit tertabur secara meluas di Semenanjung Malaysia terutamanya di kawasan lereng bukit dan banjaran gunung, sejajar dengan rejahan granitoid yang membentuk morfologi tanah tinggi dan banjaran di bahagian jalur barat dan timur. Jenis batuan berbeza membentuk struktur tanah yang berbeza tekstur dan mineral (Araujo, Zinn &

Lal 2017). Catoni et al. (2016) menyatakan bahawa batuan silika seperti batu pasir dan kuarzit cenderung membentuk tanah berpasir halus manakala batuan granit dan gneis yang dicirikan dengan batuan tinggi kandungan kuarza lazimnya menghasilkan tanah bertekstur lebih kasar (Gray, Bishop & Wilson 2015). Tanah hasil luluhawa batuan jenis vulkanik pula dicirikan dengan kandungan zarah lempung yang lebih tinggi (Musta, Erfen & Tahir 2008) berikutan kehadiran mineral feldspar yang tinggi.

Tanah baki granit lazimnya mempunyai ketebalan melebihi 30 m berbanding tanah baki sedimen yang lebih tipis (Marto & Yusoff 2017), iaitu sekitar 10 m (Tan 2004). Ia dipengaruhi oleh kehadiran kekar dalam mineral primer (kuarza, mika dan feldspar) menyebabkan batuan ini mudah retak dan memudahkan proses luluhawa berlaku (Niu 2019) melalui interaksi air (Sun et al. 2021). Kajian terdahulu melaporkan bahawa kadar luluhawa kimia batu igneus adalah lebih tinggi iaitu 15 m/Myr (Fernandes et al. 2016), berbanding batuan sedimen dengan purata 0.5 m/Myr (Junior et al. 2019). Secara amnya, lapisan profil pada kedalaman 0.3-2.0 m dirujuk sebagai lapisan tanah atas manakala lapisan di bawahnya dikelaskan sebagai saprolit, iaitu batuan dasar yang terluluhawa secara kimia yang mengubah tekstur asalnya (Bland & Rolls 1998). Jadual 1 menunjukkan data sifat indeks tanah oleh beberapa pengkaji terdahulu berdasarkan jenis batuan induk dengan nilai ketumpatan, taburan saiz butiran dan darjah ketekalan tanah menunjukkan corak sepunya mengikut jenis batuan induk.

Justeru, analisis kuantitatif dijalankan bagi membangunkan maklumat tanah baki kawalan batuan induk yang terpilih di Malaysia yang terkini berdasarkan ujian makmal terpilih. Pengetahuan ini amat penting



Sumber Diubah suai daripada Huat, Toll & Prasad (2012), Jabatan Pertanian Sarawak (2002), Marto dan Yusoff (2017) dan Thomas (1966)

RAJAH 1. Peta taburan tanah di Malaysia

JADUAL 1. Keputusan sifat indeks tanah mengikut kumpulan batuan asalan berdasarkan kajian terdahulu

Jenis batuan	Lokaliti	Litologi/ Formasi	G _s	Sifat fiziko-kimia tanah							Rujukan
				PSD (%)			Had Atterberg				
				K _i	P _r	L _k	L _g	PL	LL	PI	
Igneus	Taman Ukays Perdana, Kuala Lumpur	Batu granit	2.45	1.0	45.0	22.0	32.0	28.5	45.0	16.5	Bakhsipour et al. (2016)
	Kolej Matrikulasi Pahang, Pahang	Batuan granit	2.74	4.20	27.9	45.1	22.8	31.0	70.0	39.0	Ishak, Zolkepli & Affendy (2017)
	Kuala Klawang, Negeri Sembilan	Batu granit	2.65	45.32	51.25	0.62	2.81	35.77	57.6	21.83	Saffari et al. (2019)
	Broga, Selangor	Batu granit	2.50-2.59	0	54-63	32-42	1-6	38-38.7	48.5-50	9.9-11.99	Zarime & Yaacob (2019)
	Taman Connaught, Kuala Lumpur	Batu granit	2.37	30.0	61.0	9.0	9.0	14.1	51.8	37.7	Yusof, Al-Adhami & Matore (2022)
	Bukit Antarabangsa, Kuala Lumpur	Batu granit	2.69	0	65	10	25	24.4	35.49	11.09	Anggraini et al. (2022)
	Putrajaya	Batu granit	2.56	19	42.17	15.18	23.65	27.45	41	11	Abdullah, Rashidi & Ariffin (2023)
	Taman Bukit Permai, Ampang, Selangor	Batu granit	2.57	7.4	42.6	36.8	13.2	36.4	61.2	24.8	Batumalai et al. (2023)
	KM16, Jalan Utama Kuala Lumpur-Ipoh	Batu granit	2.6-2.7	2.0-34	23.0-44	8-38	9-25	20.5-34.9	36.5-74	14.9-48.8	Raj (2023)

...bersambung dari halaman sebelumnya

Batu Caves, Selangor	Batu kapur	2.48	7.0	19.0	17.0	57.0	40.8	52.0	11.2	Bakhtshipour et al. (2016)
	Batu lumpur, batu pasir dan syal	2.63-2.65	0	75.8-78.3	8.5-12.1	15.6-9.5	13.6-22.4	20.9-31.3	7.3-8.9	
Ranau-Kundasang, Sabah	Argilit, batu lumpur dan sub-filit dengan tuf	2.53	0	80.36	7.31	12.33	14.82	21.57	6.75	Erfen, Gansau & Henry (2016)
	Endapan tilloid	2.49-2.5	0	52.6-68.8	20.1-35.16	11.1-12.2	32.1-44.02	37.8-65	5.71-19.86	
Salak Tinggi, Selangor	Batu Filit, syis, sabak, batu kapur dan batu pasir	2.62-2.69	0	66.8-71.3	19.1-22.3	9.6-10.3	16-17.2	29.2-33.4	13.2-16.3	Khalid, Mukri & Arshad (2019)
Subang, Selangor Putrajaya	Batu pasir, batu lodak, syal	2.70	1.85	69.25	13.9	15.0	21.8	50.1	28.3	Yong et al. (2019)
		2.84	0	84.10	10.03	5.87	36.5	73.0	36.5	
Kundasang, Sabah	Batu pasir, blok batuan pelbagai saiz, batu lumpur	2.43-2.64	0	28.91-76.18	18.2-44.99	5.6-30.9	26.7-57.8	30.0-82.0	3.28-30.48	Erfen et al. (2020)
Lahad Datu, Sabah	Endapan sedimen klastik dengan blok batuan ofiolit pelbagai saiz	2.59	0	65.0	14.0	21.0	33.88	75.16	41.28	Shah, Nazer & Harris (2022)
Jengka, Pahang	Batu pasir, batu lodak, syal	2.62	35.42	51.93	12.65	0	25.08	39.85	14.77	Latib, Kasa & Bachok (2023)
Universiti Putra Malaysia, Selangor	Batu Filit, syis, sabak, batu kapur dan batu pasir	2.55	0	13	32	55	30	61	23	Tan et al. (2019)
Batang Berjuntai, Selangor	Batuan meta sedimen	2.4-2.7	0	11-15	45-56	20-30	21-27	39-57	14-35	Wan Zuhairi & Nurita (2019)
Nilai, Negeri Sembilan	Batu filit	2.5-2.62	0	82.6-98.0	1.7-16.2	0.26-1.9	20.19-32.3	25.19-43.46	1.89-11.16	Shah, Nazer & Harris (2022)
Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor	Batu filit, kuarzit, filit dan syal	2.6-2.63	42.76-61.04	38.27-54.43	0.03-0.4	0.27-2.38	16.5-36.7	28-59	5.48-25.38	Nazer et al. (2023)

Nota: G_s = Graviti Tenu; PSD = Taburan Saiz Butiran; K_i = Kerikil; P_r = Pasir; L_k = Lodak; L_g = Lempung; PL = Had cecair; LL = Had plastik; PI = Indeks keplastikan

untuk memahami sifat dan tingkah laku tanah berdasarkan maklumat geologi setempat dan diguna pakai secara meluas bagi tujuan pertanian, kejuruteraan, pengurusan alam sekitar dan perancangan guna tanah selain mitigasi untuk bencana alam dan asosiasinya terhadap perubahan iklim.

BAHAN DAN KAEDAH

Dalam kajian ini, beberapa kawasan persampelan dikenal pasti di beberapa kawasan di Semenanjung Malaysia serta Sabah, berdasarkan kepada 3 jenis batuan induk utama iaitu igneus, sedimen dan metamorf (Rajah 1). Sebanyak 38 sampel tanah baki iaitu 8 sampel tanah baki igneus, 16 sampel tanah baki sedimen dan 14 sampel tanah baki metamorf di ambil dan diuji berdasarkan pencirian fizikal di makmal bagi melihat perbandingan sifat tanah yang dijana oleh jenis kumpulan batuan induk yang berbeza. Lokasi pemilihan dibuat berdasarkan pembentukan tanah baki yang terluhawa daripada batuan asalan: igneus, metamorf dan sedimen.

Sampel I-1-I-8 merupakan produk luluhawa batuan granit jenis intrusif dengan anggaran usia Akhir Trias–Awal Jura (Liew & Page 1985) yang tersebar luas di Semenanjung Malaysia meliputi Batang Kali, Kemensah dan Semenyih, Selangor (Jadual 2). Sampel tanah S-1-S-3 di Iskandar Puteri, Johor adalah kawasan yang didasari oleh batuan sedimen berusia Trias (Jabatan Mineral dan Geosains 1985). Sampel tanah S4 diambil daripada batuan asalan Formasi Crocker dengan litologi batuan sedimen iaitu pelapisan batu pasir dan syal berusia Oligosen–Awal Miosen (Mohamed, Rahman & Ismail 2015; Rahman 1999). Sampel tanah S-5 dan S-6 masing-masing diambil daripada kawasan cerun terdedah di Kota Belud dan Kinabatangan, Sabah. Kawasan cerun di Kota Belud di dasari oleh batuan daripada Formasi Waru (Melange) dengan bercirikan litologi pencampuran batu pelbagai saiz seperti rijang-spilit, batu kapur, breksia dan batuan ofiolit (Tjia 1988; Tongkul 2006) berusia Tengah Miosen (Musta et al. 2022; Tahir et al. 2017). Persampelan tanah di Kinabatangan dicirikan sebagai kawasan yang didasari oleh Formasi Tanjong iaitu pelapisan batu lumpur tebal, lodak dan batu pasir nipis (Allagu 1996) berusia Awal Miosen–Awal Miosen Tengah (Clennell 1992).

Persampelan tanah di Lahad Datu (S-7–S-8) terdiri daripada Formasi Ayer yang merupakan unit Melange di Timur Sabah yang dikelaskan sebagai endapan sedimen klastik dengan blok batuan ofiolit pelbagai saiz dalam matriks lumpur (Aitchison 1994) berusia Atas Miosen (Peng et al. 2004). Manakala, sampel S-9-S-12 merupakan produk luluhawa daripada Formasi Tabanak berusia Atas Miosen–Pliosen yang terdiri daripada batuan kerikil pelbagai jenis seperti diorit, gabro, rijang selain batu pasir dan syal (Peng et al. 2004). Sampel tanah S-13 dan S-14 diambil daripada cerun tanah di Tawau, Sabah iaitu di Merotai dan Kalabakan. Sampel tanah S-13 dan S-14

merupakan tanah yang terbentuk daripada batuan pasir dan batu lumpur daripada Formasi Umas-Umas berusia Miosen Tengah–Pliosen (Kirk 1962). Lokasi persampelan S-15 (Kota Marudu, Sabah) adalah kawasan yang didasari oleh batuan dasar berusia Awal Kapur–Paleosen dengan litologi batuan basalt, gabro, dolerit, rijang dan batu lumpur (Muda & Tongkul 2008). Sampel tanah daripada lokasi S-16 pula merupakan kawasan endapan tiloid (Pinosuk Gravel) yang dicirikan sebagai percampuran batuan kerikil, batu pasir dan batu lumpur berusia Akhir Pleistosen–Holosen (Peng et al. 2004).

Kawasan persampelan tanah baki metamorf pula adalah di Jalan Temiang-Pantai, Negeri Sembilan (M-1), Gunung Jerai (M-2) dan Titi Hayun (M-3–M-5) di Kedah dan Bangi, Selangor (M-6–M-14). Secara amnya, kawasan Jalan Temiang-Pantai dan Bangi di dasari oleh Formasi Kenny Hill yang terdiri daripada unit batuan metamorf jenis filit dengan pelapisan batu kuarzit dan syal (Ho 1995) berusia Karbon–Perm (Chen, Mustafa & Khoo 2002). Lokasi persampelan tanah di Titi Hayun dan Gunung Jerai pula merupakan kawasan di dasari batuan metasedimen daripada Formasi Jerai yang terdiri daripada batu jenis kuarzit dan filit berusia Kambria (Hoe & Yuan 2010).

Sifat fizikal tanah diuji berdasarkan graviti tentu tanah (G_s) (ASTM D854–14: Kaedah A), analisis taburan saiz butiran (PSD) melalui kaedah ayakan dan hidrometer (ASTM D6913/D6913M–17/ASTM D7928–17), had Atterberg merangkumi had plastik (PL), had cecair (LL) serta indeks keplastikan (PI) (ASTM D4318–17e1). Indeks tekstur luluhawa (I_w) merupakan suatu penunjuk yang digunakan untuk menganggarkan darjah luluhawa batuan berdasarkan nisbah butiran lempung dan jumlah kandungan butiran halus (Raj 2023, 2018). Pengiraan I_w adalah berdasarkan persamaan (1). Jadual 3 menunjukkan penunjuk tipikal bagi nilai graviti tentu, saiz butiran tanah dan darjah keplastikan tanah. Ujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) model Carl Zeiss GeminiSEM 500 juga dijalankan ke atas fraksi tanah lempung bagi mengenal pasti jenis mineral lempung utama yang hadir di dalam sesuatu tanah baki.

$$I_w = \left(\frac{\% \text{ Lempung}}{\% \text{ Lodak} + \% \text{ Lempung}} \right) \quad (1)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

Nilai Graviti Tentu, G_s adalah berjulat 2.35–2.54 bagi sampel tanah baki igneus, 2.40–2.70 bagi sampel tanah baki sedimen dan 2.52–2.71 bagi sampel tanah baki metamorf (Jadual 4). Nilai G_s merupakan perbandingan relatif ketumpatan tanah terhadap air dan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti nisbah ruang pori antara zarah, kehadiran bahan organik dan taburan saiz butiran dan gred luluhawa tanah. Kandungan butiran pasir kasar yang tinggi meningkatkan nisbah ruang antara zarah halus lalu mengurangkan ketumpatan tanah berbanding tanah yang

JADUAL 2. Rangkuman lokaliti persampelan dan litologi batuan induk kawasan kajian

Jenis batuan induk	No. Sampel	Lokaliti	Formasi (Litologi)	Usia
Igneus	I-1 – I-6	Batang Kali, Selangor	Batu granit intrusif	Akhir Trias–Awal Jura
	I-7	Kemensah, Selangor		
	I-8	Jalan Semenyih, Selangor		
Sedimen	S-1–S-3	Iskandar Puteri, Johor	Perlappingan batu pasir, batu lodak dan syal	Trias
	S-4	Kota Kinabalu, Sabah	Formasi Crocker: Perlappingan batu pasir dan syal	Oligosen–Awal Miosen
	S-5	Kota Belud, Sabah	Melange (Formasi Wariu): Pencampuran batu pelbagai jenis- rijang- spilit, batu kapur, breksia, batuan ofiolit dan syal	Tengah Miosen
	S-6	Kinabatangan, Sabah	Formasi Tanjong: Batu lumpur, lodak, batu pasir	Awal Miosen–Awal Miosen Tengah
	S-7–S-8	Ladang Jeroco, Lahad Datu, Sabah	Melange (Formasi Ayer): Endapan sedimen klastik dengan blok batuan ofiolit; nendatan-breksia dalam matriks lumpur	Atas Miosen
	S-9–S-12	Jalan POIC – Segama, Lahad Datu, Sabah	Formasi Tabanak: Batu lumpur, batu pasir, konglomerat	Atas Miosen–Pliosen
	S-13	Merotai, Sabah	Formasi Umas-Umas: Perlappingan syal, batu lumpur dan batu pasir nipis	Tengah Miosen–Pliosen
	S-14	Kalabakan, Sabah		
	S-15	Kota Marudu, Sabah	Batuan dasar: Basalt, gabro, dolerit, rijang dan batu lumpur	Awal Kapur–Paleosen
	S-16	Mesilau, Kundasang, Sabah	Pinosuk Gravel: kerikil, batu pasir, batu lumpur	Akhir Pleistosen–Holosen
Metamorf	M-1	Jalan Temiang-Pantai, Negeri Sembilan	Formasi Kenny Hill: Kuarzit, filit dan syal	Karbon–Perm
	M-2	Gunung Jerai	Formasi Jerai: Batuan metasedimen (kuarzit dan skis)	Kambria
	M-3–M-5	Titi Hayun, Kedah		
	M6–M-14	Bangi, Selangor	Formasi Kenny Hill: Kuarzit, filit dan syal	Karbon–Perm

JADUAL 3. Penunjuk tipikal graviti tentu tanah, taburan saiz butiran dan darjah keplastikan

GRAVITI TENTU TANAH			
<i>Jenis tanah</i>		<i>Nilai graviti tentu</i>	
Pasir		2.65 - 2.67	
Pasir berlodak		2.67 - 2.70	
Lempung tidak organik		2.70 - 2.80	
Tanah dengan kehadiran mika/besi		2.75 - 3.00	
Tanah organik		1.00 - 2.60	
TABURAN SAIZ BUTIRAN			
<i>Diameter butiran (mm)</i>		<i>Saiz butiran</i>	
>4.75		Kerikil	
2.01 - 4.75		Kasar	
0.426 - 2.00		Pasir	Sederhana
0.076 - 0.425		Halus	
0.002 - 0.075		Lodak	
<0.002		Lempung	
DARJAH KEPLASTIKAN			
<i>Indeks Keplastikan, PI (%)</i>	<i>Jenis tanah</i>	<i>Darjah keplastikan</i>	<i>Darjah kohesif</i>
0	Pasir	Tidak plastik	Tidak kohesif
<7	Lodak	Keplastikan rendah	Sedikit kohesif
7 - 17	Lempung berlodak	Keplastikan sederhana	Kohesif
>17	Lempung	Keplastikan tinggi	Kohesif

Sumber Bowles (2012), Roy & Bhalla (2017) dan ASTM D2487 (2006)

didominasi oleh zarah halus (lodak dan lempung). Nilai G_s bagi tanah baki sedimen dan metamorf adalah lebih tinggi berbanding tanah baki igneus yang mengandungi peratus butiran pasir kasar yang signifikan. Nilai G_s yang tinggi ini disebabkan oleh kehadiran butiran lodak dan lempung yang lebih tinggi pada tanah sedimen dan metamorf yang mengisi ruang liang antara butiran kasar dan menjadikan tanah lebih tumpat (Beemer et al. 2020). Walau bagaimanapun, terdapat tanah baki sedimen yang merekodkan nilai G_s yang rendah terutamanya tanah yang mengandungi peratusan lempung lebih dominan seperti sampel S-15 (Kota Marudu, Sabah).

Semua sampel tanah baki igneus dikelaskan sebagai tanah pasir berlodak dengan julat 0.75%-21.48% (kerikil; K_p), 65.52%-85.75% (pasir; P_p), 5.09%-13.74% (lodak; L_k) dan 1.49%-5.08% (lempung; L_g) (Jadual 4). Sampel tanah baki sedimen pula mempunyai variasi taburan saiz butiran dengan pengelasan tanah yang pelbagai iaitu pasir berlodak, pasir berlempung dan lempung. Julat peratusan adalah 0%-23.64% (K_p), 53.92%-82.54% (P_p), 2.23%-15.39% (L_k) dan 3.08%-43.70% (L_g). Sampel tanah baki metamorf dikelaskan sebagai tanah pasir berlempung dan pasir berlodak dengan julat peratusan 0%-15.53% (K_p), 75.50%-88.03% (P_p), 3.60%-15.45% (L_k) dan 1.40%-

9.30% (L_g). Peratus butiran lodak + lempung dalam tanah baki sedimen adalah lebih tinggi dengan nisbah perbezaan hampir 2 kali ganda berbanding tanah baki igneus dan metamorf. Daripada konteks butiran pasir, tanah baki metamorf mempunyai perbezaan jurang butiran yang lebih kecil, diikuti tanah baki igneus dan sedimen. Berdasarkan Rajah 2(a) dan 2(b), kandungan butiran lempung bagi tanah baki sedimen adalah lebih tinggi berbanding tanah baki lain, manakala kandungan butiran lodak adalah lebih tinggi dalam tanah baki metamorf. Dalam konteks kandungan pasir pula, tanah baki igneus mengandungi peratus pasir bersaiz kasar + kerikil yang lebih signifikan, manakala butiran pasir bersaiz sederhana dilihat lebih tinggi pada tanah baki sedimen. Walau bagaimanapun, kandungan butiran kerikil dalam tanah baki sedimen adalah tinggi terutamanya pada sampel tanah di Lahad Datu, Sabah berbanding di Iskandar Puteri, Johor yang disumbang oleh pecahan agregat batuan ofiolit dari unit melange. Tanah baki metamorf (metasedimen) menunjukkan kandungan butiran pasir halus yang lebih tinggi, terutamanya tanah baki di Bangi, Selangor yang dikelaskan sebagai batuan metamorf bergred rendah (Jasin & Harun 2011).

Rajah 3 menunjukkan carta keplastikan bagi setiap sampel tanah. Nilai Indeks Keplastikan, PI dengan nilai

JADUAL 4. Hasil keputusan sifat indeks fizikal tanah mengikut jenis batuan induk

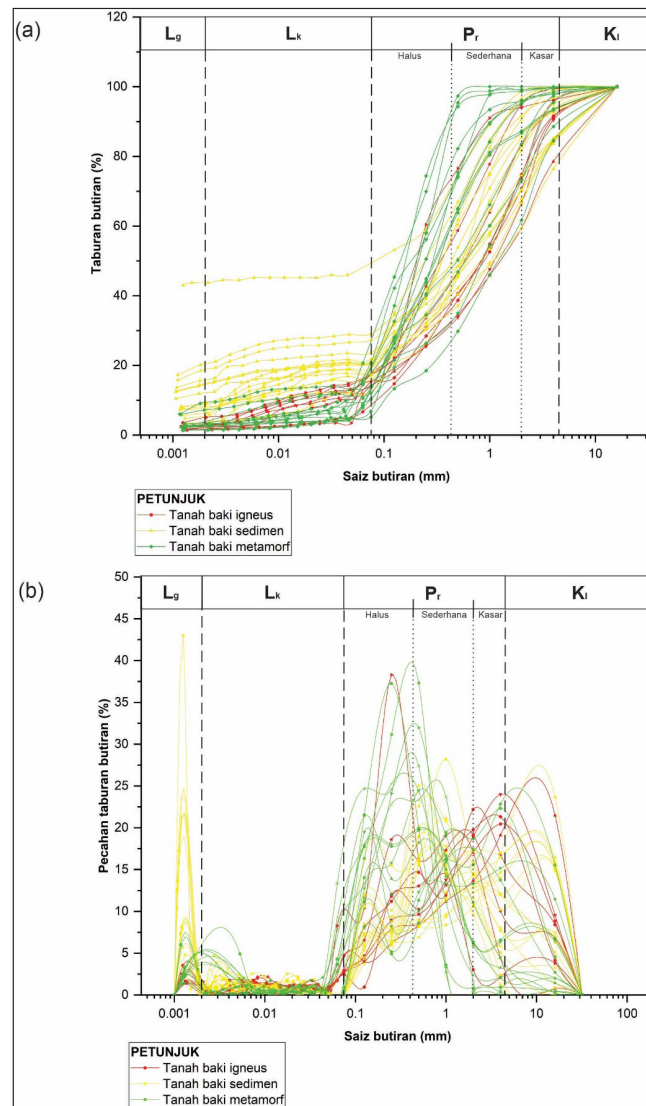
Jenis batuan	Sampel	Lokaliti	G _s	Sifat Indeks Tanah							I _w
				PSD (%)			Had Atterberg				
				K _u	P _r	L _k	L _g	PL	LL	PI	
Igneus	I-1	Batang Kali, Selangor	2.56	8.84	75.16	12.91	3.09	35.57	45.53	10.16	0.19
	I-2		2.54	6.82	76.68	13.74	2.76	28.43	41.29	12.86	0.17
	I-3		2.46	21.48	65.52	11.20	1.80	40.53	53.93	13.40	0.14
	I-4		2.35	9.54	78.46	9.85	2.15	35.41	44.60	9.19	0.18
	I-5		2.50	4.15	80.85	9.92	5.08	40.29	56.11	15.81	0.34
	I-6		2.54	0.75	85.75	10.7	2.80	27.77	35.45	7.68	0.21
	I-7		2.52	3.79	84.51	10.21	1.49	31.66	40.00	8.34	0.13
	I-8		2.54	8.40	84.91	5.09	1.60	25.90	40.46	14.56	0.24
Sedimen	S-1	Iskandar Puteri, Johor	2.63	1.43	82.83	12.66	3.08	26.97	38.96	11.99	0.20
	S-2		2.59	5.13	82.54	8.70	3.63	36.61	56.62	20.01	0.29
	S-3		2.70	3.24	75.66	15.26	5.84	35.54	52.31	16.77	0.28
	S-4	Kota Kinabalu, Sabah	2.57	0.85	82.35	9.27	7.53	28.28	46.33	18.05	0.45
	S-5		2.65	7.44	70.76	15.39	6.41	25.29	42.00	16.71	0.29
	S-6		2.51	0	81.10	10.83	8.07	35.56	56.97	21.41	0.43
	S-7	Lahad Datu, Sabah	2.59	15.54	57.26	8.30	18.90	34.56	76.34	41.78	0.69
	S-8		2.58	14.84	56.16	8.38	20.62	30.89	74.3	43.41	0.71
	S-9		2.57	16.39	63.41	5.66	14.54	39.66	81.98	42.32	0.72
	S-10	Merotai, Sabah	2.55	15.80	63.59	5.31	15.30	40.71	84.34	43.63	0.74
	S-11		2.55	15.16	61.24	7.61	15.99	39.11	82.45	43.34	0.68
	S-12		2.61	23.64	58.86	7.37	10.13	33.49	64.92	31.43	0.58
	S-13	Kalabakan, Sabah	2.55	6.29	74.61	10.31	8.79	21.58	54.17	32.59	0.46
	S-14		2.59	6.98	70.02	13.80	9.20	28.26	53.58	25.32	0.40
	S-15		2.40	0.15	53.92	2.23	43.70	36.81	88.42	51.61	0.95
	S-16	Mesilau, Kundasang, Sabah	2.52	15.16	72.84	8.50	3.50	31.71	38.95	7.24	0.29

bersambung ke halaman seterusnya...

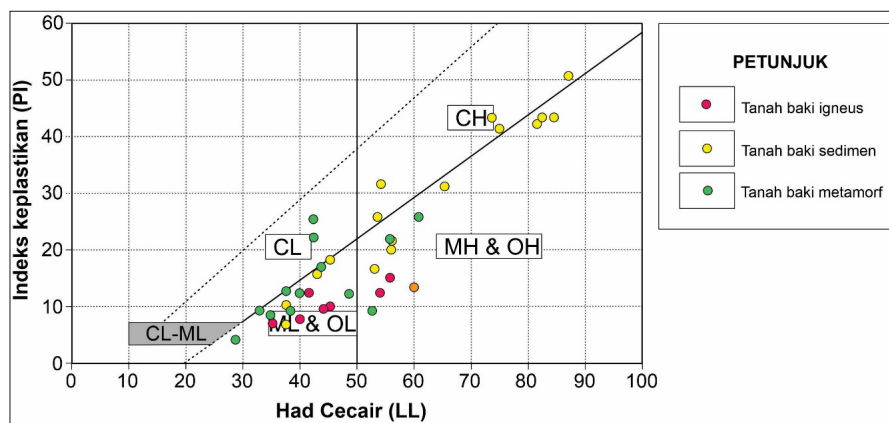
...bersambung dari halaman sebelumnya

M-1	Jalan Temiang-Pantai, Negeri Sembilan	2.54	2.70	83.30	4.70	9.30	36.48	61.83	25.35	0.66
M-2	Gunung Jerai, Kedah	2.52	4.56	85.13	7.79	2.52	25.21	38.44	13.23	0.24
M-3		2.65	1.42	83.58	12.00	3.00	25.95	29.55	3.6	0.20
M-4	Titi Hayun, Kedah	2.62	11.46	83.54	3.46	1.54	24.03	32.80	8.77	0.31
M-5		2.56	15.53	79.47	3.60	1.40	26.83	43.80	16.97	0.28
M-6		2.55	0.44	87.53	7.15	4.88	43.12	52.22	9.10	0.41
M-7		2.59	1.97	88.03	6.34	3.66	33.37	56.00	22.63	0.37
M-8		2.63	6.72	80.28	9.54	3.46	16.97	42.00	25.03	0.27
M-9		2.68	6.42	80.08	10.50	3.00	19.21	42.00	22.79	0.22
M-10	Bangi, Selangor	2.71	0.44	79.61	15.45	4.50	28.60	40.80	12.19	0.23
M-11		2.74	0.46	84.54	12.40	2.60	29.49	38.90	9.41	0.17
M-12		2.71	2.05	79.45	16.00	2.50	36.39	49.00	12.61	0.14
M-13		2.66	0.23	82.27	15.20	2.30	27.21	35.90	8.19	0.13
M-14		2.64	0	75.50	21.50	3.00	37.04	60.90	23.86	0.12

Nota: G_s = Gravitasi Tentu; PSD = Taburan Saiz Butiran; K_r = Kerikil; P_r = Pasir; L_k = Lodak; L_g = Lempung; PL = Had plastik; LL = Had cecair; PI = Indeks keplastikan; I_w = Indeks tekstur luluhawa



RAJAH 2. Ilustrasi menunjukkan (a) Graf kelengkungan taburan saiz butiran sampel tanah; (b) Graf pecahan taburan butiran melawan saiz butiran tanah



Sumber Diubah suai daripada ASTM D2487 (2006)

RAJAH 3. Carta keplastikan tanah kohesif

<7% dikelaskan sebagai tanah kohesif berkeplastikan rendah, 7-17% sebagai tanah kohesif berkeplastikan sederhana, manakala tanah kohesif berkeplastikan tinggi dikelaskan apabila nilai $PI > 17\%$ (Prakash & Jain 2002; Roy & Bhalla 2017). Berdasarkan rajah, sampel tanah baki igneus dikelaskan sebagai tanah kohesif dengan kehadiran pasir halus berkeplastikan rendah-sederhana dengan nilai $PI < 20$ (ML) dengan julat $PL = 27.7\% - 40.53\%$; $LL = 40.0\% - 53.93\%$; $PI = 8.34\% - 14.56\%$. Sampel tanah baki sedimen menunjukkan unjuran keplastikan yang lebih luas dengan tahap keplastikan rendah hingga tinggi dengan julat PI antara 7.24-51.61 (ML, CL dan CH), selain julat $PL = 21.58\% - 40.71\%$; $LL = 38.95\% - 88.42\%$. Julat PI yang luas ini didorong oleh jenis litologi batuan asalan yang pelbagai seperti batu pasir, batu lumpur dan syal yang terluluhawa kepada pecahan saiz butiran yang bervariasi dalam tanah. Sampel baki tanah metamorf pula menunjukkan julat keplastikan yang lebih rendah dengan nilai antara 3.60-25.35 (ML - CL) namun lebih tinggi berbanding sampel tanah baki igneus dengan julat $PL = 19.21\% - 36.48\%$ dan $LL = 29.55\% - 61.83\%$. Berdasarkan Kaliakin (2017), nilai LL di bawah 50% adalah penunjuk sifat tanah berkeplastikan rendah.

Rajah 4 menunjukkan cirian morfometrik mineral lempung yang unik dan tersendiri yang ditemui dalam sampel tanah di Jalan Temiang-Pantai (M-1), Kalabakan (S-14), Lahad Datu (S-8) dan Kota Marudu (S-15). Rajah 4(a) merupakan morfologi mineral lempung kaolinit berbentuk platelet heksagonal yang nipis dengan perlapisan bertindan yang rapat dan padat (sampel M-1). Kewujudan mineral haloisit turut diperhatikan berdasarkan cirian morfologi tiub memanjang menandakan alterasi geotermal terhadap mineral silika-alumina. Mineral ilit pula membentuk morfologi kepingan berselirat yang halus dan bertindan secara berfilamen yang ditemui dalam sampel tanah S-14 (Rajah 4(b)). Morfologi permukaan mineral lempung vermikulit dan montmorilonit berbentuk serpihan mengelupas yang berserabut dengan masing-masing dijumpai di dalam sampel tanah baki sedimen S-15 dan S-8 (Rajah 4(c)-(d)).

PERBINCANGAN

Rajah 5 menunjukkan plot radar bagi sampel tanah mengikut kumpulan batuan induk. Berdasarkan rajah, sampel tanah baki igneus mengilustrasikan taburan jaringan radar yang lebih kecil membentuk poligon tidak sekata, berbanding sampel tanah baki yang lain. Sampel tanah baki sedimen membentuk jaringan radar yang lebih luas dengan perbezaan ketara dapat dilihat pada nilai L_g , LL dan PI . Perbezaan ini adalah bersandarkan kepada variasi saiz butiran dalam tanah dengan tanah dengan dominasi kandungan pasir dan lodak mempunyai keupayaan memegang zarah air yang sangat terhad, seterusnya mempengaruhi darjah keplastikan (Paniagua et al. 2013; Swart, Dippenaar & Rooy 2023). Kandungan butiran lempung yang tinggi disumbang oleh degradasi

batu lumpur, syal dan batu kapur terluluhawa dengan cirian yang pelbagai dan variasi ini bergantung kepada persekitaran pemendapannya. Peratus butiran pasir tidak menunjukkan perbezaan ketara bagi sampel tanah baki asalan batu granit, batu pasir dan kuarzit memandangkan ketahanan mineral kuarza terhadap luluhawa adalah tinggi (Wilson 2020). Butiran lodak dalam tanah juga adalah bersumberkan daripada mineral yang sama dengan degradasi batuan membentuk pecahan saiz butiran yang lebih halus ($0.002 \text{ mm} < L_k < 0.075 \text{ mm}$). Peratus kandungan pasir halus ($0.075 \text{ mm} < L_k < 0.425 \text{ mm}$) lebih tinggi dalam tanah baki metamorf berikutan komponen utama batuan metamorf seperti filit adalah kuarza berbutir sangat halus selain filosilikat (Garzón, Sánchez-Soto & Romero 2010). Selain itu, kandungan pasir yang tinggi dalam tanah baki metamorf juga adalah hasil luluhawa telerang kuarza yang wujud dalam batuan metasedimen bergred rendah seperti yang dilaporkan di Sabah (Rahim & Musta 2018; Roslee et al. 2020).

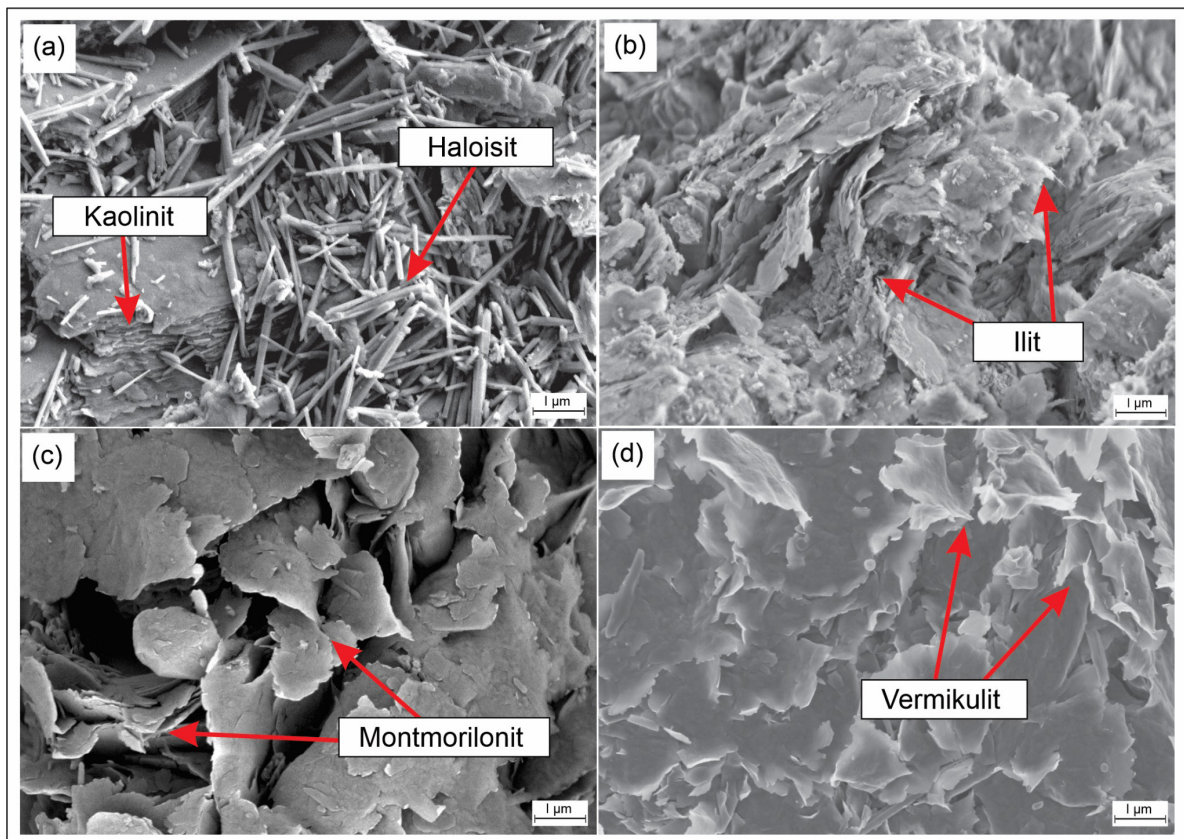
Kandungan butiran lempung adalah lebih tinggi dalam sampel tanah baki sedimen yang mempengaruhi perlakuan tanah. Butiran lempung membawa cas negatif elektrostatik negatif dan apabila terhidrat, ia menarik kation daripada larutan akueus yang terdapat dalam tanah dan menolak anion (Hillel 2008). Oleh sebab itu, tanah berlempung cenderung menunjukkan tingkah laku plastik, mula melekit apabila lembap, kemudian membentuk cecair likat dalam keadaan mula tepu air dan meretak apabila dalam keadaan kering. Keputusan kajian bagi sampel tanah baki melange yang bersifat keplastikan sederhana-tinggi adalah selari dengan hasil kajian Musta et al. (2019) dan Raj (2023). Kewujudan mineral montmorilonit berupaya menyerap air dengan kapasiti yang tinggi dan mendorong peningkatan nilai ketekalan tanah, selain keupayaan pengembangan-pengecutan ketara (Shah, Nazer & Harris 2022).

Rajah 6 menunjukkan hubungan antara indeks tekstur luluhawa (I_w) terhadap taburan saiz butiran. Peratus butiran pasir dan kerikil dilihat berkadar selari dengan nilai I_w , manakala peratus butiran lempung adalah berkadar songsang dengan nilai I_w . Menurut Raj (2023), semakin tinggi nilai I_w , semakin tinggi darjah luluhawa yang membezakan antara lapisan profil tanah. Ciri fizikal dan kimia tanah baki berbeza mengikut kedalaman disebabkan oleh tahap luluhawa yang berbeza (Faisal 2000; Huat, Ali & Choong 2006). Unjuran nilai I_w adalah rendah pada tanah baki igneus dan metamorf disebabkan oleh sifat batuan yang heterogen di persekitaran (Rahardjo et al. 2012). Zon heterogen dalam kebanyakan profil batuan terluluhawa boleh dirujuk sebagai zon saprolit yang terdiri daripada bahan tanah batuan luluhawa gred IV dan V secara dominan (Aydin 2006). Campuran tanah dengan tekstur batu yang masih dikenal pasti mencadangkan luluhawa fizikal menjadi faktor pengawal dominan terhadap proses degradasi batuan berbanding luluhawa kimia. Oleh yang demikian, kandungan butiran kerikil dan pasir kasar adalah lebih tinggi berbanding sampel tanah baki sedimen ($I_w < 0.40$). Sampel tanah baki dengan

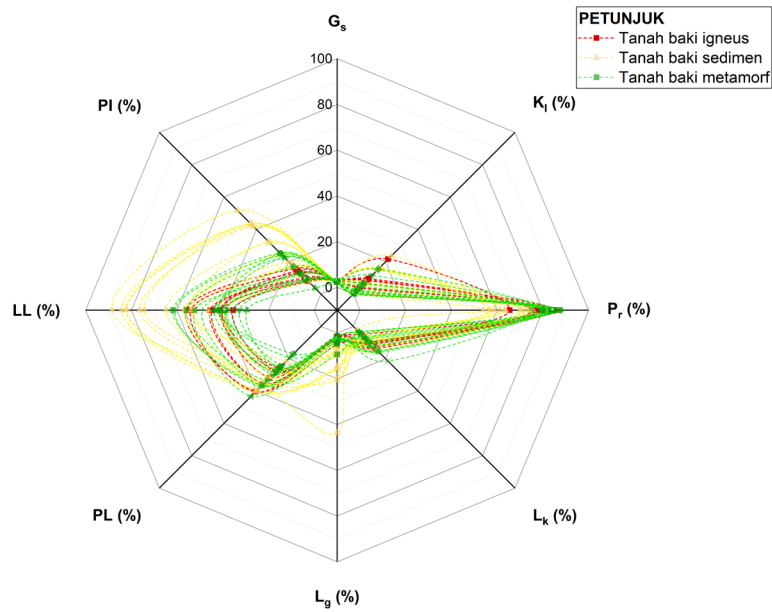
nilai $I_w > 0.50$ boleh dikelaskan sebagai tanah (Raj 2023). Kandungan mineralogi lempung seperti kaolinit dan ilit merupakan petunjuk akhir luluhawa mineral primer seperti muskovit dan feldspar (Azlan et al. 2017; Cesarano et al. 2018). Limpahan mineral ini terutamanya dalam tanah baki sedimen mencadangkan jasad batuan *in situ* telah mengalami proses luluhawa sepenuhnya yang membentuk tanah baki.

Secara umumnya, nilai luas permukaan khusus (SSA) dan kapasiti pertukaran kation (CEC) adalah berbeza bagi setiap mineral lempung berbeza (Jadual 5). Mineral lempung 1:1 seperti haloisit dan kaolinit cenderung didapati dalam tanah baki igneus dan metamorf yang bersifat asid, berbanding mineral lempung 2:1 seperti vermikulit dan montmorilonit yang ditemui di dalam tanah baki sedimen bersifat alkali. Nilai pH boleh dijadikan satu

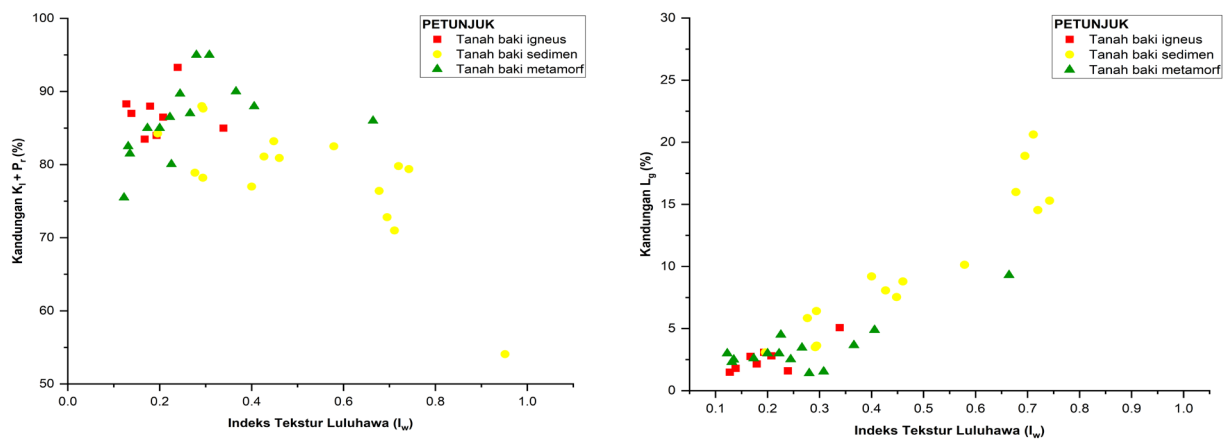
petunjuk untuk menentukan fenomena flokulasi-serakan dengan nilai pH rendah merujuk kecenderungan butiran tanah untuk berflokulasi, manakala nilai pH yang tinggi adalah penunjuk tanah untuk terserak (Ural 2018). Mineral kaolinit bersifat stabil dan kurang reaktif berbanding mineral lempung yang lain disebabkan strukturnya yang mengandungi plat silika tetrahedron dan alumina oktahedron yang kukuh. Mineral haloisit mempunyai struktur kimia yang sama seperti kaolinit namun dibezakan dengan tambahan molekul air antara lapisan plat yang meningkatkan tahap keplastikan tanah. Oleh sebab itu, kehadiran haloisit di samping mineral kaolinit mempunyai nilai LL dan PI yang sedikit tinggi berbanding tanah yang hanya mengandungi mineral kaolinit. Mineral lempung vermikulit dan montmorilonit mempunyai keupayaan pengembangan-pengecutan yang tinggi disebabkan oleh struktur uniknya yang mempunyai 1 lapisan oktahedron



RAJAH 4. Foto pengimejan mikro (SEM) menunjukkan morfologi mineral lempung (a) Kaolinit dan haloisit yang ditemui pada sampel tanah baki metamorf di Jalan Temiang-Pantai (Sampel M-1); (b) Morfologi mineral ilit dalam sampel tanah baki sedimen di Kalabakan, Sabah (Sampel s-14); (c) Morfologi mineral montmorilonit dalam sampel tanah baki sedimen di Lahad Datu, Sabah (Sampel s-8); dan (d) Morfologi mineral vermikulit dalam sampel tanah baki sedimen di Kota Marudu, Sabah (Sampel s-15)



RAJAH 5. Plot radar menunjukkan perbandingan sifat fizikal tanah mengikut jenis batuan induk



RAJAH 6. Graf menunjukkan hubungan antara I_w dan taburan butiran tanah (a) I_w melawan kandungan butiran kasar ($K_t + P_r$); dan (b) (a) I_w melawan kandungan butiran L_g

JADUAL 5. Nilai CEC dan SSA mengikut jenis mineral lempung

Kumpulan mineral	Mineral lempung	CEC (meq/100 g)	SSA (m ² /g)
1:1	Kaolinit	3-15	5-40
	Haloisit	40-50	1100*
2:1	Ilit	10-40	10-100
	Montmorilonit (smektit)	80-120	40-800
	Vermikulit	100-150	760*

Sumber Kumari & Mohan (2021)

CEC = Kapasiti Pertukaran Kation; SSA = Luas Permukaan Khusus

*Bergantung kepada pecahan dalaman SSA

antara 2 lapisan tetrahedron (Valášková & Martynková 2012). Ilit juga merupakan mineral lempung 2:1 tetapi dikelaskan sebagai mineral lempung tidak mengembang. Kapasiti penyerapan air dan pengecutan-pengembangan rendah daripada montmorilonit dan vermikulit tetapi lebih tinggi berbanding mineral kaolinit. Oleh sebab itu, kebanyakan sampel tanah baki sedimen mempunyai tahap ketekalan yang tinggi.

KESIMPULAN

Secara kesimpulannya, pembentukan tanah baki di Malaysia berdasarkan batuan induk mempunyai ciri berbeza berikutan sifat batuan yang heterogen di persekitaran. Antara faktor yang mempengaruhi sifat fizikal tanah ialah komposisi batuan induk, darjah luluhawa dan mineralogi lempung. Taburan saiz butiran menunjukkan unjuran butiran pasir yang berbeza mengikut jenis batuan. Butiran pasir kasar dilihat lebih signifikan dalam tanah baki igneus berbanding tanah baki sedimen yang mempunyai butiran pasir sederhana yang ketara. Manakala, tanah baki metamorf mempunyai peratus butiran pasir halus yang lebih tinggi. Jangkaan darjah luluhawa melalui nilai I_w mendapati peratus butiran pasir dan kerikil dilihat berkadar selari dengan nilai I_w , manakala peratus butiran lempung adalah berkadar songsang dengan nilai I_w yang membezakan lapisan profil tanah. Kehadiran mineral lempung mengembang (vermikulit dan montmorilonit) meningkatkan darjah ketekalan tanah disebabkan keupayaan penyerapan air dan pengembangan-pengecutan berdasarkan nilai SSA dan CEC yang tinggi, berbanding mineral lempung lain seperti kaolinit dan haloisit. Perbezaan yang paling signifikan dapat dilihat pada nilai L_g , LL dan PI yang lebih tinggi pada sampel tanah baki sedimen berbanding tanah baki lain.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM) di Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas pembiayaan penyelidikan ini melalui dana Geran Universiti Penyelidikan, GUP-2020-037.

RUJUKAN

- Abdullah, H., Rashidi, N.R.A. & Ariffin, M.Z. 2023. Relationship between shear strength and suction of granitic residual soil. *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology* 2: 75-79.
- Aitchison, J.C. 1994. Early Cretaceous (pre-Albian) Radiolarians from Blocks in Ayer Complex Melange, Eastern Sabah, Malaysia, with comments on their regional tectonic significance and the origins of enveloping Melanges. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences* 9(3): 255-262.
- Allagu, B. 1996. Sedimentologi dan stratigrafi batuan sedimen Miosen di Lembangan Malibau, Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 40: 177-195.
- Aloni, C. & Alexander, C.B. 2020. Environmental impact of weathering and soil formation in geomorphological research. *World Journal of Advanced Research and Reviews* 8(3): 47-51.
- Angraini, V., Isdaryanto, I., Illiayas, M.I.M. & Stephanie, E. 2022. Short-time effects on compressive strength of residual soils due to rainwater. *Journal of Material Science and Technology Research* 9: 87-96.
- Araujo, M.A., Zinn, Y.L. & Lal, R. 2017. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. *Geoderma* 300: 1-10.
- ASTM D7928-17. 2017. *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D4318-17e1. 2017. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D6913/D6913M-17. 2017. *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D854-14. 2014. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D2487. 2006. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aydin, A. 2006. Stability of Saprolitic slopes: Nature and role of field scale Heterogeneities. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6: 89-96.
- Azlan, N.N.N., Simon, N., Hussin, A., Roslee, R. & Ern, L.K. 2017. Pencirian sifat kimia bahan tanah pada cerun gagal di sepanjang jalan Ranau-Tambunan, Sabah, Malaysia. *Sains Malaysiana* 46(6): 867-877.
- Bakhsipour, Z., Asadi, A., Huat, B.B.K., Sridharan, A. & Kawasaki, S. 2016. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils. *Soils and Foundations* 56(6): 1008-1020.
- Batmalai, P., Mohd Nazer, N.S., Simon, N., Sulaiman, N., Umor, M.R. & Ghazali, M.A. 2023. Soil detachment rate of a rainfall-induced landslide soil. *Water* 15(12): 2149.
- Beemer, R.D., Bandini-Maeder, A., Shaw, J. & Cassidy, M.J. 2020. Volumetric particle size distribution and variable granular density soils. *Geotechnical Testing Journal* 43(2): 517-533.
- Bland, W. & Rolls, D. 1998. *Weathering*. London: Arnold.
- Blight, G.E. 2012. Origin and formation of residual soils. Dlm. *Mechanics of Residual Soils*. Edisi ke-2, disunting oleh Blight, G.E. & Leong, E.C. London: CRC Press.

- Bowles, J.E. 2012. *Engineering Properties of Soils and their Measurement*. Delhi: McGraw Hill New Education.
- Catoni, M., D'Amico, M.E., Zanini, E. & Bonifacio, E. 2016. Effect of pedogenic processes and formation factors on organic matter stabilization in alpine forest soils. *Geoderma* 263: 151-160.
- Cesarano, M., Bish, D.L., Cappelletti, P., Cavalcante, F., Belviso, C. & Fiore, S. 2018. Quantitative mineralogy of clay-rich siliciclastic landslide terrain of the Sorrento Peninsula, Italy, using a combined XRPD and XRF approach. *Clays and Clay Minerals* 66(4): 353-369.
- Chen, B., Mustafa, K.S. & Khoo, T.T. 2002. Dating the Kenny Hill Formation: Spores to the fore. *Warta Geologi* 28(5): 189-191.
- Chen, J., Li, F., Zhao, X., Wang, Y., Zhang, L., Feng, L., Liu, X., Yan, L. & Yu, L. 2023. The weathering process of carbonatite: Weathering time. *PeerJ* 11: e15793.
- Clennell, M.B. 1992. The Melanges of Sabah, Malaysia. Tesis Dr. Fal., University of London.
- Duarte, I.M.R. & Rodrigues, C.M.G. 2018. Residual soils. Dlm. *Encyclopedia of Engineering Geology*, disunting oleh Bobrowsky, P.T. & Marker, B. Cham: Springer.
- Erfen, H.F.W.S., Gansau, A.G. & Henry, W.A. 2016. Engineering properties of soil from unstable slopes in Ranau-Kundasang, Sabah, Malaysia. *Transactions on Science and Technology* 3(3): 495-500.
- Erfen, H.F.W.S., Musta, B., Gabda, D. & Asis, J. 2020. Correlation between physico-chemical properties and engineering properties of soil samples from Pinousuk gravel deposit of Mesilou, Kundasang, Sabah. *ASM Science Journal* 13: 1-7.
- Faisal, H.A. 2000. Unsaturated tropical residual soils and rainfall induced slope failures in Malaysia. Dlm. *Unsaturated Soils for Asia*, disunting oleh Raharjdo, H. London: CRC Press.
- Fernandes, A.M., Conceição, F.T., Spatti Junior, E.P., Sardinha, D.S. & Mortatti, J. 2016. Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO₂ consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in Southeastern Brazil. *Chemical Geology* 443: 54-66.
- Garzón, E., Sánchez-Soto, P.J. & Romero, E. 2010. Physical and geotechnical properties of clay phyllites. *Applied Clay Science* 48(3): 307-318.
- Gray, J.M., Bishop, T.F.A. & Wilson, B.R. 2015. Factors controlling soil organic carbon stocks with depth in Eastern Australia. *Soil Science Society of America Journal* 79(6): 1741-1751.
- Hillel, D. 2008. Soil physical attributes. *Soil in the Environment*. Massachusetts: Academic Press. hlm. 55-77.
- Ho, L.T. 1995. Some engineering geology characteristics of the Kenny Hill Formation, Kuala Lumpur. *Warta Geologi* 21(1): 9-11.
- Hoe, T.G. & Yuan, T.H. 2010. Iron Mineralisation, South Gunung Jerai, Kedah, Implications of Genesis. *Warta Geologi* 36(2): 112.
- Huat, B., Ali, F. & Choong, F. 2006. Effect of loading rate on the volume change behavior of unsaturated residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(6): 1527-1544.
- Huat, B.B.K., Toll, D.G. & Prasad, A. 2012. *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Ishak, M.F., Zolkepli, M.F. & Affendy, M. 2017. Tropical residual soil properties on slopes. *International Journal of Engineering Technology and Sciences* 8(1): 1-9.
- Jabatan Mineral dan Geosains. 1985. *Peta Geologi Semenanjung Malaysia*. Cetakan ke-8. Malaysia: Kementerian Sumber Asli dan Alam Sekitar.
- Jabatan Pertanian Sarawak (DOA). 2002. *Agricultural Statistics of Sarawak*. Sarawak, Malaysia: DOA.
- Jasin, B. & Harun, Z. 2011. Lower Carboniferous (Tournaisian) radiolarians from Peninsular Malaysia and their significance. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 57: 47-54.
- Júnior, E.P.S., da Conceição, F.T., Fernandes, A.M., Sardinha, D.d.S., Menegário, A.A. & Moruzzi, R.B. 2019. Chemical weathering rates of clastic sedimentary rocks from the Paraná Basin in the Paulista Peripheral Depression, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 96: 102369.
- Kaliakin, V.N. 2017. Example problems related to soil identification and classification. *Soil Mechanics*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann. hlm. 51-92.
- Khalid, N., Mukri, M. & Arshad, M.F. 2019. Geotechnical properties of Salak Tinggi residual soil-bentonite mixture as liner. *Journal of Mechanical Engineering* 16(3): 79-90.
- Kirk, H.J.C. 1962. The geology and mineral resources of Semporna Peninsular, North Borneo. *British Borneo Geology Survey Memoir*. hlm. 14.
- Kumari, N. & Mohan, C. 2021. Basics of clay minerals and their characteristic properties. Dlm. *Clay and Clay Minerals*, disunting oleh Nascimento, G.M.D. London: IntechOpen.
- Latib, F.W.M., Kasa, A. & Bachok, M.F. 2023. Geotechnical properties on residual soil of sedimentary rock. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* 30(3): 182-191.

- Liew, T.C. & Page, R.W. 1985. U-Pb zircon dating of granitoid plutons from the west coast province of Peninsular Malaysia. *Journal of Geological Society of London* 142: 515-526.
- Marto, A. & Yusoff, S.Y.M. 2017. Major soil type, soil classification, and soil maps. Dlm. *Soils of Malaysia*, disunting oleh Ashraf, M.A., Othman, R. & Ishak, C.F. Boca Raton: CRC Press.
- Mohamed, A., Rahman, A.H.A. & Ismail, M.S. 2015. Sedimentary facies of the west crocker formation North Kota Kinabalu-Tuaran Area, Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series* 660: 012004.
- Muda, J. & Tongkul, F. 2008. Geoheritage resources of the Baliajong River: Potential for geotourism development. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 54: 139-145.
- Musta, B., Erfen, H.F.S. & Tahir, S. 2008. Geochemical characterization of volcanic soils from Tawau, Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 54: 33-36.
- Musta, B., Asat, M.A., Ling, S.Y. & Saleh, H. 2022. Geophysical investigation and geochemical study of sediment along the coastal area in Kota Belud Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series* 2165: 012046.
- Musta, B., Erfen, H.F.W.S., Karim, A.S.R., Kim, K.W. & Kim, J.H. 2019. Physico-chemical properties and mineralogical identification of soils from Mélange in Beluran-Sandakan, Sabah, Malaysia. *Journal of Physics: Conference Series* 1358: 012073.
- Nazer, N.S.M., Shahin, A.M.K., Shah, A.S.N., Lai, G.T., Umor, M.R. & Ghazali, M.A. 2023. The prediction of landslide slip surface based on the correlation between relative density and dynamic cone penetration test. *Sains Malaysiana* 52(9): 2645-2655.
- Niu, X. 2019. Weathered granite soils. Dlm. *Geotechnical Engineering - Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, edited by Hemeda, S. & Ülker, M.B.C. London: IntechOpen.
- Paniagua, P., Ando, E., Silva, M., Emdal, A., Nordal, S. & Viggiani, G. 2013. Soil deformation around a penetrating cone in silt. *Geotechnique Letters* 3: 185-191.
- Peng, L.C., Leman, M.S., Hassan, K., Nasib, B.M. & Karim, R. 2004. *Stratigraphic Lexicon of Malaysia*. Kuala Lumpur: Geological Society of Malaysia.
- Prakash, S. & Jain, P.K. 2002. *Engineering Soil Testing*. Roorkee: Nem Chand & Bros.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E.C., Ng, Y.S. & Pang, H.T.C. 2012. Variability of residual soil properties. *Engineering Geology* 141-142: 124-140.
- Rahim, I.A. & Musta, B. 2018. The stability of metasedimentary rock in Ranau, Sabah, Malaysia. *Indonesian Journal on Geoscience* 5(1): 23-31.
- Rahman, Z.A. 1999. Structural pattern of the Crocker formation in southern part of Beaufort Area, Sabah. *Borneo Science* 6: 11-20.
- Raj, J.K. 2023. physical characterization of the weathering profile over a sheared, biotite-muscovite granite in Peninsular Malaysia. *Warta Geologi* 75: 25-36.
- Raj, J.K. 2018. Physical characterization of a deep weathering profile over rhyolite in humid tropical Peninsular Malaysia. *Geotechnical & Geological Engineering* 36: 3793-3809.
- Roslee, R., Piraha, J.A., Madria, A.N. & Zikiria, M.F. 2020. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for the Trusmadi Formation at Sabah, Malaysia. *Earth Sciences Malaysia* 4(1): 77-81.
- Roy, S. & Bhalla, S.K. 2017. Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. *Resources and Environment* 7(4): 103-109.
- Saffari, P., Nie, W., Md Noor, M.J., Zhang, X. & Liang, Q. 2019. Characterization the geotechnical properties of a Malaysian granitic residual soil grade V. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 289: 012006.
- Shah, A.S.N., Nazer, N.S.M. & Harris, M.I. 2022. Morfologi hakisan dan sifat serakan lempung Kaolinit dan Montmorilonit di kawasan tropika. *Sains Malaysiana* 51(12): 3879-3896.
- Sun, M., Yu, J., Wu, X., Ding, Y., Fu, T., Yang, Y. & Jiang, J. 2021. Mechanical behavior of weathered granite exposed to water. *Applied Sciences* 11: 10356.
- Sung, C.T.B., Ishak, C.F., Abdullah, R., Othman, R., Panhwar, Q.A. & Aziz, M.M.A. 2017. Soil properties (physical, chemical, biological, mechanical). Dlm. *Soils of Malaysia*, disunting oleh Ashraf, M.A., Othman, R. & Ishak, C.F. Boca Raton: CRC Press.
- Swart, D., Dippenaar, M.A. & Roo, J.L.V. 2023. Field tests for the identification of silts. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82: 425.
- Tahir, S., Siong, K.V., Musta, B. & Asis, J. 2017. Facies and sandstone characteristics of the Kudat Formation, Sabah, Malaysia. *Geological Behavior* 1(2): 20-25.
- Tan, B.K. 2004. Country case study: Engineering geology of tropical residual soils in Malaysia. Dlm. *Tropical Residual Soils Engineering*, disunting oleh Huat, B.B.K., Gue, S.S. & Faisal Hj. Ali. London: CRC Press.
- Tan, T., Huat, B.B.K., Anggraini, V. & Shukla, S.K. 2019. Improving the engineering behaviour of residual soil with fly ash and treated natural fibres in alkaline condition. *International Journal of Geotechnical Engineering* 15(3): 313-326.
- Thomas, P. 1966. *Soil Map of Sabah, East Malaysia*. Tuaran, Sabah: Pusat Penyelidikan Pertanian.
- Tjia, H.D. 1988. Accretion tectonics in Sabah: Kinabalu Suture and East Sabah accreted terrane. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 22: 237-251.

- Tongkul, F. 2006. The structural style of lower miocene sedimentary rocks, Kudat Peninsula, Sabah. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia* 49: 119-124.
- Ural, N. 2018. The importance of clay in geotechnical engineering. Dlm. *Mineralogy*, disunting oleh Zoveidavianpoor, M. London: IntechOpen.
- Valášková, M. & Martynková, G.S. 2012. Vermiculite: Structural properties and examples of the use. Dlm. *Clay Minerals in Nature - Their Characterization, Modification and Application*, disunting oleh Valášková, M. & Martynková, G.S. London: IntechOpen.
- Wan Zuhairi, W.Y. & Nurita, R. 2019. Assessment of heavy metal attenuation and mobility in compacted soil columns. *Sains Malaysiana* 48(11): 2463-2472.
- Wilson, M.J. 2020. Dissolution and formation of quartz in soil environments: A review. *Soil Science Annual* 71(2): 99-110.
- Yong, L.L., Emmanuel, E., Purwani, R. & Anggraini, V. 2019. Geotechnical assessment of Malaysian residual soils for utilization as clay liners in engineered landfills. *International Journal of GEOMATE* 16(58): 20-25.
- Yusof, Z.M., Al-Adhami, A.M.Y. & Matore, M.E.E.M. 2022. Compressive strength of stabilised granitic residual soil using mixture of pineapple fibre-hydrated lime. *Sustainability* 14(7): 3826.
- Zarime, N. & Yaacob, W.Z.W. 2019. Leaching behavior of cadmium through compacted granitic residual soil using column infiltration test. *E3S Web of Conferences* 101: 04002.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: shahidahnazer@ukm.edu.my