

UJI DISPERSIVITAS INTI KEDAP AIR BENDUNGAN TIPE URUGAN DENGAN KANDUNGAN MINERAL LEMPUNG MONTMORILLONITE DENGAN *CRUMB TEST*

Didiek Djarwadi

Mahasiswa Doktoral, Jurusan Teknik Sipil, fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: d.djarwadi@yahoo.com

ABSTRAK

Lempung dispersif telah diidentifikasi sebagai tanah dengan tingkat erosi yang tinggi karena mengandung larutan sodium yang tinggi di dalam air potinya. Dominasi ion sodium akan menambah tebal lapisan air yang disekitar partikel lempung. Hal ini menyebabkan gaya tolak melebihi gaya lekat antar partikel lempung, sehingga partikel lempung akan larut bila terkena air. Pengaruh buruk tanah dispersif pada bendungan dan atnggul telah diketahui. Bocoran pada bendungan tanah yang dapat menyebabkan keruntuhan karena tanah dispersif telah diidentifikasi di Australia, Amerika, dan Afrika Selatan dan beberapa Negara lain di dunia. Penelitian ini menyampaikan tingkat dispersivitas secara kuantitatif bahan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo yang mengandung mineral montmorillonite dengan metoda crumb. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah yang mengandung mineral montmorillonite pada kadar tertentu termasuk tanah dispersif.

Kata kunci: tanah dispersif, mineral lempung halloysite, uji crumb

1. PENDAHULUAN

Tanah yang bersifat *dispersive* adalah tanah yang sangat mudah tererosi bahkan pada kondisi air yang diam, dan tidak seperti tanah pada umumnya yang akan tererosi oleh air yang mengalir dengan kecepatan tertentu. Hal ini terjadi karena air pori tanah *dispersive* mengandung larutan sodium dalam kadar yang tinggi. Dengan tingginya larutan sodium di dalam air porinya, maka mineral lempung di dalamnya akan diselimuti oleh lapisan air dua kali lebih tebal dibandingkan dengan lempung pada umumnya. Kondisi ini menyebabkan terjadinya tegangan tolak antar partikel lempung sehingga apabila terendah air maka partikel lempung tersebut akan lepas dan larut di dalam air.

McElroy (1987) menyampaikan bahwa tanah *dispersive* biasanya mempunyai partikel dengan diameter > 0,005 mm lebih dari 12%. Ryker (1977) menyampaikan bahwa tanah *dispersive* mempunyai indeks plastisitas > 4. Sherard dkk, (1976) menguji batas-batas Atterberg terhadap 115 contoh tanah *dispersive* dan 80 contoh tanah *non-dispersive* yang menunjukkan bahwa tanah lanau dengan plastisitas rendah (ML) sampai tinggi (MH) umumnya adalah tanah *non-dispersif*, sedangkan pada tanah lempung dengan plastisitas rendah (CL) sampai tinggi (CH) terdapat kemungkinan adanya tanah *dispersif*.

Masalah tanah *dispersif* adalah pada daya tahan yang sangat rendah terhadap erosi, baik erosi permukaan maupun erosi internal di dalam tanah, sehingga meskipun pada umumnya mempunyai sifat kedap air, apabila terjadi erosi permukaan oleh air dan terjadi retak pada permukaannya, maka erosi akan berkembang di dalam tanah dan dapat menyebabkan terjadinya proses *piping* di dalam tanah. Pada bendungan tipe urugan hal ini sangat berbahaya, sebab proses *piping* yang terjadi dalam skala yang makin besar dapat meruntuhkan bendungan. Oleh sebab itu identifikasi awal dispersivitas lempung sebagai bahan timbunan bendungan tipe urugan sangat disarankan.

2. STUDI LITERATUR

Keberadaan unsur sodium pada lempung yang menjadi penyebab terjadinya erosi pada tanah sudah diketahui sejak tahun 1930-an, seperti dilaporkan oleh Lutz (1934), Volk (1937) serta Fletcher dan Carroll (1948). Tanah tersebut kemudian disebut dengan tanah *dispersif*. Sejak tahun 1960-an, penelitian yang intensif tentang tanah *dispersif* dilakukan di Australia dengan ditemukannya erosi pada bendungan tanah antara lain oleh Aichison dkk (1963), Aichison dan Wood (1965), Ralling (1966), dan Ingles dkk (1968), yang memberikan pengetahuan baru tentang masalah tanah *dispersif*. Di Amerika Serikat penelitian tentang tanah *dispersif* dilakukan secara intensif sejak tahun 1970-an. Sherard (1972), Sherard dkk (1972), melaporkan runtuhnya bendungan Caney Coon Creek di Oklahoma akibat terjadinya *piping* bahan timbunan yang *dispersif*. Kasus yang sama pada bendungan Flagstaff Gully dilaporkan oleh Ingles dkk (1968). Kedua bendungan tersebut runtuh karena terjadi rembesan air dari retakan batuan di fondasi bendungan yang menyebabkan erosi pada tubuh bendungan. Menyadari hal tersebut, Bordeaux dan Imaizumi (1977) melakukan perbaikan fondasi bendungan dengan *slush grouting treatment* dan *concrete slab* pada fondasi bendungan Sobradinho di Brazil, yang bahan timbunannya adalah tanah *dispersif* untuk menghindari terjadinya keruntuhan akibat erosi. Phillips (1977) menyampaikan design bendungan tipe urugan dengan bahan

timbunan yang dispersif, dengan menggunakan lapisan *lime stabilized clay* setebal 3,50 meter antara inti kedap air dengan filter pada bendungan Bungal di Australia. McDaniel dan Decker (1979) menyampaikan cara penanggulangan erosi pada inti kedap air bendungan Los Esteros dengan menggunakan *fine sand filter* untuk menghambat terjadinya erosi dan *piping*.

3. UJI DISPERSIVITAS DAN STANDARD UJI

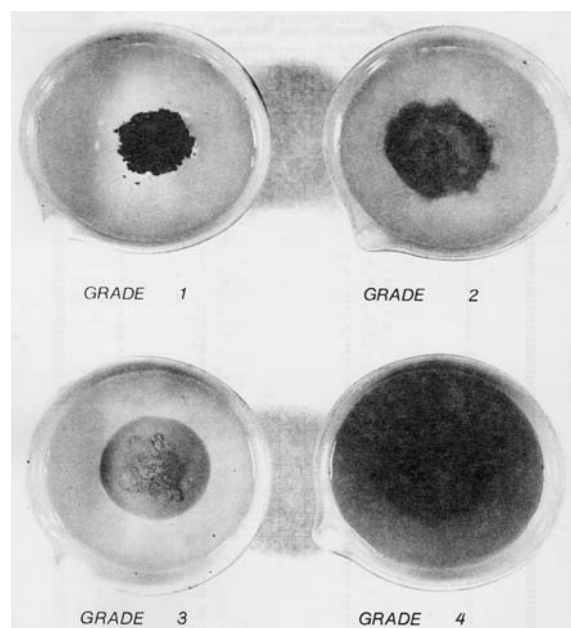
Knodel (1991) menyatakan bahwa sifat *dispersive* suatu tanah dapat diketahui dengan 5 jenis uji yaitu:

- a. Uji *pinhole* (*pinhole test*) dengan cara pelaksanaan seperti dalam standard ASTM D 4647-93 atau USBR 5410-89
- b. *Crumb test* dengan cara pelaksanaan seperti dalam standard ASTM D 6572-00 atau USBR 5400-89
- c. Uji dobel hidrometer (*double hydrometer test*) dengan cara pelaksanaan seperti dalam standard ASTM D 4221-99 atau USBR 5405-89.
- d. Uji kimiawi (*chemical test*) dengan cara pelaksanaan seperti dalam Handbook 60 dari USDA (Richard, 1954).
- e. Uji ESP (Exchangeable Sodium Percentage).

Uji dispersif suatu tanah sebaiknya dilaksanakan pada kondisi kadar air asli. Pengeringan terutama dengan oven dapat merusak sifat *dispersif* suatu tanah. Jenis uji dispersivitas tanah (a) sampai dengan (d) biasa dilakukan di Amerika Serikat, sedangkan uji (e) biasa dilakukan di Australia dan Afrika Selatan, seperti dilaporkan oleh Aichison dan Wood (1965), Murley dan Reilly (1977), Eagles (1978), dan Elges (1985).

Dalam penelitian ini, identifikasi dispersivitas lempung yang digunakan adalah *crumb test*. *Crumb test* adalah uji kualitatif, yaitu uji untuk mengetahui tingkat dispersivitas lempung dengan cara yang sangat sederhana, dapat dilakukan di lapangan atau di laboratorium, tidak memerlukan alat uji khusus, sehingga untuk tahap awal identifikasi dispersivitas lempung cara ini sangat dianjurkan. Apabila hasil uji menunjukkan sifat tanah yang *dispersive*, maka contoh tanah dapat diuji dengan cara kuantitatif di laboratorium dengan metode *pinhole*, *double hydrometer*, uji kimiawi atau uji ESP (*Exchangeable Sodium Percentage*).

Crumb test pertama kali disampaikan oleh Emerson (1967) dengan mengembangkan prosedur sederhana untuk identifikasi tanah *dispersive* di lapangan dan juga dapat dilakukan di laboratorium. Benda uji berupa kubus dengan sisi 15 mm dari contoh tanah pada kondisi kadar air lapangan atau dimodelkan di laboratorium. Benda uji dimasukkan kedalam bejana berisi air destilasi sebanyak 250 ml, dan ditunggu perubahan yang terjadi karena reaksi dengan air. Uji ini bersifat kualitatif dengan membandingkan pola keruntuhan benda uji pada interval waktu tertentu dengan pola standard keruntuhan seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tingkat dispersivitas pada uji *crumb* (Acciardi, 1985)

Tingkat dispersivitas tanah dalam *crumb test* digolongkan dalam 4 tingkat yaitu:

Grade 1, Benda uji luruh atau hancur, tetapi tidak menyebabkan air keruh. Untuk benda uji yang menunjukkan perilaku ini termasuk dalam tanah yang bersifat *non-dispersive*.

Grade 2, Benda uji luruh atau hancur, dan menimbulkan air sedikit keruh disekitar benda uji. Untuk benda uji yang menunjukkan perilaku ini termasuk dalam tanah yang bersifat *intermediate-dispersive*.

Grade 3, Benda uji luruh atau hancur, dan menimbulkan air keruh sampai dengan radius 10 mm disekitar benda uji. Untuk benda uji yang menunjukkan perilaku ini juga termasuk dalam tanah yang bersifat *intermediate-dispersive*.

Grade 4, Benda uji luruh atau hancur, dan menimbulkan air keruh pada seluruh dasar bejana. Untuk benda uji yang menunjukkan perilaku ini juga termasuk dalam tanah yang bersifat *dispersive*.

Di Amerika, sejak tahun 1971 *Soil Conservation Service (SCS)* telah menggunakan *crumb test* sebagai uji rutin pada penyelidikan tanah untuk bahan timbunan bendungan dan tanggul banjir. Hasil evaluasi Sherard dkk (1976b) berdasarkan hasil penelitiannya menyampaikan bahwa apabila hasil *crumb test* menunjukkan tanah *dispersive*, hasil yang sama diperoleh dari cara uji lain, tetapi 40% dari seluruh hasil *crumb test* yang menunjukkan tanah *non-dispersive* ternyata menunjukkan reaksi dispersif pada saat diuji dengan metoda lain.

4. BAHAN UJI DISPERSIVITAS

Dalam penelitian ini, bahan uji adalah bahan timbunan inti kedap air yang diambil dari *borrow area* bendungan Batubulan di Sumbawa, bendungan Wonorejo di Jawa Timur, dan bendungan Kedungombo di Jawa Tengah yang mengandung mineral lempung montmorillonite. Uji kimiawi dan kuantitatif mineral lempung berdasarkan hasil uji difraksi sinar-X pada bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo disampaikan pada Tabel 1 dan Tabel 2, sedangkan grafik gradasi dan plastisitas bahan timbunan inti kedap air dari ketiga bendungan tersebut disampaikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Tabel 1. Hasil uji kimiawi bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo.

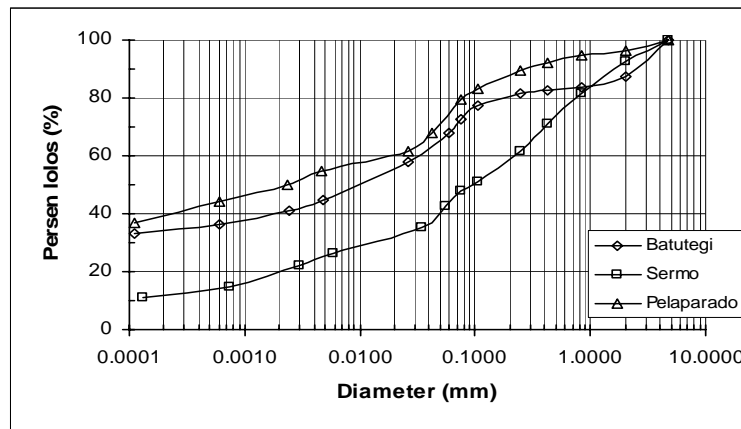
Unsur kimia	Persentasi unsur kimia		
	Batubulan	Wonorejo	Kedungombo
SiO ₂	59.37	57.58	48.86
Al ₂ O ₃	15.47	16.69	7.63
Fe ₂ O ₃	7.39	4.42	3.57
TiO ₂	0.28	0.24	0.17
CaO	2.29	2.55	15.97
MgO	1.60	2.61	2.06
Na ₂ O	1.80	1.31	0.65
K ₂ O	0.96	0.56	1.12
Hilang Pijar	10.84	14.04	19.97

Tabel 2. Hasil uji kuantitatif mineral lempung bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo.

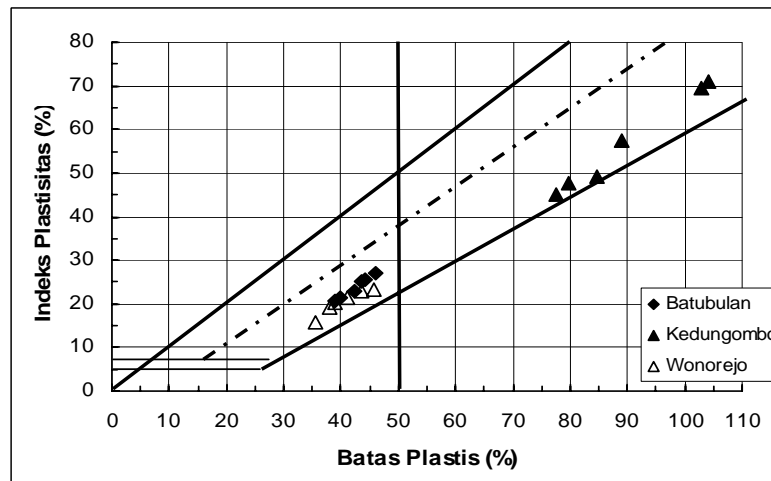
Mineral lempung	Persentasi mineral lempung		
	Batubulan	Wonorejo	Kedungombo
Halloysite	42.18	42.22	21.48
Montmorillonite	17.47	25.70	9.91
Feldspar	14.10	20.22	---
Alpha Quartz	19.40	8.06	33.04
Hematite	6.85	3.80	3.41
Calcite	---	---	27.27
Aragonite	--	--	4.89

Seperti terlihat pada Tabel 2 selain mempunyai mineral halloysite, bahan timbunan bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo masing masing mengandung mineral montmorillonite sebesar 17,47%, 25,70% dan 9,91%. Montmorillonite yang termasuk dalam kelompok mineral *diocahedral smectite* (Rieder et al, 1998).

Montmorillonite dengan rumus kimia $(1/2Ca, Na)(Al, Mg.Fe)_4 (si, Al)_8 O_{20} (OH)_4 .n.H_2O$ adalah mineral lempung hasil pelapukan batuan beku yang mengandung silika yang kaya unsur Ca dan Mg; lemah dalam ikatan oleh kation Na^+ , dan Ca^{++} sehingga mempunyai potensi kembang/susut yang besar dan kuat geser yang rendah.



Gambar 2. Gradasi bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo.



Gambar 3. Batas Plastis dan Index Plastisitas bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo.

USDA (1991) menyampaikan bahwa tanah dispersif biasanya termasuk dalam klasifikasi CL pada USCS. Beberapa tanah dispersif juga ditemukan pada klasifikasi ML, CL-ML, dan CH, sedangkan lempung dispersif tidak ditemukan pada tanah dalam klasifikasi MH. Hal ini sesuai dengan data plastisitas dari bendungan Batubulan, Kedungombo dan Wonorejo seperti terlihat pada Gambar 3.

Untuk uji *crumb* pada tanah asli di lapangan, benda uji dapat berupa gumpalan tanah dengan volume yang setara dengan kubus yang mempunyai sisi 15 mm. Untuk benda uji berupa tanah asli, tanah harus dipastikan lolos # no.4 ($\phi = 4.75mm$), sedangkan untuk uji di laboratorium, benda uji dibentuk dengan cara *remoulded* dengan pedoman berat volume (*bulk density*) dan kadar air sesuai dengan kondisi asli di lapangan untuk membuat suatu kubus dengan sisi 15 mm. Untuk uji *crumb* di laboratorium, tanah harus lolos # no. 10 ($\phi = 2.00mm$).

5. PELAKSANAAN UJI DISPERSIVITAS LEMPUNG DENGAN *CRUMB TEST*

Uji *crumb* adalah uji dispersivitas tanah yang bersifat kualitatif, dan biasanya digunakan sebagai sarana identifikasi awal terhadap tingkat dispersivitas suatu tanah. Apabila dari uji *crumb* terdapat kecenderungan tanah bersifat dispersif, maka perlu dilakukan uji kuantitatif dengan metoda pinhole, double hydrometer ataupun uji kimiawi. Benda uji yang telah siap, kemudian dimasukkan dengan hati-hati kedalam cawan (*evaporating dish*) ukuran 300 ml yang telah berisi air destilasi sebanyak 250 ml. ASTM D 6572-00 mensyaratkan bahwa kisaran suhu air selama uji adalah $21^{\circ} + 6^{\circ}$ Celcius, sehingga uji *crumb test* di daerah tropis harus dilakukan pada ruangan dengan pengatur suhu.

Pengamatan terhadap perubahan benda uji oleh karena rendaman air dilakukan 2 menit, 1 jam dan 6 jam setelah benda uji dimasukkan kedalam cawan, dan dicatat reaksi benda uji setelah terkena air sesuai dengan *grade* yang ditetapkan dalam standard ASTM D6572-00. Penetapan hasil *crumb test* dilakukan sebagai berikut; apabila tidak terjadi perubahan *grade* selama uji, maka *grade* pada pengamatan 1 jam ditetapkan sebagai hasil uji. Apabila terjadi perubahan *grade* antara pengamatan 2 menit ke 1 jam, pengamatan pada 1 jam akan ditetapkan sebagai hasil uji, apabila terjadi perubahan dari *grade 2* ke *grade 3*, dan perubahan dari *grade 3* ke *grade 4* terjadi pada rentang waktu antara pengamatan 1 jam ke 6 jam, maka *grade* pada akhir uji (6 jam) akan dipergunakan sebagai hasil uji. Tabel 3 menunjukkan hasil uji dispersivitas tanah sebagai bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonnorejo dan Kedungombo dengan mineral montmorillonite pada pengamatan 2 menit, 1 jam dan 6 jam. Gambar 4, 5 dan 6 menunjukkan masing-masing hasil pengamatan selama uji *crumb* pada bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo.

Tabel 3. Hasil uji dispersivitas pada pengamatan waktu 2 menit, 1 jam dan 6 jam.

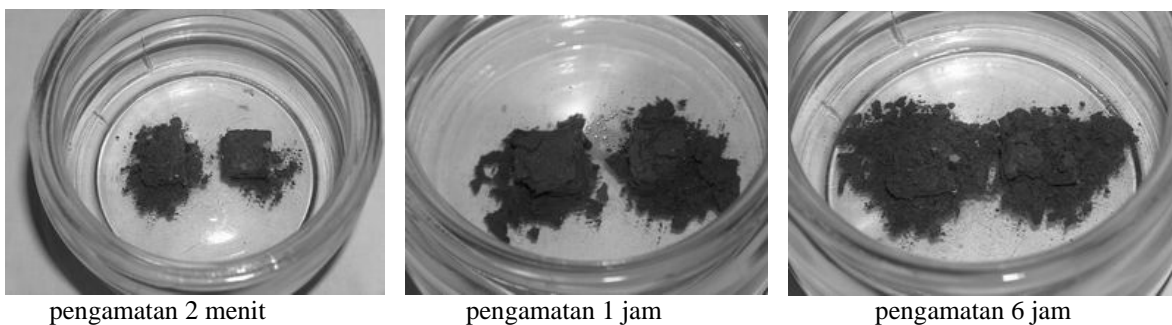
Pengamatan	Batubulan		Wonorejo		Kedungombo	
	Grade	Suhu	Grade	Suhu	Grade	Suhu
2 menit	1	26°C	1	26°C	1	26°C
1 jam	1	26°C	2	26°C	1	26°C
6 jam	2	27°C	2	27°C	1	27°C



Gambar 4. Hasil uji dispersivitas bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan.



Gambar 5. Hasil uji dispersivitas bahan timbunan inti kedap air bendungan Wonorejo.

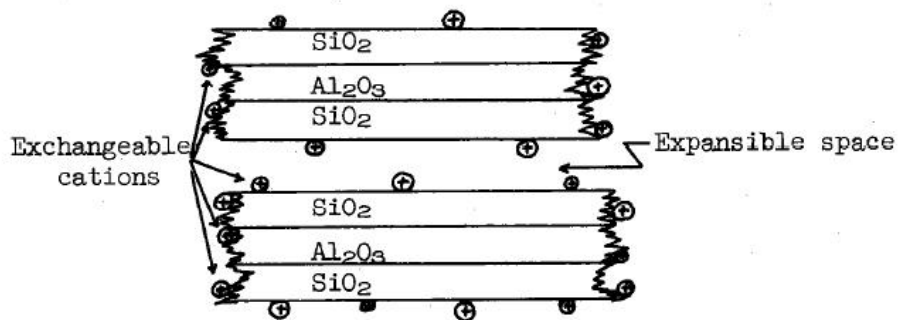


Gambar 6. Hasil uji dispersivitas bahan timbunan inti kedap air bendungan Kedungombo.

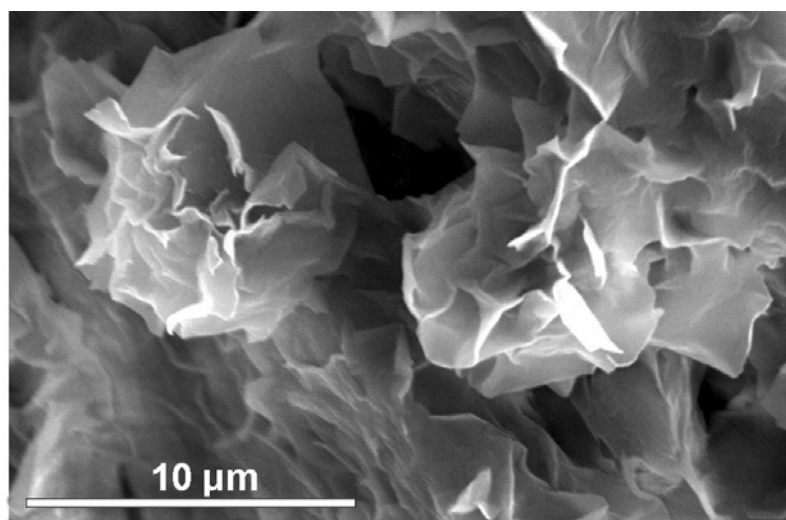
Hasil uji seperti terlihat pada Tabel 3 menunjukkan bahwa bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan yang mempunyai kandungan montmorillonite 17.47%, menunjukkan reaksi pada pengamatan 2 menit dan 1 jam sebagai bahan non-dispersif (grade 1), tetapi pada pengamatan 6 jam berubah menjadi intermediate dispersif (grade 2). Demikian pula dengan bahan timbunan inti kedap air bendungan Wonorejo yang mempunyai kandungan montmorillonite 25.70% menunjukkan reaksi pada pengamatan 2 menit sebagai bahan non-dispersif (grade 1), tetapi pada pengamatan 1 jam dan 6 jam berubah menjadi intermediate dispersif (grade 2). Hasil uji crumb pada bahan timbunan inti kedap air bendungan Kedungombo yang mempunyai kandungan montmorillonite 9.91% menunjukkan reaksi pada pengamatan 2 menit, 1 jam dan 6 jam sebagai bahan non-dispersif (grade 1). Dari ketiga uji crumb, benda uji dengan kandungan mineral lempung montmorillonite < 10% menunjukkan reaksi sebagai bahan non dispersif, sedangkan pada benda uji dengan kandungan mineral lempung montmorillonite > 10% menunjukkan reaksi sebagai bahan yang dispersif.

6. DISKUSI DAN KESIMPULAN

Montmorillonite adalah mineral lempung dalam grup mineral *dioctohedral smectite*, hasil pelapukan batuan beku yang mengandung silika yang kaya unsur Ca dan Mg; lemah dalam ikatan oleh kation Na^+ , dan Ca^{++} sehingga mempunyai potensi kembang/susut yang besar dan kuat geser yang rendah. Gambar 7 menunjukkan struktur mineral lempung montmorillonite (Cady, 1955), sedangkan citra mikro mineral lempung *montmorillonite* pada pembesaran 5.000 kali kelihatan seperti pada Gambar 8.



Gambar 7. Struktur mineral lempung montmorillonite (Cady, 1955).



Gambar 8. Citra mikro mineral lempung montmorillonite pada perbesaran 5.000 kali (www.minersorg.org).

Seperti terlihat pada Gambar 7, ikatan antar partikel silika-alumina-silika sangat lemah, sehingga antar partikel dapat berjarak renggang apabila terjadi pergantian ion akibat keberadaan air. Dengan struktur tersebut, tanah yang mengandung mineral lempung montmorillonite biasanya bersifat plastis, mempunyai sifat kembang susut yang besar karena dapat menyerap air dalam jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan mineral lempung lainnya.

Dari uraian tentang masalah uji dispersivitas pada lempung halloysite dengan *crumb test* pada tanah sebagai bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo dengan kadar mineral lempung *montmorillonite* yang berbeda, beberapa kesimpulan dapat disampaikan sebagai berikut:

- a. Uji *crumb* yang dilakukan pada bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan, Wonorejo dan Kedungombo yang mempunyai kandungan mineral lempung *montmorillonite* menunjukkan respon dispersif pada bahan timbunan inti kedap air bendungan Batubulan dengan kandungan *montmorillonite* 17,47% dan bahan timbunan inti kedap air bendungan Wonorejo dengan kandungan *montmorillonite* 25,70%, tetapi tidak menunjukkan respon dispersif pada bahan timbunan inti kedap air bendungan Kedungombo dengan kandungan *montmorillonite* 9,91%
- b. Uji *crumb* merupakan uji dispersivitas tanah secara kualitatif, sehingga untuk menentukan tingkat dispersivitas secara akurat perlu dilakukan uji kuantitatif seperti uji *pinhole*, uji *double hydrometer*, maupun uji kimiawi.
- c. Uji *crumb* dengan metoda yang sederhana dapat dilakukan di lapangan untuk identifikasi dispersivitas tanah khususnya sebagai bahan timbunan inti kedap air, agar dapat dipertimbangkan kelayakan tanah tersebut sebagai bahan timbunan inti kedap air suatu bendungan tipe urugan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Mineralogical Society, 12 Baylis Mews, Amyand Park Road, Twickenham TW1 3HQ, atas ijin tertulis untuk pemuatan citra mikro mineral lempung *montmorillonite* pada Gambar 8 pada makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aichison, M.E., Ingles, O.G, and Wood, C.C. (1963). Post Construction Deflocculation as a Contributory Factor in Failure of Earth Dams. *Proc 4th Australia-New Zealand Conf on Soil Mech and Foundation Engineering*. Pp 275-279.
- ASTM. (2003). Annual Book of ASTM Standads 2003, Vol.04.08. Philadelphia.
- ASTM. (2003). Annual Book of ASTM Standads 2003, Vol.04.09. Philadelphia.
- Aichison, M.E, and Wood, C.C. (1965). Some Interaction of Compaction, Permeability, and Post Construction Deflocculation Affecting the Probability of Failure of Small Dams. *Proc 7th Intl Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Montreal, Vol II, pp 442-446.
- Bordeaux, G., and Imaizumi, H. (1977). Dispersive Clay at Sobradinho Dam. *Dispersive Clays, Related piping and Erosion in Geotechnical Project*. ASTM STP 623, pp 13-24.
- Cady, J.G. (1955). Characteristics and Behavior of Soil Clay. USDA, Soil Conservation Service. Phamplet no. 2976.
- Eagles, J.H. (1978). Dispersive Soils: Testing of a Sydney Basin Clay. *ANCOLD Bulletin no.51*.
- Elges, H.F.W.K. (1985). Problem Soils in South Africa-State of the Art, *The Civil Engineer in South Africa*, Vol.27, No.7, pp 347-349 and 351-353.
- Fletcher, J.E., and Carroll, P.H. (1948). Some Properties of Soils Associated with Piping in Southeastern Arizona. *Proc Soil Science Society of America*, pp 545-547.
- Forbes, P.J., Sheerman-Chase, A, and Birrell, J. (1980). Control of Dispersion in the Mnjoli Dam, *International Water Power and Dam Construction*, Vol.32, No.12.
- Ingles, O.G., Lang, J.G and Richards, B.G. (1968). Pre-Equilibrium Observations on the Reconstructed Flagstaff Gully Dam. *Proc Symposium on Earth and Rockfill Dams*, Talwara, India, Vol.1, pp. 162-170.
- Knodel, P.C. (1991). Characteristics and Problems of Dispersive Clay Soils. *Research Report no. R -91-09*. US Dept of Interior, Bureau of Reclamation. Denver, 17pp.
- Logani, K.L. (1979). Dispersive Soils Chosen for Ullum Core, *World Water*. August 1979
- Lutz, J.F. (1934). The Physico-Chemical Properties of Soil Affecting Erosion, *Research Bulletin 212*, Agricultural Experiment Station, University of Missouri.
- McDaniel, T.N, and Decker, R.S. (1979). Dispersive Soil Problem at Los Esteros Dam. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.9, pp 1017-1030.
- McElroy, C.H. (1987). The use of chemical additives to control the erosive behavior of dispersive clays, *Proc Symposium on Engineering Aspects of Soil Erosion, Dispersive Clays and Loess*, ASCE Geotechnical Special Publication No.10, pp 1-16.
- Melville, A.L., and Mackellar, D.C.R. (1980). The Identification and Use of Dispersive Soils at Elandsjagt Dam, South Africa, *7th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Accra.
- Murley, K.A., and Reilly, L.A. (1977). Experience with Assessment of Dispersive Soils: Water Commission Victoria, *NCOLD Bulletin no. 49*.

- Phillips, J.T. (1977). Case Histories of Repairs and Designs for Dams Built with Dispersive Clay, *Dispersive Clays, Related piping and Erosion in Geotechnical Project*. ASTM STP 623, pp 330-340.
- Rallings, R.A. (1966). An Investigation of the Causes of Failure of Farm Dams in the Brigelow Belt of Central Queensland. *Bulletin 10*, Water Resources Foundation of Australia.
- Rieder M, Cavazzini G, D'yakonov Y.S, Frank-Kamenetskii V.A, Gottardi G, Guggenheim S, Koval PV, Müller G, Neiva A.M.R, Radoslovich E.W, Robert J.L, Sassi F.P, Takeda H, Weiss Z, & Wones D.R. (1998). Nomenclature of micas. *Clays Clay Miner*, **46**: 586–595.
- Ryker, N. L. (1977). Encountering Dispersive Clays on Soil Conservation Service Projects in Oklahoma, *Dispersive Clays, Related piping and Erosion in Geotechnical Project*. ASTM STP 623, pp 370-389.
- Sherard, J.L. (1972). Study of Piping Failure and Erosion damage from Rain in Clay Dams in Oklahoma and Mississippi. Report to USDA Soil Conservation Service.
- Sherard, J.L., Ryker, N.L, and Decker, R.S. (1972). Piping in Earth Dams of Dispersive Clay. *Proc Specialty Conference on the Performance of Earth and Earth-Supported Structures*. ASCE, Vol.1, pp 653-689.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P, and Decker, R.S. (1976). Identification and Natures of Dispersive Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.102, No.4, pp 287-301.
- USDA. (1991). Dispersive Clays. Soil Mechanic Note No.13. Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Volk, G.M. (1937). Method of Determination of the Degree of Dispersion of the Clay Fraction. *Proceedings Soil Science Society of America*. Vol.2, pp 432-445.