

Morfologi Hakisan dan Sifat Serakan Lempung Kaolinit dan Montmorilonit di Kawasan Tropika

(Erosion Morphology and Dispersive Properties of Kaolinite and Montmorillonite Clays in the Tropical Region)

AZLAN SHAH NERWAN SHAH, NOR SHAHIDAH MOHD NAZER* & MUHAMMAD ISHA HARRIS

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

Diserahkan: 15 Mac 2022/Diterima: 10 September 2022

ABSTRAK

Tanah terserak merupakan tanah bermasalah lantaran sifat semula jadinya yang mudah bertindak balas apabila terdapat kehadiran air lalu meningkatkan potensi hakisan cerun. Kewujudan ion natrium pada mineral lempung tanah melemahkan ikatan elektrokimia tanah terserak menyebabkan zarah lempung menolak dan menjauhi satu sama lain. Faktor ini mendorong pengasingan zarah tanah lalu membentuk fitur hakisan seperti ril dan galur rencam di permukaan bercerun, hakisan paip di dalam sub-permukaan landai dan kewujudan keruping merekah yang menjadi permasalahan dalam pembinaan struktur bangunan serta kejadian bencana alam. Kewujudan mineral lempung berbeza kapasiti pengembangan-pengecutan di kawasan tanah terserak menghasilkan morfologi dan sifat serakan tanah yang berbeza. Oleh itu, objektif kajian ini dijalankan adalah untuk mencirikan sifat fizikal tanah terserak tropika berdasarkan limpahan mineral lempung kaolinit dan montmorilonit serta hubungannya terhadap pembentukan morfologi hakisan cerun dan keruping tanah melalui pemerhatian lapangan dan analisis makmal. Hasil kajian mendapati kadar serakan dipengaruhi oleh sifat fizikal tanah seperti taburan saiz butiran, had cecair (LL), indeks keplastikan (PI), kandungan mineralogi lempung, nisbah % pasir/% zarah halus serta nisbah PI/LL. Analisis makmal menunjukkan tanah terserak dengan kehadiran mineral kaolinit dilihat kurang sensitif terhadap serakan berbanding mineral montmorilonit. Pemerhatian di lapangan mendapati tanah lempung kaolinit berasosiasi dengan pembentukan fitur hakisan ril dan galur rencam di sisi cerun secara lateral dan separa lateral, manakala tanah lempung montmorilonit tidak membentuk fitur hakisan yang nyata namun cenderung membentuk lapisan keruping dengan sistem jaringan rekahan heksagonal pada cerun bersudut hampir tegak ($\approx 80^\circ$). *Pencirian ini penting bagi meramal kewujudan* dan taburan tanah terserak tropika berdasarkan limpahan mineral lempung yang berupaya menjadi pencetus kepada mekanisme geo-bencana yang sinonim berlaku di Malaysia.

Kata kunci: Geo-bencana; kaolinit; montmorilonit; morfologi hakisan; sifat serakan

ABSTRACT

Dispersive soils are problematic soil due to its natural tendency to react quickly in the presence of water and increasing the risk of slope erosion. The presence of sodium ions on soil clay particles weakens the electrochemical bonds of the dispersed soil causing the clay particles to repel and migrate away from each other. This factor causes soil particles segregation and the formation of erosion features such as complex rills and gullies on a sloping surface, pipes in the soil's subsurface and the presence of cracks which cause problems in the construction of building structures and natural disasters. The presence of clay minerals with varying swelling-shrinkage capacities in the dispersed soil area results in a variety of soil morphology and properties. As a result, the objective of this study was to characterize the physical properties of tropical dispersive soil based on the abundance of kaolinite and montmorillonite clay minerals as well as their correlation to the formation of slope erosion morphology and soil crusting through field observations and laboratory analysis. The study discovered that physical soil properties such as particle size, liquid limit (LL), plasticity index (PI), clay mineralogy content, % sand/% fine soils ratio and PI/LL ratio influence dispersion rate. Laboratory analysis shows that dispersed soil containing kaolinite minerals is less sensitive to dispersion than soil containing montmorillonite minerals. Field observations showed that kaolinite clay soils form complex rills and gullies erosion

features on the lateral and semi-lateral slopes, whereas montmorillonite clay soils do not form significant erosion characteristics but do form crust layers with hexagonal cracking network systems on almost perpendicular angled slopes ($\approx 80^\circ$). This characterization is crucial for predicting the presence and distribution of tropical dispersive soils based on the abundance of clay minerals that can trigger geo-hazards mechanisms which are synonymous in Malaysia.

Keywords: Dispersive properties; erosion morphology; geo-hazards; kaolinite; montmorillonite

PENGENALAN

Tanah terserak dikenali dalam pelbagai terma seperti tanah sodik, tanah mudah terhakis dan tanah terkesangam (Abbaslou, Hadifard & Poorgohardi 2016; Page et al. 2020; Singh, Gahlot & Purohit 2018) merupakan tanah bermasalah dengan anggaran taburannya dilaporkan sekitar 1060.1 juta Ha di peringkat global (FAO 2020). Walaupun fenomena tanah terserak dianggap hanya berlaku di negara beriklim kering atau separa kering, banyak negara di seluruh dunia telah menghadapi masalah yang disebabkan fenomena ini (Hassanlourad et al. 2017; Premkumar et al. 2016). Dalam konteks negara beriklim tropika, tanah terserak telah dilaporkan di beberapa negara seperti Thailand, Indonesia dan Malaysia (Djarwadi 2007; Ismail, Mohamed & Mukri 2008; Patcharapreecha et al. 1990; Tran, Hoang & Dargusch 2015). Di Malaysia, beberapa pengkaji terdahulu telah melaporkan kewujudan tanah ini di beberapa kawasan di Batu Gajah, Wangsa Maju dan Shah Alam yang melibatkan tanah tinggi dengan kandungan zarah liat dan lempung (Ismail, Mohamed & Mukri 2008; Vakili et al. 2017).

Tanah ini amnya bersifat alkali dan mudah larut dalam air yang dipengaruhi oleh kehadiran ion natrium (Na^+) (Abbaslou, Hadifard & Ghanizadeh 2020; Sherard, Dunnigan & Decker 1976; Stumpf 2013). Kewujudan ion Na^+ dalam tanah adalah hasil luluhawa bahan induk, proses pedogenik (genesis tanah) dan antropogen (Levy & Shainberg 2005) dengan taburan tanah ini cenderung terbentuk di persekitaran alluvial lempung di kawasan cerun, enapan dasar tasik, enapan tanah longgar dan dataran banjir (Knodel 1991). Tanah lempung normal selalunya mengandungi cas negatif (anion) dan berupaya menarik ion bercas positif (kation) seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) secara elektrostatik lalu mendorong tanah untuk berflokulasi namun tidak terserak (Belarbi, Zadjoui & Bekkouche 2013). Sebaliknya, tanah terserak mengandungi ion Na^+ yang lebih tinggi menyebabkan ketebalan lapisan terserap berganda meningkat melalui proses pengurangan daya tolakan antara ion zarah lempung lalu menyebabkan butiran lempung menolak dan menjauhi antara satu sama lain. Keadaan ini mengakibatkan pemisahan zarah lempung dengan cepat lalu mengurangkan tarikan lekitan (Abbaslou, Hadifard & Poorgohardi 2016) dan

menggalakkan proses degradasi tanah (Sayehvand & Dehghani 2014), berbanding tanah lempung normal yang lebih rentan terhadap hakisan (Fell et al. 2013).

Oleh kerana sifat semula jadinya yang mudah terhakis, tanah terserak menimbulkan permasalahan serius meliputi sistem pengairan pertanian (Rengasamy 2018), kegagalan empangan (Richards & Reddy 2007), tanah runtuh (Fan 2017; Wang, Yuan & Wang 2020), pendasaran bangunan (Premkumar et al. 2016; Vakili et al. 2020) serta kawasan perlombongan (Vacher, Loch & Raine 2004) melibatkan kegagalan jenis paip (Robbins & Griffiths 2018; Wang, Yuan & Wang 2020) melalui cetusan hakisan dalaman oleh resapan air (Chang, Lee & Wu 2020). Tanah terserak juga cenderung untuk membentuk keruping dan jaringan rekahan yang berupaya menjadi penyumbang kepada mekanisme bencana banjir (Basga et al. 2018) melalui pengurangan ruang liang di permukaan tanah, seterusnya mempengaruhi kadar penyusupan, larian air permukaan, keupayaan galas dan kebolehtelapan (Ledesma 2016; Wei, Gao & Liu 2020).

Jabatan Industri Primer dan Air Tasmania (DPIW) (2009) telah menggariskan faktor iklim yang berasosiasi dengan kejadian serakan tanah iaitu: 1) cenderung berlaku di cerun sederhana curam ($>10\%$); 2) kawasan dengan jumlah hujan tahunan kurang daripada 650 mm; 3) Kawasan hujan bermusim dengan suhu musim panas yang tinggi; dan 4) pembentukan retakan berikutan proses pengeringan. Penyejatan air di permukaan tanah menyebabkan migrasi garam bersama air yang meningkatkan kandungan ion natrium selari dengan darjah serakan (Zhang et al. 2021). Tanah lempung adalah penunjuk terbaik bagi menentukan serakan tanah yang berasosiasi dengan hakisan air tanah dan pembentukan keruping di permukaan (Lipiec et al. 2018). Walau bagaimanapun, oleh kerana sifat uniknya, tanah terserak tidak dapat ditentukan oleh pencirian visual atau menggunakan ujian konvensional seperti analisis saiz butiran, analisis graviti tentu dan ujian keplastikan (Ksenija et al. 2018; Umesh, Dinesh & Sivapullaiah 2011) kerana kepelbagaian sifat tanah di lapangan (Page et al. 2020).

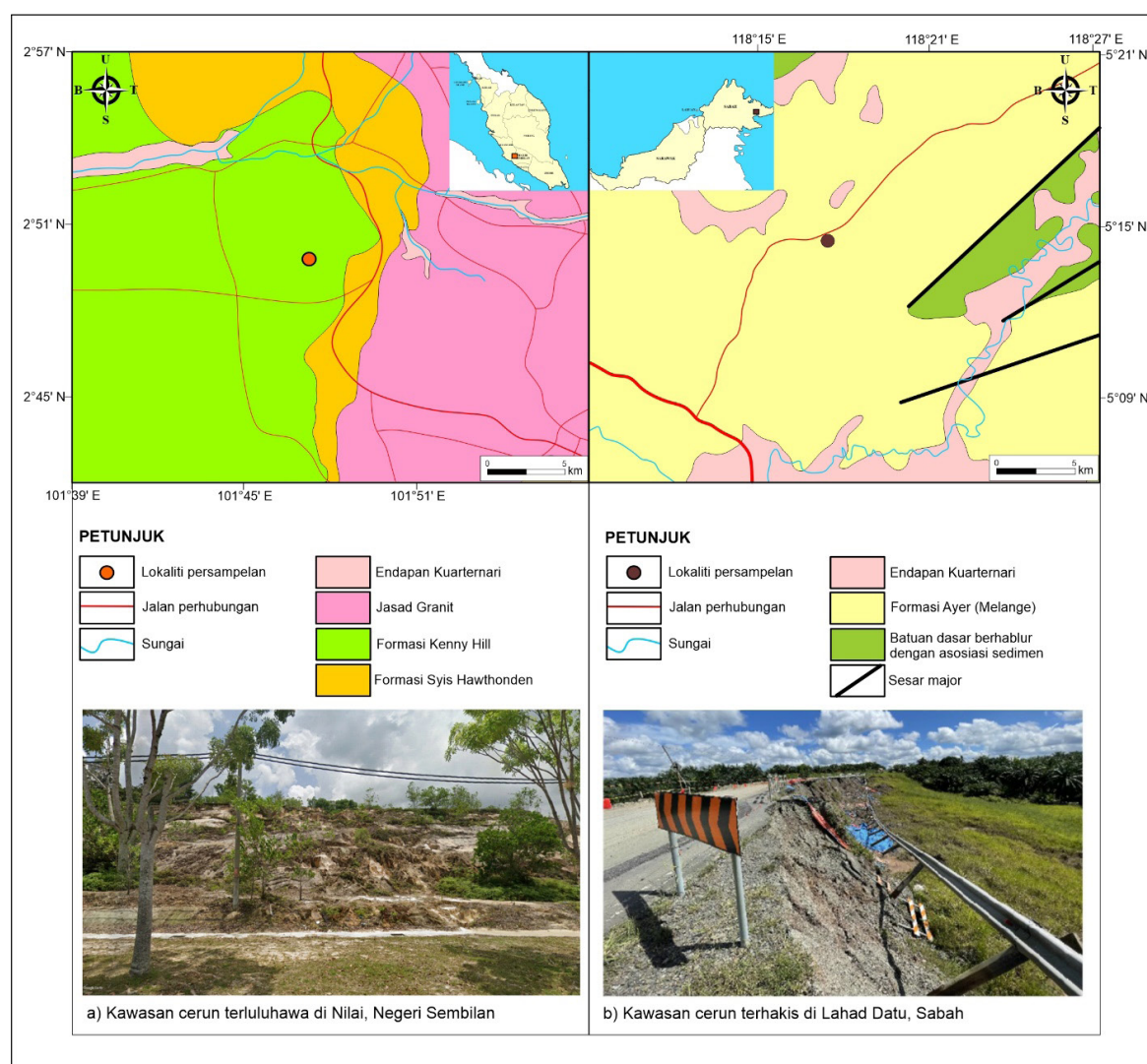
Kajian ekstensif telah dijalankan melibatkan pencirian dan penilaian tanah terserak (Dang et al. 2018; Ksenija et al. 2018; Maharaj & Paige-Green

2015; Masoodi et al. 2019; Sayehvand & Dehghani 2014; Umesh, Dinesh & Sivapullaiah 2011) dengan kebanyakan kajian mendapati tanah cenderung terserak dilimpahi oleh mineral lempung seperti montmorilonit dan ilit (Shihua et al. 2017). Walau bagaimanapun, kajian Abbaslou, Hadifard dan Ghanizadeh (2020) mendapati bahawa mineral lempung kaolinit turut berpotensi untuk terserak disebabkan oleh sifat kimianya seperti nilai keupayaan pertukaran kation (CEC) yang rendah. Justeru, objektif kajian ini dijalankan adalah untuk mencirikan sifat fizikal tanah terserak tropika berdasarkan limpahan mineral lempung kaolinit dan montmorilonit serta hubungannya terhadap pembentukan morfologi hakisan cerun dan keruping tanah di lapangan, berikutan unsur serakan lempung dan zarah tanah tidak padu menyumbang kepada proses pembentukannya yang mempengaruhi kestabilan cerun. Kajian berhubung fenomena tanah terserak tropika masih terhad di Malaysia. Kewujudannya dalam pelbagai persekitaran melibatkan tanah lekitan perlu diambil perhatian serius terutamanya

di kawasan beriklim tropika memandangkan kepesatan proses luluhawa menyumbang kepada limpahan mineral lempung dalam tanah baki. Tanah terserak berupaya menjadi pencetus kepada mekanisme geo-bencana seperti kejadian tanah runtuh dan banjir yang sinonim berlaku di Malaysia. Pencirian ini penting bagi meramal kewujudan dan taburan tanah bermasalah ini agar pihak berkepentingan dapat merangka kaedah mitigasi dan perancangan guna tanah yang lebih berkesan pada masa hadapan.

BAHAN DAN KAEDAH

Dalam kajian ini, dua (2) lokaliti tanah terserak telah dikenal pasti berdasarkan jenis batuan asalan dan pembentukan morfologi hakisan aktif seperti hakisan ril, galur serta keruping tanah di kawasan cerun terdedah di Nilai, Negeri Sembilan dan Lahad Datu, Sabah (Rajah 1). Pemilihan kawasan kajian dibuat berdasarkan kekerapan kejadian mendapan dan tanah runtuh,



RAJAH 1. Peta geologi kawasan kajian dan lokaliti persampelan tanah baki terganggu di Nilai, Negeri Sembilan dan Lahad Datu, Sabah

terutamanya melibatkan kawasan Lahad Datu-Sandakan yang disifatkan bermasalah oleh kerana kandungan lempung dengan kapasiti menjerap air dan keplastikan yang tinggi (Musta et al. 2019). Kawasan Nilai pula merupakan kawasan cerun terdedah terluluhawa yang mengalami proses hakisan fizikal aktif dan faktor ini menjadi penyumbang kepada isu kestabilan cerun (Mizal-Azzmi, Mohd-Noor & Jamaludin 2011). Kawasan persampelan tanah di Nilai didasari oleh Formasi Kenny Hill yang terdiri daripada unit batuan metamorf jenis filit dengan kehadiran struktur foliasi dan asosiasi telerang kuarza terluluhawa, di samping jasad batuan Granit, Formasi Kajang dan endapan kuarternari. Manakala kawasan persampelan di Lahad Datu terdiri daripada Formasi Ayer yang merupakan kompleks Melange yang dicirikan sebagai endapan sedimen klastik dengan blok batuan ofiolit pelbagai saiz (Aitchison 1994) selain singkapan batuan dasar berhablur dan endapan kuarternari. Sebanyak tujuh (7) sampel tanah baki terganggu diambil dan dilabel sebagai S1(T), S1(B), S2(T), S2(B), S3(T) dan S3(B) (Nilai, Negeri Sembilan) dan LDJ (Lahad Datu, Sabah) kemudian dihantar ke makmal bagi tujuan penentuan sifat fizikal, mineralogi dan penilaian kadar serakan.

PENENTUAN SIFAT FIZIKAL DAN MINERALOGI TANAH

Pencirian sifat fizikal tanah perlu dilakukan berikutan pengaruhnya terhadap fenomena serakan tanah berdasarkan jenis komposisi mineral lempung seperti peratusan kandungan zarah halus (liat dan lempung), nilai keplastikan tanah, keupayaan zarah lempung untuk menjerap air serta aktiviti lempung yang aktif. Sifat fizikal tanah diuji melalui analisis taburan saiz butiran (PSD) melalui kaedah ayakan dan hidrometer (ASTM D6913/D6913M-17/ASTM D7928-17), graviti tentu tanah (Gs) (ASTM D854-14: Kaedah A), had plastik (PL), had cecair (LL) serta indeks keplastikan (PI) (ASTM D4318-17e1). Manakala, penentuan komposisi mineral lempung dijalankan di Makmal Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi, UKM melalui analisis pembelauan sinar-X (XRD) menggunakan aplikasi DIFFRAC.EVA.

PENENTUAN SIFAT SERAKAN TANAH

Penentuan sifat serakan tanah dijalankan berdasarkan tiga (3) kaedah: *crumb* (ASTM D6572-20), *double hydrometer* (ASTM D4221-18) dan *pinhole dispersion* (ASTM D4647/4647M-13). Kaedah *crumb* melibatkan penyediaan spesimen tanah berbentuk bebola kemudian dimasukkan ke dalam air suling dan dibiarkan semalaman (24 jam). Tahap serakan dinilai berdasarkan keamatan

keruhan air berpandukan penunjuk yang dinyatakan dalam Jadual 1. Kaedah *double hydrometer* menyediakan penunjuk berhubung pencirian serakan tanah lempung dengan membandingkan jumlah zarah tanah lebih halus daripada 5 μm (yang diperoleh daripada analisis hidrometer). Prosedur analisis adalah berdasarkan ASTM D7928-17 tanpa penambahan agen penyerakan. Tahap serakan tanah dinilai melalui % serakan tanah berdasarkan persamaan (1) dan Jadual 1. Kaedah *pinhole dispersion* dijalankan ke atas tanah padu berdasarkan kadar aliran air, tahap keruhan efluen dan diameter lubang spesimen yang ditebuk (Jadual 1). Spesimen dipadatkan menggunakan alat pemadatan yang diubah suai hingga membentuk silinder (diameter=32 mm; panjang=38 mm). Spesimen kemudian dibiarkan selama semalaman (24 jam) untuk membenarkan homogenisasi. Alat *pinhole dispersion* dipasang dengan meletakkan pasir berbutiran kasar berukuran diameter 6 mm di bahagian atas. Skrin wayar dipasang bagi mengelakkan pasir menusuk spesimen yang diletakkan di bahagian bawah. Spesimen ditebuk dengan menggunakan jarum besi di bahagian tengah bagi membenarkan efluen lalu.

% Serakan =

$$\left(\frac{\% \text{ lebih halus daripada } 5 \mu\text{m} - \text{Tanpa agen penyerakan}}{\% \text{ lebih halus daripada } 5 \mu\text{m} - \text{Analisis ASTM D7928-17}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

ANALISIS SIFAT INDEKS FIZIKAL DAN MINERALOGI TANAH TERSERAK

Jadual 2 menunjukkan hasil keputusan sifat indeks fizikal dan mineralogi tanah kawasan kajian. Nilai Gs di kawasan kajian menunjukkan julat antara 2.50-2.61. Semua sampel dikelaskan sebagai tanah bertekstur pasir dengan nilai peratusan melebihi 90%, kecuali sampel tanah S1(B), S3(T), S3(B) dan LDJ yang dikelaskan sebagai tanah bertekstur pasir berlodak dan pasir berlempung berikutan kehadiran kandungan lodak dan lempung yang tinggi. Sampel menunjukkan kandungan butiran saiz pasir berjulat antara 65%-98%, kandungan lodak berjulat 1.7%-16.2% dan kandungan lempung berjulat 0.26%-21%. Sampel S2(T), S2(B), S3(T) dan S3(B) digredkan sebagai tanah isihan baik, manakala S1(T) dikelaskan sebagai tanah bergred isihan buruk yang ditentukan berdasarkan pekali keseragaman (Cu) dan pekali kelengkungan (Cc) pada graf kelengkungan (Rajah 2(a)).

Nilai PL tanah di kawasan kajian adalah berjulat 20.19%-33.88%, manakala LL berjulat 25.19%-75.16%.

Berdasarkan Rajah 2(b), nilai PI adalah berjulat 1.89%-41.28% dengan sampel LDJ disifatkan sebagai tanah lempung keplastikan tinggi, CH (>17%), sampel S1(T), S1(B), S2(T) dan S2(B) adalah keplastikan sederhana, ML (7-17%) dan sampel S3(T) dan S3(B) pula dikelaskan sebagai tanah berkeplastikan rendah, CL-ML (<7%) sepertimana penunjuk keplastikan yang dinyatakan oleh Prakash dan Jain (2002) dan Roy dan Bhalla (2017). Menurut Kaliakin (2017), nilai LL di bawah 50%

menunjukkan sifat tanah kurang keplastikan dengan nilai PI berjulat 7-17% dikelaskan sebagai tanah padu berkeplastikan sederhana. Aktiviti lempung sampel tanah S3(B), S3(T) dan S2(T) dikelaskan sebagai tidak aktif ($A < 0.75$), manakala sampel S1(T), S1(B) dan S2(B) dicirikan sebagai lempung normal ($0.75 < A < 1.25$). Sebaliknya, sampel LDJ menunjukkan nilai aktiviti lempung yang tinggi ($A > 1.25$) berdasarkan nisbah nilai PI dan pecahan % lempung (Rajah 2(c)).

JADUAL 1. Penunjuk serakan tanah

Ujian <i>Crumb</i>			Ujian <i>Double Hydrometer</i>			
Gred serakan	Pengkelasan	% serakan	Pengkelasan			
Gred 1	Tidak terserak	<30	Tidak terserak			
Gred 2	Sederhana terserak	30 - 50	Sederhana terserak			
Gred 3	Terserak	>50	Terserak			
Gred 4	Tinggi terserak					

Ujian <i>Pinhole Dispersion</i>						
Kadar serakan*	Tinggi Hidraulik (mm)	Masa (Minit)	Kadar aliran effluen (mL/s)	Darjah keruhan effluen		Saiz lubang spesimen (mm)
				Tepi	Atas	
KAEDAH A						
D1	50	5	1.0 – 1.4	Gelap	Sangat gelap	≥ 2
D2	50	10	1.0 – 1.4	Sederhana gelap	Gelap	> 1.5
ND4	50	10	0.8 – 1.0	Sedikit gelap	Sederhana gelap	≤ 1.5
ND3	180	5	1.4 – 2.7	Sedikit jernih	Sedikit gelap	≥ 1.5
	380	5	1.8 – 3.2			
ND2	1020	5	> 3.0	Jernih	Sedikit jernih	< 1.5
ND1	1020	5	≤ 3.0	Sangat jernih	Sangat jernih	1.0
KAEDAH B						
D	50	10	-	Sedikit gelap-gelap	Sangat gelap-sederhana gelap	≥ 1.5
SD	180 – 380	5	-	Sedikit jernih	Sedikit gelap	≥ 1.5
ND	380	5	-	Jernih	Sedikit jernih	< 1.5

*D1, D2, D – Terserak; ND4, ND3, SD – Sederhana hingga sedikit terserak; ND2, ND1, ND – Tidak terserak
 Sumber: ASTM D4221 – 18 (2018), ASTM D6572-20 (2020) dan ASTM D46474647–13 (2020)

JADUAL 2. Hasil keputusan sifat indeks fizikal tanah

Sampel	Gs*	Taburan Saiz Butiran				Tekstur Tanah (ASTM)	Had-Had Atterberg**			
		Pasir (%)	Lodak (%)	Lempung (%)	Gred tanah		PL (%)	LL (%)	PI (%)	A
S1 (T)	2.61	97	1.7	1.3	Buruk	Pasir	25.13	34.57	9.44	1.00
S1 (B)	2.61	82.60	16.2	1.2	-	Pasir berlodak	28.69	36.58	7.89	1.24
S2 (T)	2.60	96.8	1.8	1.4	Baik	Pasir	25.04	33.54	8.5	0.63
S2 (B)	2.50	98	1.74	0.26	Baik	Pasir	32.30	43.46	11.16	0.95
S3 (T)	2.59	92	6.1	1.9	Baik	Pasir berlodak	20.19	25.19	5.00	0.32
S3 (B)	2.62	90.5	8.5	1	Baik	Pasir Berlodak	24.38	26.27	1.89	0.20
LDJ	2.59	65	14	21	-	Pasir Berlempung	33.88	75.16	41.28	1.97

*Gs = Graviti Tentu; **PL = Had plastik; LL = Had cecair; PI = Indeks keplastikan; A= Aktiviti lempung

ANALISIS PEMBELAUAN SINAR-X (XRD)

Hasil keputusan XRD tanah di kawasan kajian diilustrasikan dalam Rajah 3. Berdasarkan keputusan, mineral kuarza adalah mineral yang dominan bagi semua sampel tanah. Sampel S1(T)–S3(B) mengandungi limpahan mineral lempung seperti kaolinit, sepiolit dan ilit, manakala hanya sampel S1(T) menunjukkan limpahan mineral montmorilonit dalam peratusan yang sangat minimum. Sampel S2(B) menunjukkan kehadiran limpahan mineral ferrisepiolit (Fe-sepiolit) manakala sampel LDJ menunjukkan limpahan mineral lempung montmorilonit yang tinggi selain kehadiran mineral albit, kaolinit, franconite dan aerenit.

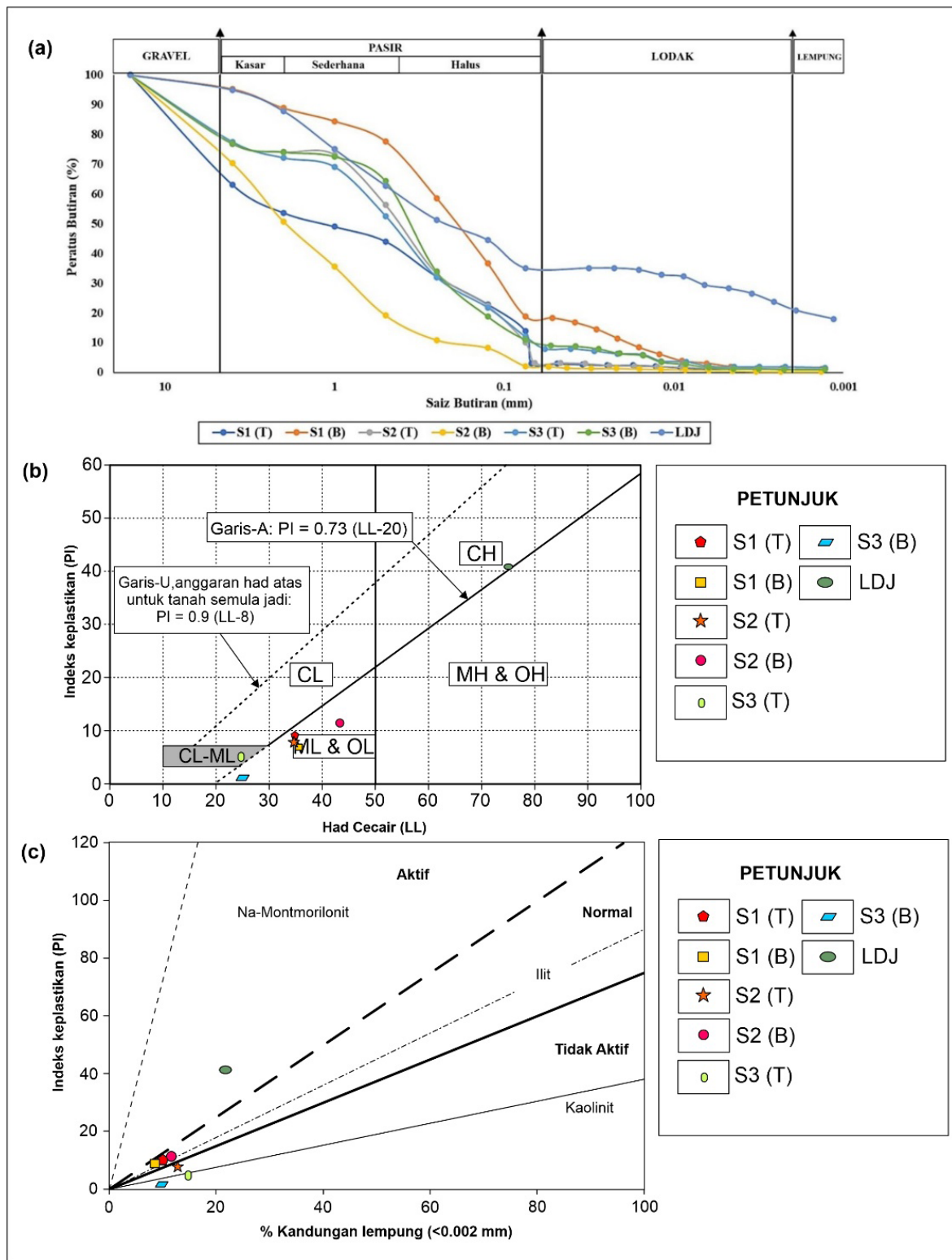
Limpahan mineral kuarza (mineral primer) didapati dalam semua sampel tanah, berikutan kerentanannya terhadap proses luluhawa di kawasan kajian. Walau bagaimanapun, komposisi mineral kuarza sampel tanah LDJ adalah lebih rendah, disebabkan oleh kandungan zarah lempung yang tinggi dalam tanah baki hasil luluhawa batuan induk (matriks lempung). Selain itu, tidak wujud perbezaan ketara dari segi corak keamatan graf XRD sampel tanah di kawasan Nilai, memandangkan persampelan dijalankan di satu jasad cerun yang sama pada ketinggian yang berbeza.

Menurut Shamsuddin (1981), pembentukan mineral lempung adalah dipengaruhi oleh kandungan silika dalam komposisi tanah, jenis dan kepekatan ion, pH dan keamatan larut resap. Kehadiran mineral lempung seperti ilit dan kaolinit adalah terhasil daripada proses

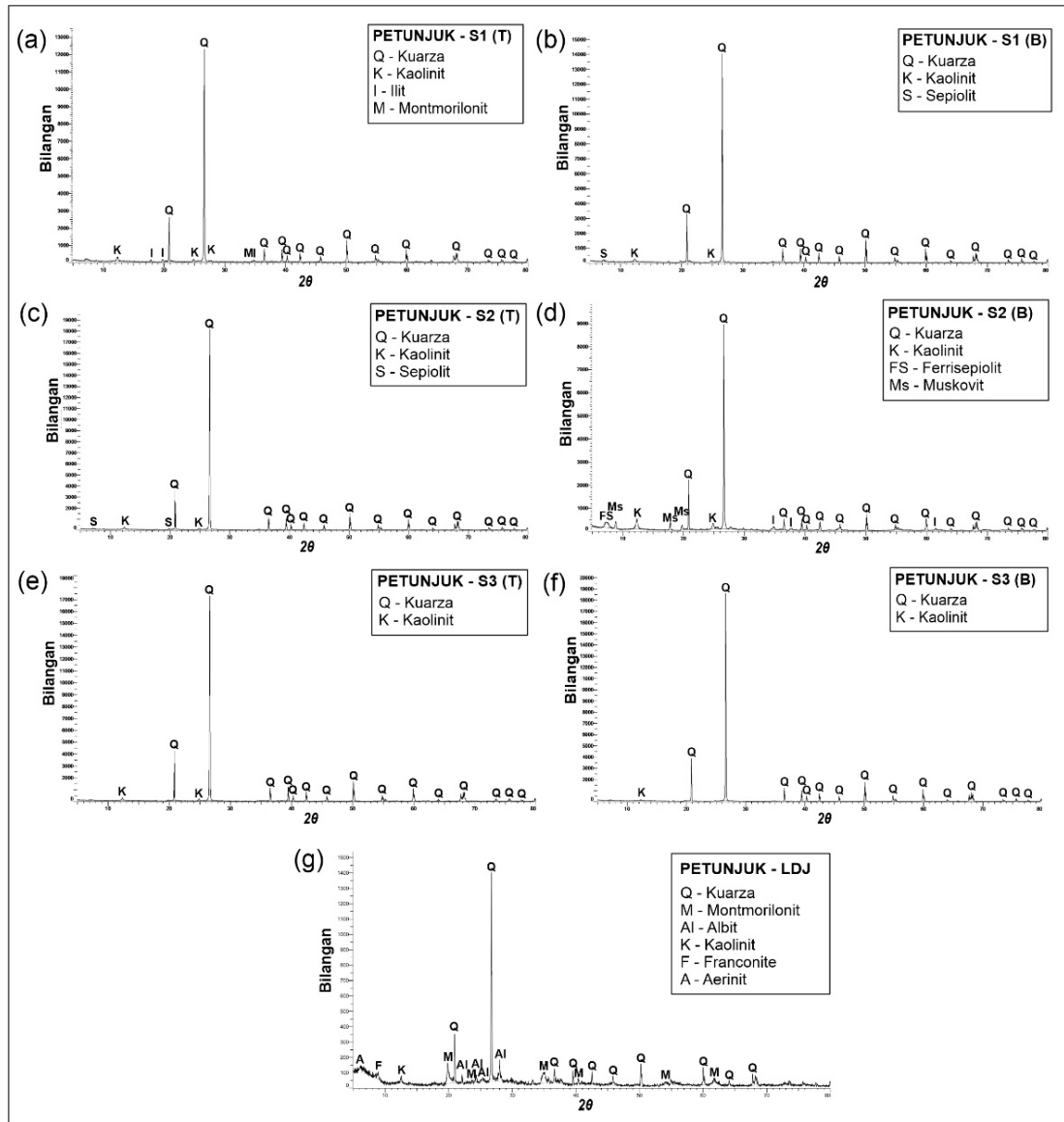
luluhawa ke atas mineral utama iaitu feldspar dan muskovit yang membentuk batuan dasar (Azlan et al. 2017). Mineral montmorilonit (kumpulan smektit) pula merupakan mineral filosilikat yang terhasil daripada aktiviti luluhawa batuan bentonit di samping limpahan mineral lain seperti kuarza kristal, kristobalit dan feldspar (Uddin 2018). Albit atau feldspar natrium-plagioklas merupakan mineral kaya natrium yang biasa ditemui sebagai mineral detrital (terhasil daripada pemecahan mekanikal batuan induk) dalam batu lumpur (Tournassat et al. 2015).

ANALISIS SIFAT SERAKAN TANAH

Jadual 3 menunjukkan hasil keputusan analisis sifat serakan tanah di kawasan kajian. Berdasarkan ujian *crumb* di lapangan, kesemua sampel tanah menunjukkan perubahan warna air suling selepas dibiarkan semalaman. Sampel LDJ menunjukkan reaksi paling signifikan dengan gred serakan tertinggi (Gred 4) berbanding sampel lain (Gred 2) (Rajah 4(a)-4(b)). Ujian *double hydrometer* menunjukkan hanya sampel LDJ dengan peratusan nilai serakan 61.45% dan dikelaskan sebagai tanah lempung terserak. Sampel tanah lain dikelaskan sebagai tidak terserak dengan nilai di bawah 30% (Rajah 5). Hal ini adalah rasional memandangkan sampel yang diuji mempunyai pecahan % saiz lempung (<0.005 mm) yang rendah. Menurut piawaian ASTM D4647/4647M – 13, tanah yang diuji perlu mempunyai % saiz lempung >12% dan nilai PI>4.



RAJAH 2. Ilustrasi menunjukkan (a) Graf kelengkungan taburan saiz butiran sampel tanah; (b) Carta keplastikan (Diubah suai daripada ASTM D2487 (2006)); (c) Graf aktiviti lempung (Diubah suai daripada Yang et al. (2009))



RAJAH 3. Keputusan analisis XRD bagi identifikasi mineralogi tanah

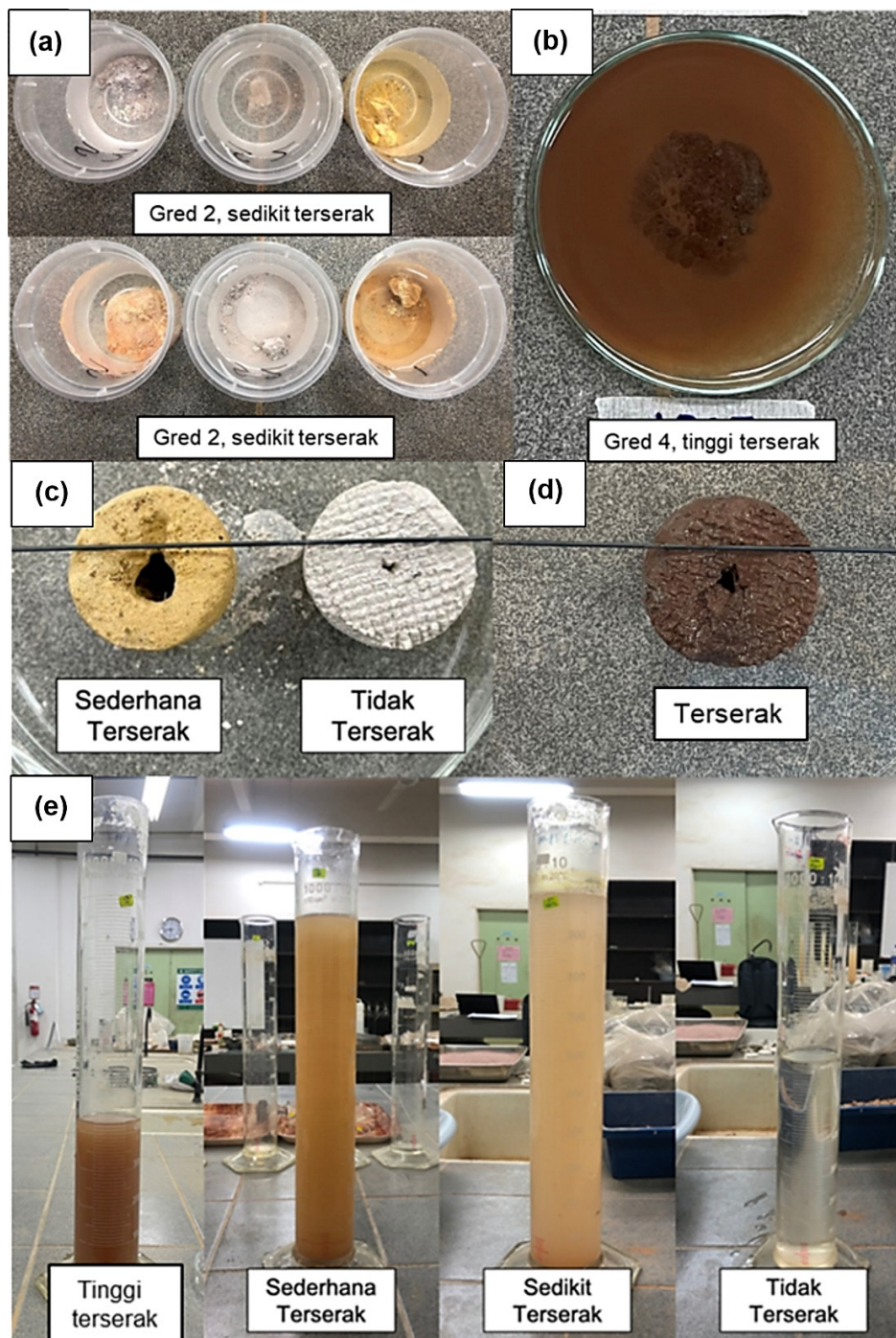
JADUAL 3. Hasil keputusan ujian sifat serakan tanah

Sampel	Ujian Crumb	Ujian Double Hydrometer			Ujian Pinhole Dispersion		
		% zarah halus D ≤ 5 µm (AP)*	% zarah halus D ≤ 5 µm (TAP)**	% serakan	Saiz diameter lubang (mm)	Kadar aliran effluen akhir (mL/s)	Tahap serakan
S1 (T)	Gred 2	0	9.3	0	≥ 2	2.33	ND4
S1 (B)	Gred 2	0	12.2	0	≥ 2	1.67	ND4
S2 (T)	Gred 2	0	15.5	0	≥ 2	2.33	SD
S2 (B)	Gred 2	0	28	0	<1.5	1.00	ND
S3 (T)	Gred 2	0	15.6	0	≥ 2	2.67	SD
S3 (B)	Gred 2	0.3	12.2	2.46	≥ 2	2.67	SD
LDJ	Gred 4	51	83	61.45	≥ 2	1.67	D1

*AP – agen penyerakan; **TAP – Tanpa agen penyerakan

Rajah 4(c)-4(e) menunjukkan sampel LDJ dikelaskan sebagai terserak (D1) berikutan warna efluen yang gelap pada 5 minit pertama ujian dengan saiz akhir lubang spesimen >2 mm pada kadar aliran efluen 1.67 mL/s. Sampel S1(T) dan S1(B) dikelaskan sebagai tanah sederhana terserak bergred (ND4) berdasarkan warna

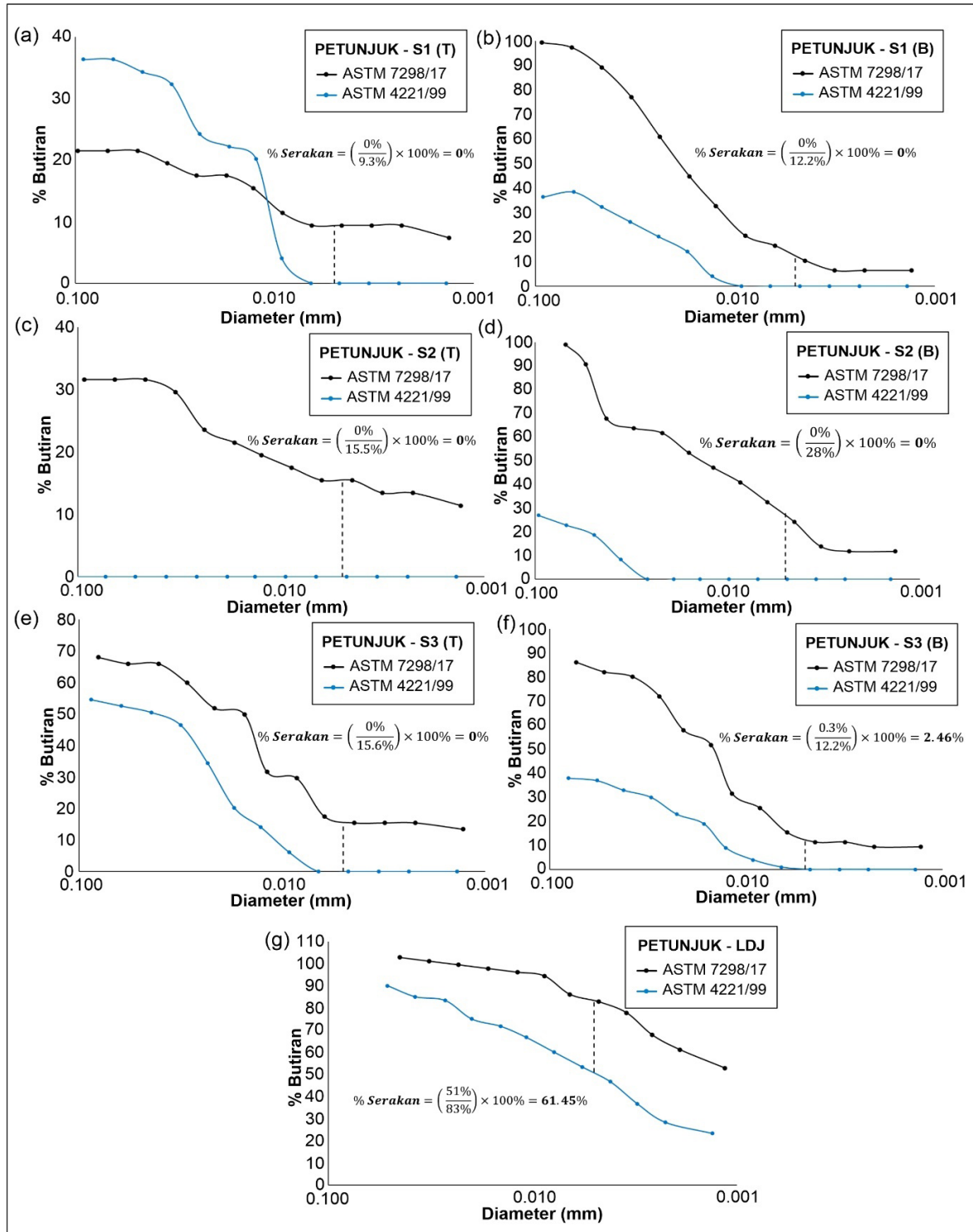
effluen yang sederhana gelap dengan saiz akhir lubang spesimen >2 mm dan kadar aliran efluen berjulat 1.67 mL/s–2.33 mL/s. Sampel S2(T), S3(T) dan S3(B) pula dikelaskan sebagai tanah sedikit terserak (SD) dengan perubahan warna efluen yang sedikit gelap, dengan saiz akhir lubang spesimen >2 mm dan kadar aliran



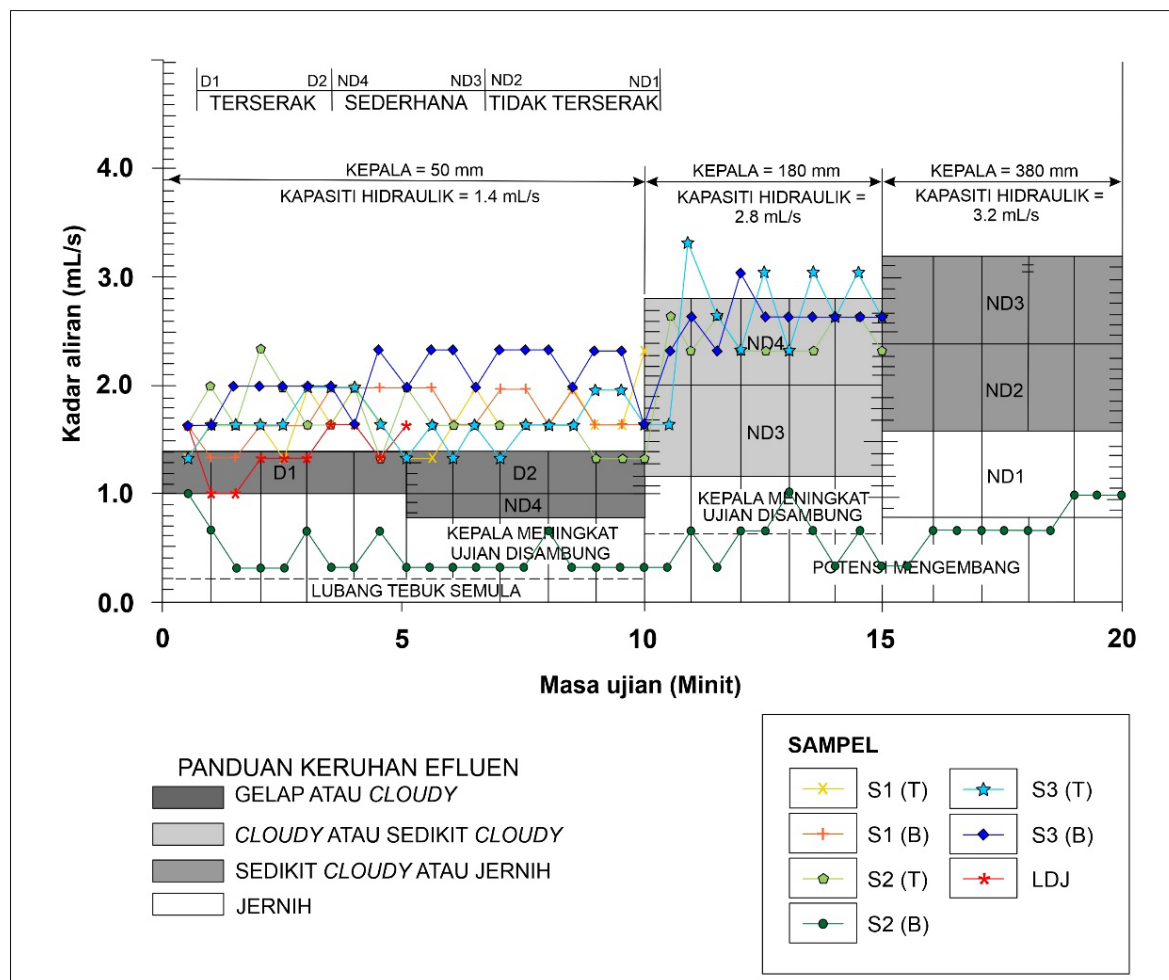
RAJAH 4. Fotograf menunjukkan: (a) Keputusan ujian *crumb* sampel S1(T) – S3(B) dengan sedikit keruhan (Gred 2, sedikit terserak); (b) Keputusan ujian *crumb* sampel LDJ menunjukkan keruhan air yang tinggi (Gred 4, tinggi terserak); (c) Saiz diameter akhir spesimen selepas ujian bagi sampel Nilai; (d) Saiz diameter akhir spesimen selepas ujian bagi sampel Lahad Datu; (e) Efluen akhir spesimen mengikut tahap serakan

effluen berjulat 2.33 mL/s–2.67 mL/s. Sampel S2(B) tidak menunjukkan tanda terserak (ND) apabila effluen yang keluar dari lubang spesimen adalah jernih dan perubahan diameter lubang spesimen akhir di bawah 1.5 mm. Sepertimana yang diilustrasikan dalam Rajah 6, saiz lubang spesimen adalah berkadar langsung

dengan kadar aliran effluen melawan durasi masa ujian dan semakin tinggi kadar effluen, semakin tinggi kadar hakisan. Tanah tinggi kandungan zarah lempung lebih cepat untuk terhakis berdasarkan perubahan signifikan warna effluen dan perbezaan diameter lubang spesimen berbanding diameter asal.



RAJAH 5. Hasil keputusan ujian double hydrometer sampel tanah terserak



RAJAH 6. Kadar aliran efluen melawan durasi ujian bagi menentukan tahap serakan tanah melalui ujian *pinhole dispersion*. Sumber: Diubah suai daripada ASTM D46474647-13 (2020)

PERBINCANGAN

HUBUNGAN SERAKAN TERHADAP SIFAT INDEKS FIZIKAL TANAH

Hasil kajian mendapati sifat fizikal seperti taburan saiz butiran, LL, PI, komposisi mineralogi lempung, nisbah % pasir/% zarah halus serta nisbah PI/LL tanah menyumbang kepada proses hakisan yang berasosiasi dengan fenomena serakan (Rajah 7(a) dan 7(b)). Berdasarkan Rajah 7(a), sampel LDJ (terserak) mengilustrasikan taburan jaringan radar yang lebih luas membentuk poligon tidak sekata. Manakala sampel dari kawasan cerun di Nilai membentuk jaringan radar yang lebih seragam, namun tidak wujud perbezaan bentuk jaringan yang ketara mengikut tahap serakan tanah. Nilai

nisbah % pasir/% zarah halus adalah berkadar langsung dengan tahap serakan tanah dengan nilai nisbah yang lebih tinggi adalah lebih sensitif terhadap serakan. Sebaliknya, nilai nisbah PI/LL menunjukkan pola berkadar songsang dengan tahap serakan (Rajah 7(b)). Nisbah % pasir/% zarah halus sampel LDJ adalah paling rendah iaitu 1.85 (terserak), manakala sampel S2(B) merekodkan nisbah tertinggi iaitu 49 (tidak terserak). Sampel lain (S1(T), S1(B), S2(T), S3(T) dan S3(B)) menunjukkan nilai nisbah konsisten berjalur 4.74-32.33 (sedikit terserak–sederhana terserak). Kandungan zarah halus yang lebih tinggi mendorong butiran zarah tanah untuk terpisah dan larut di dalam air tidak berion.

Menurut Nagy et al. (2016), kebanyakan tanah terserak tipikal mempunyai nilai indeks keplastikan berjalur sederhana dan tinggi. Berdasarkan hasil kajian

(Rajah 7), nisbah PI/LL sampel LDJ (keplastikan tinggi) mencatatkan nilai tertinggi iaitu 0.55 berbanding sampel lain (kecuali sampel S3(B)) dengan nisbah seragam ber julat 0.20-0.27. Sampel S3(B) pula mencatatkan nilai nisbah PI/LL terendah (0.07). Perbezaan nilai nisbah PI/LL berkemungkinan dipengaruhi oleh % butiran kasar yang mengurangkan daya tarikan padu yang mengikat zarah tanah. Hal ini mencadangkan tanah berkeplastikan tinggi cenderung untuk menunjukkan sifat serakan yang signifikan, disebabkan kehadiran limpahan mineral lempung aktif (montmorilonit). Mineral montmorilonit (kumpulan smektit) memiliki keupayaan untuk menyerap kelembapan lalu mengembang untuk mengisi retakan dan pori makro, mengakibatkan kekonduksian hidraulik yang terhad seterusnya menggalakkan serakan tanah berlaku (Ulery 2005). Selain itu, lempung montmorilonit juga mempunyai ikatan antara lapisan yang lemah dan potensi mengembang dan mengecut yang tinggi (Heshmati et al. 2013).

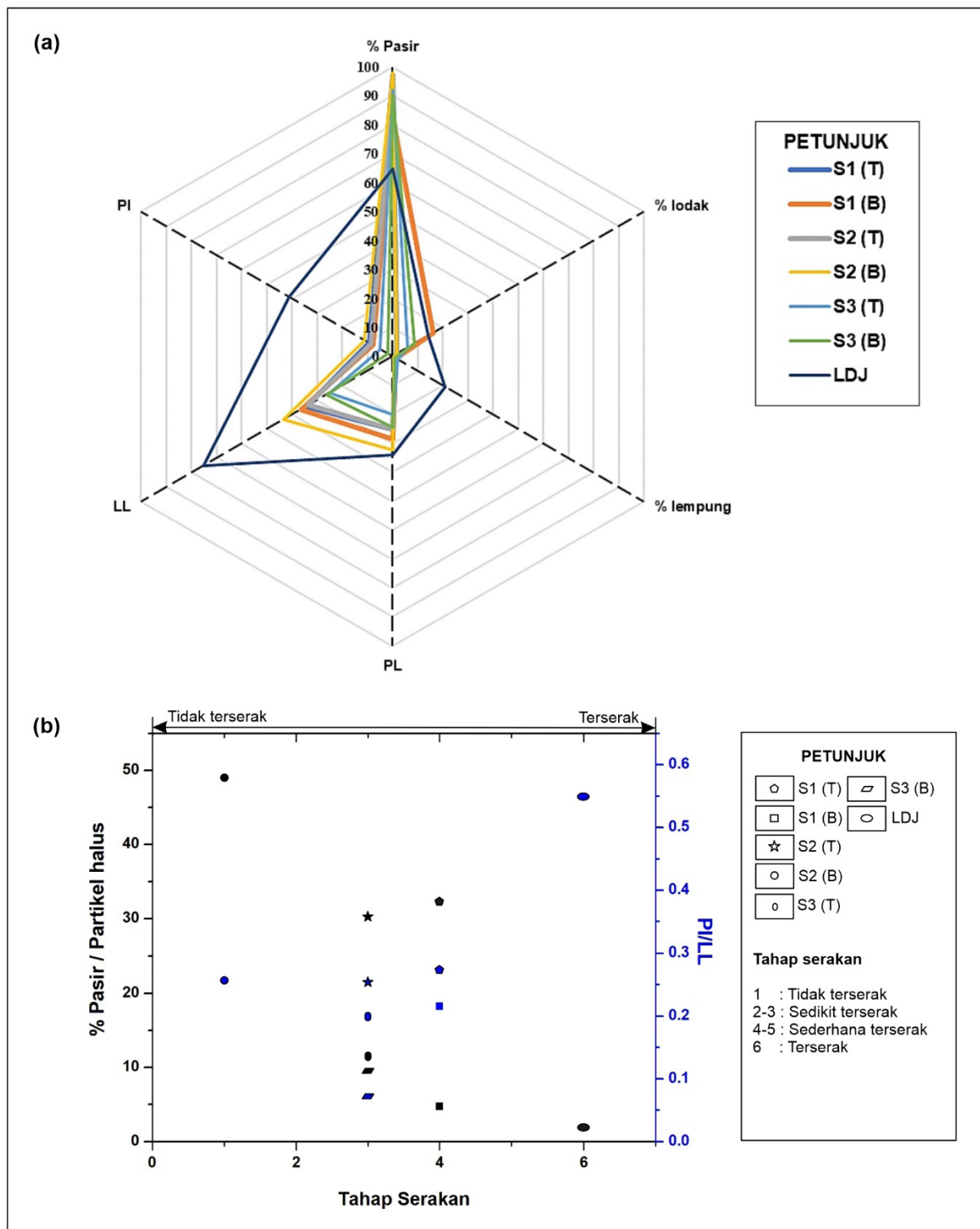
Taburan saiz tanah ber julat 0.06-2.00 mm dan isihan butiran yang buruk adalah paling mudah untuk terasing (Dinh et al. 2021) dengan julat saiz butiran yang paling mudah terhakis ialah 0.25-0.5 mm, diikuti oleh 0.2-0.25 mm (Zhao et al. 2011). Walau bagaimanapun, kajian mendapati tanah bergred baik (sampel tanah S2(T), S2(B), S3(T) dan S3(B)) turut memperlihatkan ciri-ciri hakisan yang nyata dan keadaan ini bercanggah dengan kajian Dinh et al. (2021). Ia berkemungkinan dipengaruhi oleh faktor lain seperti nilai LL dan PI yang rendah. Menurut Khoirullah et al. (2019), PI mempunyai hubungan korelasi yang kuat dengan faktor hakisan dan tanah yang menunjukkan fenomena terserak mempunyai nilai PI yang lebih rendah. Penyataan ini disokong oleh Abbaslou, Hadifard dan Ghanizadeh (2020) melalui kajiannya yang mendapati tanah dengan nilai PI dan keupayaan pertukaran kation (CEC) yang lebih tinggi kurang sensitif terhadap serakan. Kandungan lempung yang lebih rendah menyebabkan daya lekitan yang kurang menyebabkan kekuatannya untuk memegang zarah pasir berkurang lalu meningkatkan potensi hakisan.

HUBUNGAN SERAKAN TERHADAP MINERALOGI LEMPUNG TANAH

Proses fiziko-kimia tanah terserak turut dipengaruhi oleh jenis mineral tanah dan sifat kimia cecair liang tanah (Penner & Lagaly 2001; Savaş 2016). Berdasarkan hasil kajian, limpahan mineral montmorilonit dalam sampel tanah LDJ menyumbang kepada fenomena serakan yang lebih signifikan berbanding sampel lain yang dilipahi mineral lempung jenis kaolinit, sepiolit dan

ilit. Komposisi mineral yang berbeza di kawasan kajian adalah disebabkan oleh perbezaan litologi batuan induk. Tanah baki di kawasan Nilai adalah hasil luluhawa batuan metamorf dengan komponen pentingnya adalah filosilikat dan kuarza berbutir sangat halus (Garzón, Sánchez-Soto & Romero 2010). Tanah baki di Lahad Datu pula adalah hasil luluhawa blok batuan ofiolit pelbagai saiz yang terbenam di dalam matriks lumpur yang menyumbang kepada kandungan komposisi mineral lempung (Musta et al. 2019). Kandungan peratus zarah lempung sampel tanah baki di Lahad Datu yang tinggi (21%) mempengaruhi komposisi mineral lempung dan kecenderungannya untuk terserak, berbanding tanah baki di Nilai yang sangat minimum dengan julat 0.26%-1.9%. Tanah yang mengandungi mineral lempung montmorilonit dan ilit cenderung untuk berlakunya penyerakan lalu menghakis tanah berbanding tanah yang didominasi oleh mineral lempung jenis kaolinit. Umumnya, mineral montmorilonit dan ilit dikelaskan dalam mineral jenis 2:1 dengan air berupaya untuk menerobos masuk di antara lapisan dan menghasilkan perubahan isi padu yang ekstensif, di samping melemahkan ikatan antara struktur tanah yang asalnya beragregat ataupun bergumpal lalu mengubah orientasi susunan struktur kepada tidak bergumpal. Kaolinit sebaliknya tergolong di dalam mineral lempung tidak aktif jenis 1:1 dengan oksigen di dalam tetrahedron silikon dan OH-oksida di dalam oktahedron aluminium oksida bergabung membentuk ikatan hidrogen. Lapisan kristalnya adalah kukuh dan stabil serta kekisi yang tidak boleh dikembangkan selain tidak mempunyai keupayaan untuk terserak dan mengecut (Bougeard, Smirnov & Geidel 2000; Brigatti, Galan & Theng 2006). Mineral lempung ilit dan montmorilonit pula bersifat tidak stabil dan kehadiran air mampu mengubah struktur tanah melalui penambahan isi padu liang pori walaupun dengan limpahan peratusan yang sedikit di dalam tanah.

Kehadiran mineral seperti albit (sampel tanah Lahad Datu) dan sepiolit (sampel tanah Nilai) juga turut menyumbang kepada sifat penyerakan tanah. Albit merupakan mineral feldspar natrium-plagioklas yang menjadi penampan kepekatan ion Na^+ dan K^+ dalam tanah (Tournassat et al. 2015). Menurut Wang, Yuan dan Wang (2020), mineral albit dalam tanah terserak mengalami proses hidrolisis dan pengkarbonan dengan ion Na^+ dan K^+ dalam mineral garam berhijrah bersama air untuk menguraikan mineral primer dan sekunder kepada mineral tanah lempung. Proses ini akan membebaskan sejumlah besar ion Na^+ dan K^+ lalu meningkatkan tahap kealkalian tanah. Kajian Abbaslou,



RAJAH 7. Rajah menunjukkan (a) Hubungan sifat fizikal tanah terhadap serakan tanah; (b) Perkaitan nisbah % Pasir/ % Zarah halus dan nisbah PI/LL terhadap terhadap serakan tanah

Hadifard dan Ghanizadeh (2020) pula mendapati tanah didominasi oleh mineral sepiolit cenderung untuk terserak disebabkan oleh nilai CEC yang rendah dan luas muka khusus tertentu yang tinggi. Mineral lempung yang mempunyai luas permukaan khusus yang tinggi seperti montmorilonit dan sepiolit memiliki daya kereaktifan yang tinggi (Kumari & Mohan 2021), lalu meningkatkan potensi tekanan pengembangan (Yong, Nakano & Pusch 2012).

HUBUNGAN SERAKAN TANAH TERHADAP MORFOLOGI HAKISAN CERUN

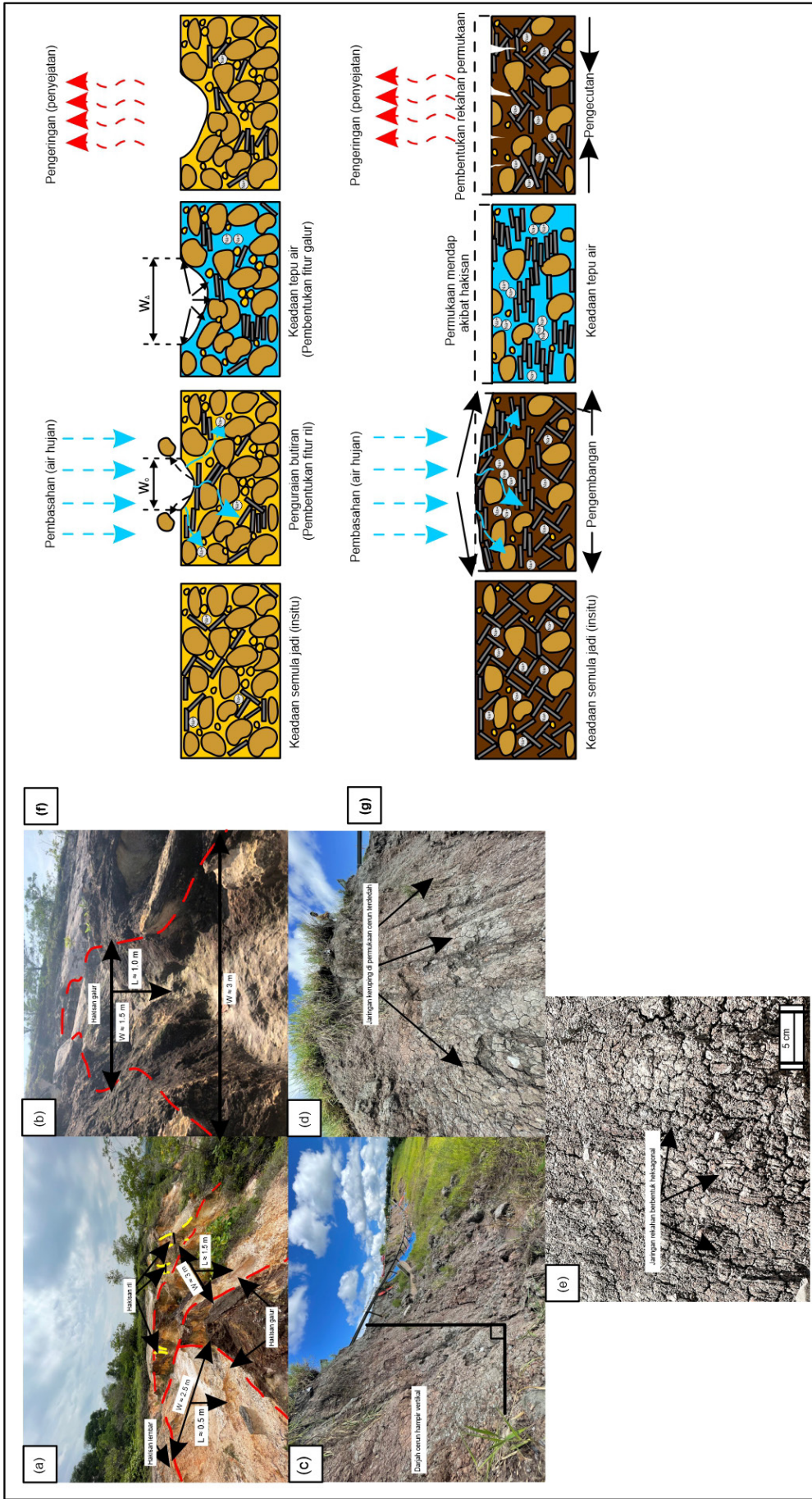
Pembentukan fitur hakisan tanah terserak adalah berkaitan dengan kewujudan zon tinggi hakisan pada tanah lempung berkerintangan rendah (Ismail, Mohamed & Mukri 2008) yang dipengaruhi oleh kecerunan cerun, panjang dan penutup permukaan (Zund 2017). Darjah serakan adalah berkait rapat dengan kedalaman profil tanah: semakin dalam profil tanah, semakin rendah darjah serakan (Bao, Wang & Bao 2013) berikutan pengurangan saiz butiran halus tanah (Zare-Junaghani, Mehrnahad & Torabikaveh 2019). Berdasarkan keputusan ujian serakan, tanah di kawasan kajian di Nilai, Negeri Sembilan tidak menunjukkan sifat serakan yang signifikan, berkemungkinan dipengaruhi oleh variasi gred luhulawa yang tidak konsisten.

Struktur hakisan ril dan galur rencam dilihat terbentuk secara lateral dan separa lateral di lapangan. Kandungan agen serakan berupaya mencetuskan interaksi antara tanah dengan air larian melalui daya graviti. Struktur ril dilihat terbentuk dengan kelebaran berjalat 0.1 m-0.3 m dengan kedalaman sehingga 0.3 m, manakala lebar struktur galur berjalat 1 m-3 m dengan kedalaman mencapai sehingga 1 m (Rajah 8(a)-8(b)). Fitur hakisan ril biasanya bersaiz lebih kecil berbanding galur dengan ril mempunyai kelebaran berjalat 0.05-0.3 m dan kedalaman sehingga 0.3 m (Knighton 1998). Apabila kelebaran hakisan melebihi 0.3 m, struktur yang terbentuk dikelaskan sebagai galur yang boleh mencapai kedalaman sehingga 30 m (Charlton 2008; Poesen et al. 2002). Struktur hakisan ril dan galur tidak kelihatan di Lahad Datu, Sabah berikutan kandungan % zarah lempung yang tinggi. Tanah berlempung berkeplastikan tinggi mempunyai kapasiti memegang air yang baik dijana oleh daya lekitan antara zarah. Daya lekitan yang tinggi membolehkan zarah tanah

kasar dan halus untuk terikat antara satu sama lain, lalu mengurangkan keupayaan struktur hakisan berlaku. Walau bagaimanapun, fenomena serakan menyebabkan darjah cerun menjadi lebih curam dan hampir menegak yang dijana oleh pembentukan jaringan rekahan di permukaan (Rajah 8(c)). Berdasarkan Rajah 8(d)-8(e), keruping ekstrem terbentuk di permukaan cerun hampir menegak ($\approx 80^\circ$) dengan segmentasi heksagonal dengan ukuran lebar rekahan adalah berjalat 0.2 cm-1 cm. Keruping tanah tidak terbentuk di kawasan cerun di Nilai, Negeri Sembilan berikutan kandungan zarah halus yang rendah (kurang lekitan).

Mekanisme pembentukan fitur hakisan dan morfologi jaringan rekahan diilustrasikan di dalam Rajah 8(f)-8(g). Impak air hujan (proses pembasahan) melalui proses penyusupan mendorong penguraian zarah tanah kasar (pasir) lalu membentuk aluran hakisan ril. Berdasarkan sampel tanah di Nilai, fitur serakan tanah adalah lebih kompleks dan rencam berikutan interaksi lempung sodik minor terhadap butiran tanah kasar dominan. Keadaan ini menyebabkan daya ikatan antara butiran tanah halus-halus dan kasar-halus melemah di sepanjang alur ril dan mencapah ke sisi disebabkan kadar keterlarutan di dalam air oleh lempung sodik yang tinggi. Pertambahan kadar geseran yang tinggi oleh butiran kasar akhirnya membentuk struktur galur di kawasan separa lateral.

Menurut Taha dan Taha (2011), tanah berbutiran halus mudah terdedah dengan perubahan isi padu melalui proses pengembangan-pengecutan lalu mengakibatkan retakan berlaku. Fitur retakan secara tidak langsung meningkatkan kadar penyusupan lalu meningkatkan potensi pengangkutan bahan tanah oleh agen hakisan (air). Berdasarkan fitur serakan sampel Lahad Datu, sistem rekahan yang terbentuk daripada retakan tanah membentuk keruping bersegmen di permukaan apabila kehilangan air liang berlaku. Apabila terdapat kehadiran air, tindak balas ion Na^+ mendominasi kation lain (Ca^{2+} dan Mg^{2+}) menyebabkan keupayaan menyamaratakan cas negatif koloid tanah menurun sekali gus merendahkan kestabilan tanah. Memandangkan mineral montmorilonit mempunyai keupayaan pengembangan dan pengecutan yang sedia tinggi, kehadiran ion natrium mengubah geometri rekahan kepada heksagonal bersegmentasi tinggi berbanding heksagonal bersegmentasi rendah pada lempung montmorilonit tanpa kehadiran ion Na^+ .



RAJAH 8. Fotograf menunjukkan (a) Pembentukan fitur hakisan ril dan galur rencam secara lateral dan separa lateral; (b) Pembentukan hakisan galur secara separa menegak; (c) Darjah kecerunan hampir menegak disebabkan oleh fenomena serakan; (d) Pembentukan lapisan keruping merekah dipermukaan cerun hampir tegak; (e) Segmentasi rekahan berbentuk heksagonal dengan lebar mencapai 1 cm; (f) Mekanisma pembentukan hakisan ril dan galur rencam; (g) Mekanisme pembentukan lapisan keruping dengan jaringan rekahan heksagonal

KESIMPULAN

Secara kesimpulannya, kadar serakan tanah tropika dipengaruhi oleh sifat fizikal tanah seperti saiz butiran, had cecair (LL), indeks keplastikan (PI), komposisi mineralogi lempung, nisbah % pasir/% zarah halus dan nisbah PI/LL. Komposisi mineral lempung dengan kapasiti pengecutan-pengembangan yang tinggi meningkatkan kecenderungan tanah tropika untuk terserak melalui penjerapan ion Na⁺. Analisis makmal menunjukkan tanah terserak dengan kehadiran mineral kaolinit dilihat kurang sensitif terhadap serakan berbanding mineral montmorilonit. Kehadiran mineral albit dan sepiolit melalui proses luluhawa batuan induk turut mempengaruhi kecenderungan tanah lempung untuk terserak. Pemerhatian di lapangan mendapati tanah lempung kaolinit berasosiasi dengan pembentukan fitur hakisan ril dan galur rencam secara lateral dan separa lateral manakala tanah lempung montmorilonit tidak membentuk fitur hakisan yang nyata, namun cenderung membentuk lapisan keruping dengan sistem jaringan rekahan heksagonal pada cerun bersudut hampir tegak ($\approx 80^\circ$). Pembentukan fitur-fitur hakisan ini adalah berbeza mengikut jenis tanah dan batuan induk. Kajian ini dapat dijadikan sebagai satu penunjuk awal bagi menentukan taburan tanah bermasalah ini, terutamanya di kawasan endapan sedimen Melange kompleks di negeri Sabah meliputi Lahad Datu, Kunak, Kinabatangan dan Sandakan yang sinonim dengan masalah mendapan bawah tanah dan kegagalan cerun. Namun, kajian lanjut perlu dijalankan dengan mengambil kira parameter kimia bagi menilai sifat tanah terserak dengan lebih komprehensif.

PENGHARGAAN

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

RUJUKAN

- Abbaslou, H., Hadifard, H. & Ghanizadeh, A.R. 2020. Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. *Heliyon* 6(2): e03462.
- Abbaslou, H., Hadifard, H. & Poorgohardi, A. 2016. Characterization of dispersive problematic soils and engineering improvements: A review. *Computations and Materials in Civil Engineering* 1(2): 65-83.
- 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.
- ASTM 7928 -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 D2487. 2006. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D4221-18. 2018. *Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer*. 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 D4647/D4647M-13. 2020. *Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM D6572-20. 2020. *Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils by the Crumb Test*. 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.
- 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-Tambahan, Sabah, Malaysia. *Sains Malaysiana* 46(6): 867-877.
- Bao, S.C., Wang, Q. & Bao, X.H. 2013. Study on dispersive influencing factors of dispersive soil in Western Jilin Based on grey correlation degree method. *Applied Mechanics and Materials* 291-294(2): 1096-1100.
- Basga, D.S., Tsozué, D., Temga, J.P., Balna, J. & Nguetnkam, J.P. 2018. Land use impact on clay dispersion/flocculation in irrigated and flooded Vertisols from Northern Cameroon. *International Soil and Water Conservation Research* 6(3): 237-244.
- Belarbi, A., Zadjou, A. & Bekkouche, A. 2013. Dispersive clay: Influence of physical and chemical properties on dispersion degree. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 18: 1727-1738.
- Bougeard, D., Smirnov, A.S. & Geidel, E. 2000. Vibrational spectra and structure of kaolinite: A computer simulation study. *Journal of Physical Chemistry B* 104: 9210-9217.
- Brigatti, M., Galan, E. & Theng, B. 2006. Structures and mineralogy of clay minerals. *Developments in Clay Science* 1: 19-86.
- Chang, K-T., Lee, K.Z.-Z. & Wu, H-Y. 2020. Internal erosion failure of uniform sands under confinement and constricted seepage exit. *Water* 12: 2417.
- Charlton, R. 2008. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. New York: Routledge.
- Dang, A., Bennett, J., Marchuk, A., Biggs, A. & Raine, S. 2018. Evaluating dispersive potential to identify the threshold electrolyte concentration in non-dispersive soils. *Soil Research* 56: 549-559.

- Dinh, B.H., Nguyen, A.D., Jang, S.Y., Jang, S-Y. & Kim, Y-S. 2021. Evaluation of erosion characteristics of soils using the pinhole test. *Geo-Engineering* 12: 6.
- Djarwadi, D. 2007. Dispersivity test of Duriangkang Dam filling material. *Dinamika TEKNIK SIPIL* 7(1): 11-19.
- DPIW. 2009. *Dispersive Soils and Their Management*. Tasmania: Sustainable Land Use.
- Fan, S. 2017. Internal characteristics of loose solid source of debris flow in Zhouqu. *Sains Malaysiana* 46(11): 2179-2186.
- FAO. 2020. *Mapping of Salt-Affected Soils - Technical Specifications and Country Guidelines*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fell, R., Hanson, G.J., Herrier, G., Marot, D. & Wahl, T. 2013. Relationship between the erosion properties of soils and other parameters. Dlm. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, disunting oleh Bonelli, S. & Nicot, F. Hoboken: Wiley. hlm. 343-381.
- Garzón, E., Sánchez-Soto, P.J. & Romero, E. 2010. Physical and geotechnical properties of clay phyllites. *Applied Clay Science* 48(3): 307-318.
- Hassanlourad, M., Rokni, M.N., Hassanlo, M. & Badrlou, A. 2017. Dispersive clay stabilised by alum and lime. *International Journal of GEOMATE* 12: 156-162.
- Heshmati, M., Majid, N., Jusop, S., Gheitury, M. & Abdu, A. 2013. Effects of soil and rock mineralogy on soil erosion features in the Merek Watershed, Iran. *Journal of Geographic Information System* 5(3): 248-257.
- Ismail, F., Mohamed, Z. & Mukri, M. 2008. A study on the mechanism of internal erosion resistance to soil slope instability. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13(A): 1-12.
- Kaliakin, V.N. 2017. Example problems related to soil identification and classification. Dlm. *Soil Mechanics*, United Kingdom: Butterworth-Heinemann. hlm. 51-92.
- Khoirullah, N., Mufti, I.J., Sophian, I., Iskandarsyah, T.Y.W.M. & Muslim, D. 2019. Erosion potential based on erodibility and plasticity index data on Cilengkrang, Bandung, West Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 396: 012035.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms & Processes. A New Perspective*. London: Arnold.
- Knodel, P.C. 1991. *Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils*. Denver: U.S Bureau of Reclamation.
- Ksenija, D., Laslo, C., Nenad, S. & Gordana, H.M. 2018. Methods for assessment and identification of dispersive soils. *XVI Danube - European Conference on Geotechnical Engineering, Skopje, R. Macedonia*. hlm. 205-210.
- Kumari, N. & Mohan, C. 2021. *Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties*. Dlm. *Clay and Clay Minerals*, edited by Nascimento, G.M.D. London: IntechOpen.
- Ledesma, A. 2016. Cracking in desiccating soils. *E3S Web of Conferences* 9: 03005.
- Levy, G.J. & Shainberg, I. 2005. Sodic soils. Dlm. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, disunting oleh Hillel, D., Rosenzweig, C., Powlson, D., Scow, K., Singer, M. & Sparks, D. New York: Academic Press. hlm. 504-513.
- Lipiec, J., Czyż, E.A., Dexter, A.R. & Siczek, A. 2018. Effects of soil deformation on clay dispersion in loess soil. *Soil and Tillage Research* 184: 203-206.
- Maharaj, A. & Paige-Green, P. 2015. The pinhole test for dispersive soil identification. Dlm. *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. 5, disunting oleh Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P. & Luino, F. Springer. hlm. 1299-1303.
- Masoodi, A., Majdzadeh Tabatabai, M.R., Noorzad, A. & Samadi, A. 2019. Riverbank stability under the influence of soil dispersion phenomenon. *Journal of Hydrologic Engineering* 24(3): 05019001.
- Mizal-Azzmi, N., Mohd-Noor, N. & Jamaludin, N. 2011. Geotechnical approaches for slope stabilization in residential area. *Procedia Engineering* 20: 474-482.
- Musta, B., Erfen, H.F.W., 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.
- Nagy, G., Nagy, L. & Kopeckó, K. 2016. Examination of the physico-chemical composition of dispersive soils. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 60(2): 269-279.
- Page, K.L., Dang, Y.P., Dalal, R.C., Kopittke, P.M. & Menzies, N.W. 2020. The impact, identification and management of dispersive soils in rainfed cropping systems. *European Journal of Soil Science* 2020: 1-20. <https://doi.org/10.1111/ejss.13070>
- Patcharapreecha, P., Topark Ngarm, B., Goto, I. & Kimura, M. 1990. Studies on saline soils in Khon Kaen Region, Northeast Thailand. *Soil Science and Plant Nutrition* 36(3): 363-374.
- Penner, D. & Lagaly, G. 2001. Influence of anions on the rheological properties of clay mineral dispersions. *Applied Clay Science* 19: 131-142.
- Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J., Oostwoud Wijdenes, D., Verstraeten, G. & van Wesemael, B. 2002. Gully erosion in dryland environments. Dlm. *Dryland Rivers: Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*, disunting oleh Bull, L.J. & Kirkby, M.J. Chichester: Wiley. hlm. 229-262.
- Prakash, S. & Jain, P.K. 2002. *Engineering Soil Testing*. Roorkee: Nem Chand & Bros.
- Premkumar, S., Piratheepan, J., Arulrajah, A., Disfani, M.M. & Rajeev, P. 2016. Experimental study on contact erosion failure in pavement embankment with dispersive clay. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28: 04015179.
- Rengasamy, P. 2018. Irrigation water quality and soil structural stability: A perspective with some new insights. *Agronomy* 8(5): 72.
- Richards, K.S. & Reddy, K.R. 2007. Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66: 381-402.
- Robbins, B.A. & Griffiths, D.V. 2018. Internal erosion of embankments: A review and appraisal. *Rocky Mountain Geo-Conference 2018*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers. hlm. 61-75.

- Roy, S. & Bhalla, S.K. 2017. Role of geotechnical properties of soil on civil engineering structures. *Resources and Environment* 7(4): 103-109.
- Savaş, H. 2016. Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. *Science and Engineering of Composite Materials* 23(6): 589-598.
- Sayehvand, S. & Dehghani, M. 2014. Identification and management of dispersive soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 19: 9023-9032.
- Shamsuddin Jusop. 1981. *Asas Sains Tanah*. Kuala Lumpur: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. & Decker, R.S. 1976. Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102(4): 287-301.
- Shihua, C., Shuijin, S., Yaohui, H. & Qinghong, M. 2017. Research on dispersive discrimination test methods of illite clay soils in Zhejiang. *Proceedings of the 2016 International Conference on Architectural Engineering and Civil Engineering*. hlm. 224-230.
- Singh, B., Gahlot, P. & Purohit, D.G.M. 2018. Dispersive soils-characterization, problems and remedies. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5(6): 2478-2484.
- Stumpf, A.J. 2013. Dispersive soil hazards. Dlm. *Encyclopedia of Natural Hazards*, disunting oleh Bobrowsky, P.T. Dordrecht: Springer. hlm. 186-188.
- Taha, O.M.E. & Taha, M.R. 2011. Cracks in soils related to desiccation and treatment. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 5(8): 1080-1089.
- Tournassat, C., Vinsot, A., Gaucher, E.C. & Altmann, S. 2015. Chemical conditions in clay-rocks. Dlm. *Natural and Engineered Clay Barriers*, disunting oleh Tournassat, C., Steefel, C., Bourg, I. & Bergaya, F. hlm. 71-100.
- Tran, D.B., Hoang, T.V. & Dargusch, P. 2015. An assessment of the carbon stocks and sodicity tolerance of disturbed *Melaleuca* forests in Southern Vietnam. *Carbon Balance Manage* 10(15). <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0025-6>
- Uddin, F. 2018. Montmorillonite: An introduction to properties and utilization. Dlm. *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*, disunting oleh Zoveidavianpoor, M. London: IntechOpen.
- Ulery, A.L. 2005. Edaphology. In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, disunting oleh Hillel, D. New York: Academic Press. hlm. 419-425.
- Umesh, T.S., Dinesh, S.V. & Sivapullaiah, P.V. 2011. Characterization of dispersive soils. *Materials Sciences and Applications* 2: 629-633.
- Vacher, C.A., Loch, R.J. & Raine, S.R. 2004. *Identification and Management of Dispersive Mine Spoils*. Technical Report. Australian Centre for Mining Environmental Research, Kenmore, Australia.
- Vakili, A.H., Shojaei, S.I., Salimi, M., bin Selamat, M.R. & Farhadi, M.S. 2020. Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils. *Soils and Foundations* 60(1): 167-178.
- Vakili, A.H., bin Selamat, M.R., Aziz, H.B.A., Mojiri, A., Ahmad, Z. & Safarzadeh, M. 2017. Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC. *Geoderma* 285: 270-279.
- Wang, L., Yuan, X. & Wang, M. 2020. Landslide failure mechanisms of dispersive soil slopes in seasonally frozen regions. *Advances in Civil Engineering* 2020: 1-13.
- Wei, X., Gao, C. & Liu, K. 2020. A review of cracking behavior and mechanism in clayey soils related to desiccation. *Advances in Civil Engineering* 2020: 1-12.
- Yang, S.L., Solheim, A., Forsberg, C.F., Kvalstad, T., Feng, X.L., Li, A.L. & Urgeles, R. 2009. Geotechnical properties of river-fed sediments compared with glacier-fed sediments. *Marine Georesources and Geotechnology* 27: 281-295.
- Yong, R.N., Nakano, M. & Pusch, R. 2012. *Environmental Soil Properties and Behaviour*. Boca Raton: CRC Press.
- Zare-junaghani, N., Mehrnahad, H. & Torabi-kaveh, M. 2019. Assessing dispersivity and expansivity of clay soils in the South-East of Yazd with aim of investigating correlation between them. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 63(4): 1112-1124.
- Zhang, J., Wang, Q., Wang, W. & Zhang, X. 2021. The dispersion mechanism of dispersive seasonally frozen soil in western Jilin Province. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80: 5493-5503.
- Zhao, P., Shao, M.A., Omran, W. & Amer, A.M. 2011. Effects of erosion and deposition on particle size distribution of deposited farmland soils on the chinese loess plateau. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 35(6): 2135-2144.
- Zund, P.R. 2017. *Soil Erodibility. Userguide*. Brisbane, Queensland: Department of Science, Information Technology, Innovation Government.

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