

Pencegahan Swelling Pada Tanah Lempung Di Bawah Badan Jalan Akibat Pengaruh Rembesan Air

Agus Mahmudi, ST, MT^{1,a} dan Dandung Novianto, ST, MT^{2,b}.

¹Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil Ubhara Surabaya

²Jurusan Teknik Sipil, Poilteknik Negeri Malang

Koresponden : ^aagus_ubhara@yahoo.co.id, ^bd.novianto64@gmail.com

ABSTRAK

Struktur jalan aspal yang terletak di atas lapisan tanah lempung terutama tanah lempung swelling tinggi sering mengalami kerusakan, misalnya retak - retak, penurunan, berlubang dan sebagainya. Kerusakan jalan tersebut terjadi sebelum tercapainya umur jalan yang direncanakan, hal ini disebabkan adanya lapisan tanah dibawah struktur perkerasan jalan yang tidak stabil. Salah satu ciri tanah lempung adalah tingkat keporusannya sangat kecil, yaitu harga koefisien permeabilitas sekitar 10^{-5} kg/cm² atau lebih kecil, selain itu tanah lempung juga mempunyai sifat kembang-susut yang cukup besar. Uji permeabilitas tanah digunakan untuk menentukan harga k, yaitu koefisien permeabilitas, untuk mengetahui kemampuan tanah meluluskan air, sehingga dengan diketahuinya harga k maka kecepatan aliran dapat ditentukan. Waktu tempuh dalam jarak tertentu dapat dihitung dengan menggunakan rumus kecepatan rambat aliran air dalam tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu rambatan air untuk merembes ke badan jalan cukup besar, yaitu bila jarak(L) = 0.50 m, waktu tempuh rambatnya (t) = 21.23 bulan, lebih dari satu musim penghujan sekitar 6 bulan. Artinya agar tanah dibawah badan jalan tidak dialiri air pada musim penghujan, maka pada bahu jalan perlu ditutup cor dengan ketebalan cor setebal 75 cm dan lebar cor 50 cm.

Kata Kunci: Koefisien rembesan, rembesan air

PENDAHULUAN

a. Latar belakang

Struktur jalan aspal yang terletak di atas lapisan tanah lempung terutama tanah lempung swelling tinggi sering mengalami kerusakan, misalnya retak - retak, mengalami penurunan, berlubang dan sebagainya. Kerusakan jalan tersebut terjadi sebelum tercapainya umur jalan yang direncanakan, hal ini disebabkan adanya lapisan tanah dibawah struktur perkerasan jalan yang tidak stabil.

Salah satu ciri tanah lempung adalah tingkat keporusannya sangat kecil, yaitu harga koefisien permeabilitas sekitar 10^{-5} kg/cm² atau lebih kecil, selain itu tanah lempung juga mempunyai sifat kembang-susut yang cukup besar, ini terdapat pada

tanah lempung yang termasuk kategori CH (Clay heigh plasticity). Sifat kembang susut ini tergantung dari fluktuasi air, jika kandungan air selalu tetap, maka sifat kembang susut ini menjadi berkurang, bahkan cukup kecil.

Kembang susut tanah disebabkan oleh air yang terserap disekeliling permukaan partikel lempung (adsorbed water). Oleh karena itu terjadinya proses adsorbed water di bagian bawah konstruksi jalan diupayakan untuk diminimalkan sehingga dapat mencegah terjadinya swelling pada tanahnya untuk mencegah pengaruhnya terhadap struktur jalan aspal di atasnya. Permasalahannya bagaimana mengukur jarak dan waktu rembesan air yang terserap di dalam tanah, dan bagaimana metode

treatment lapisan tanah lempung pada bahu jalan, agar air yang masuk ke dalam tanah tidak sampai merusak badan jalan, misalnya dengan membuat beton cor di bahu jalan, dilapisi dengan geotextile, dengan menggunakan cecucuk, membuat penghalang laju aliran air yang mengalir kearah horizontal, dll.

b. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kecepatan rembesan air pada tanah lempung. Sedangkan tujuannya adalah untuk menentukan waktu yang dibutuhkan dan jarak yang ditempuh air yang terserap. Penelitian ini hanya dilakukan di lokasi jalan di Padang Bojonegoro, tanah yang diuji adalah lapisan tanah lempung yang mempunyai kategori CH (Clay heigh plasticity).

TINJAUAN PUSTAKA

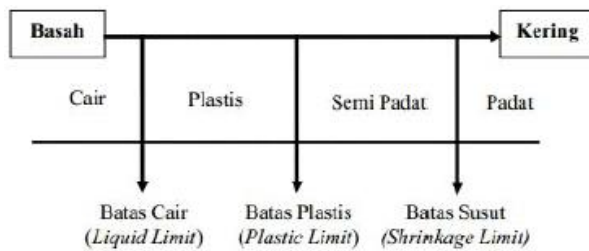
Tanah lempung merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan, dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Dalam keadaan kering sangat keras, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan. Selain itu, permeabilitas lempung sangat rendah (Terzaghi et al, 1996). Sifat khas yang dimiliki oleh tanah lempung adalah dalam keadaan kering akan bersifat keras, dan jika basah akan bersifat lunak plastis, dan kohesif, mengembang dan menyusut dengan cepat, sehingga mempunyai perubahan volume yang besar dan itu terjadi karena pengaruh air. Tanah lempung lunak mempunyai karakteristik yang khusus diantaranya kemampuan yang tinggi, indeks plastisitas yang tinggi, kadar air yang relatif tinggi, dan mempunyai gaya geser yang kecil. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut (Hardiyatmo, 2015) :

- a. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm.
- b. Permeabilitas rendah.
- c. Kenaikan air kapiler tinggi.
- d. Bersifat sangat kohesif.
- e. Kadar kembang susut yang tinggi.

a. Batas-Batas Konsistensi Tanah

Seorang ilmuwan dari Swedia yang bernama Atterberg berhasil mengembangkan suatu metode untuk menjelaskan sifat konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang bervariasi, sehingga batas konsistensi tanah disebut dengan batas-batas Atterberg. Kegunaan batas-batas Atterberg dalam perencanaan adalah memberikan gambaran secara garis besar akan sifat-sifat tanah yang bersangkutan. Bilamana kadar airnya sangat tinggi, campuran tanah dan air akan menjadi sangat lembek. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat teknik yang buruk yaitu kekuatannya rendah, sedangkan kompresibilitas tinggi sehingga sulit dalam hal pemadatannya. Oleh karena itu, atas dasar air yang dikandung tanah, tanah dapat diklasifikasikan ke dalam empat keadaan dasar, yaitu: padat, semi padat, plastis dan cair, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 1 berikut :

- a. Batas cair (LL) adalah kadar air tanah antara keadaan cair dan keadaan plastis.
- b. Batas plastis (PL) adalah kadar air pada batas bawah daerah plastis.
- c. Indeks plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis, dimana tanah tersebut dalam keadaan plastis. Indeks plastisitas (PI) menunjukkan tingkat keplastisan tanah. Apabila nilai indeks plastisitas tinggi, maka tanah banyak mengandung butiran lempung.



Gambar 1. Batas-Batas Atterberg

b. Pemeabilitas Tanah

Permeabilitas adalah kemampuan lapisan tanah untuk meluluskan air melalui pori-pori lapisan tanah, permeabilitas tanah di tentukan oleh harga k , yaitu koefisien permeabilitas. Kemampuan meluluskan air ini tergantung dari jenis tanah, untuk lapisan tanah berbutir kasar harga k cukup besar, dan jika lapisan tanah berbutir halus harga k cukup kecil. Berikut ini adalah tabel harga k (Braja M. Das, Principles of foundation Engineering, second edition).

Tabel 1 Harga k Berbagai Jenis Tanah.

Soil type	k	
	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100–1.0	200–2.0
Coarse sand	1.0–0.01	2.0–0.02
Fine sand	0.01–0.001	0.02–0.002
Silty clay	0.001–0.00001	0.002–0.00002
Clay	<0.000001	<0.000002

METODE PENELITIAN

a. Pengambilan sampel di lapangan

Sample tanah yang diambil berupa sample tanah lempung yang terganggu DS (Disturbed sample), sample ini diambil dari daerah Bojonegoro, Desa Padangan, dengan menggunakan peralatan karung sebagai tempat untuk menyimpan, dan cangkul untuk mengambil tanah. Sedangkan untuk lempung yang tidak terganggu UD (Undisturbed sample), diambil dengan cara menggunakan tabung sample, diameternya sama dengan 7.50 cm (2”), dan panjangnya sama dengan 50 cm. Tabung ini dimasukkan ke dalam tanah dengan cara di pukul, sesuai dengan SNI.

Masing masing contoh tanah ini di bawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian lebih lanjut.

b. Pengujian di laboratorium

1. Pengujian kepadatan standard (Standard Proctor test)

Pengujian ini adalah pengujian kepadatan di laboratorium yang menggunakan metode standard sesuai dengan AASTHO T 99-90; ASTM D 698-00; SNI 03-1742-1989, uji ini bertujuan untuk mengetahui kepadatan tanah dengan cara menjatukan hammer berat 2.5 kg (5.51b), dan tinggi jatuh 30.50 cm, jumlah sampel yang di buat minimal 6 sample, dan masing masing sample diberikan kadar air yang berbeda beda, dengan interval volume air yang sama. Contoh tanah yang digunakan pada pengujian ini adalah contoh tanah tidak asli yang dikeringkan dalam oven selama 24 jam, kemudian di tumbuk untuk dijadikan butiran, setelah itu disaring dengan ayakan No.4, contoh tanah yang sudah ditumbuk kemudian di letakkan pada cetakan (mold) yang mempunyai ukuran diameter = 10.16 cm dan mempunyai volume 944 cm³.

Parameter yang dihitung dengan proctor adalah sebagai berikut :

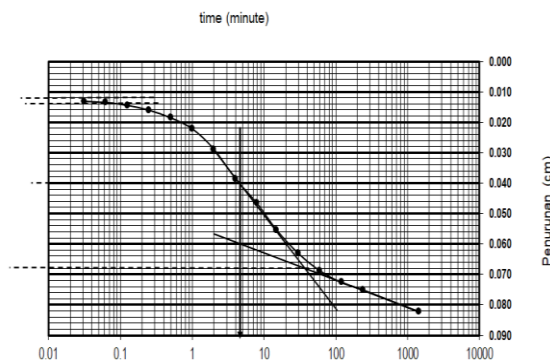
- Berat volume kering pada masing jumlah pukulan γ_d (t/m³)
- Kadar air pada masing masing jumlah pukulan W_c (%)
- Berat volume kering maximum γ_d max (t/m³)
- Kadar air Optimum W_c opt (%)
- Harga k (koefisien permeabilitas), pada masing masing jumlah pukulan (cm/detik)

2. Mencari harga k (koefisien permeability)

Mancari harga k dilakukan dengan cara pengujian konsolidasi, hal ini disebabkan oleh lapisan tanah yang diuji itu sendiri jenis tanahnya didominasi oleh lapisan tanah lempung, dan tanah lempung secara umum sulit dimasuki oleh air, sulit

keluarnya air dari dalam lapisan tanah, sehingga tidak mungkin dilakukannya pengujian permeabilitas, falling head maupun constant head, maka salah satu penyelesaiannya adalah dengan cara mengkonsolidasi pada lapisan tanah tersebut.

Untuk mencari harga C_v (koefisien konsolidasi), dapat dicari dengan grafik sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 2.



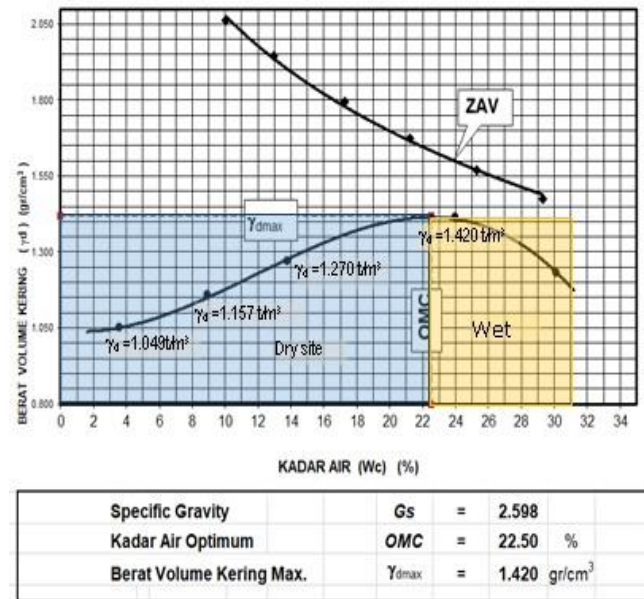
Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Konsolidasi, Hubungan Antara Waktu Vs Penurunan.

Dengan gambar 2 di atas, dapat dicari harga koefisien konsolidasi (C_v), dengan t_{50} , artinya 50% konsolidasi, dengan rumus : $C_v = 0.197 \times H_{dr}^2 / t_{50}$ dalam satuan cm^2/sec .

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengujian kepadatan standard

Hasil dari pemadatan (Proctor) ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara W_c vs γ_d , lihat pada Gambar 3 berikut ini :



Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Proctor Pada Tanah Lempung di Lokasi Bojonegoro.

Pada Gambar 3 menunjukkan grafik hasil pengujian kepadatan ringan di laboratorium (Proctor Standard), tampak bahwa berat volume kering maximum (γ_{dmax}) = 1.420 t/m^3 , berat volume kering di posisi dry site dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 2 Rekap Hasil Pengujian Proctor

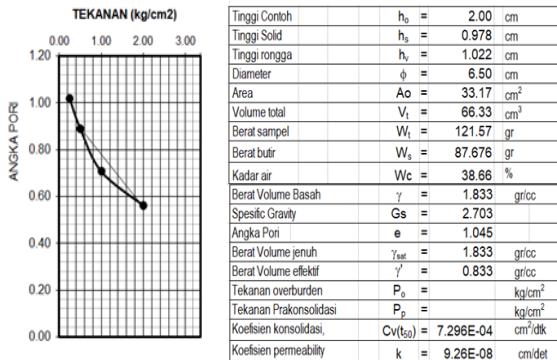
No.	γ_d (t/m^3)	W_c (%)
1	1.049	3.61
2	1.157	8.95
3	1.270	13.79
4	1.420	22.50

b. Mencari harga k (koefisien permeability)

1. Mencari harga a_v

Pada Gambar 4 dibawah ini menunjukkan salah satu grafik hasil pengujian konsolidasi dengan berat volume kering (γ_d) = 1.27 t/m^3 dan $e = 1.045$. Dengan grafik pada Gambar 4 tersebut maka dapat dicari harga $a_v = \Delta e / \Delta p$, angka pori rata $e_{av} = (e_2 + s_1) / 2$, koefisien volume $m_v = e_{av} / \Delta P$, dimana $\Delta P = P_2 - P_1$, dimana

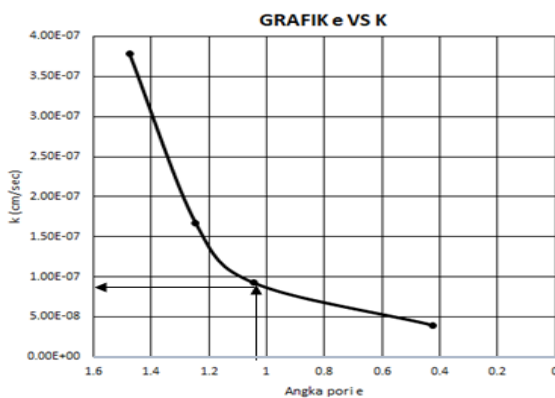
P₁ bersesuaian dengan e₁ dan P₂ bersesuaian dengan e₂.



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Konsolidasi

2. Mencari harga k (koefisien permeability)

Hasil pengujian permeabilitas dengan metode konsolidasi dapat ditampilkan seperti pada Gambar 5. Pada Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara angka porie vs k (koefisien konsolidasi), tampak bahwa semakin kecil harga e, maka semakin kecil pula harga k, oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa semakin padat maka harga k juga semakin kecil. Dengan harga e = 1,045 didapat k = 9,20x10⁻⁸

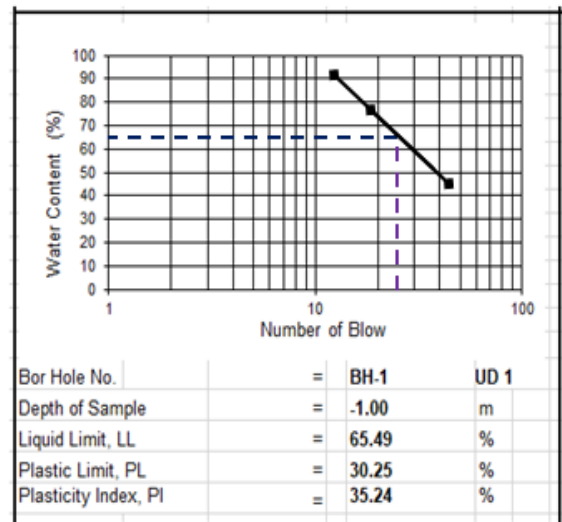


Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Permeabilitas Dengan Metode Konsolidasi

3. Hasil pengujian LL, PL

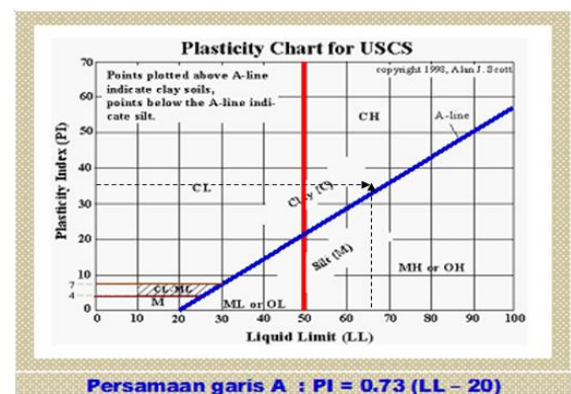
Tanah lempung yang di jalan di daerah Bojonegoro, adalah lapisan tanah lempung yang mempunyai klasifikasi CH, (clay heigh plasticity), harga LL nya dalam

kisaran 65.49%, dan harga PI berkisar = 35.24 %, lihat grafik pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Plastisitas Tanah, Pukulan Vs Kadar Air, Astm D 4318

Untuk mengetahui apakah lapisan tanah tersebut termasuk CH, MH atau CL, maka dapat dilakuka dengan mengeplot hasil pengujian LL, dan PL pada grafik Gambar 7, maka dengan harga LL, dan PI akan berada di daerah CH, oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa contoh tanah pada jalan di daerah Bojonegoro termasuk kategori CH, yaitu tanah lempung dengan plastisitas tinggi.



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara Ll Vs PI (USCS)

4. Hasil pengujian swelling

Dari hasil pengujian swelling yang ditampilkan pada Tabel 3 menunjukkan

bahwa swelling yang terjadi pada contoh tanah tersebut sama dengan 8.75%, dengan tegangan swelling = 1.80 ton/m², tegangan inilah yang merusak jalan.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Swelling di Laboratorium

Titik Bor	Kedalaman (m)	Diameter (cm)	A (cm ²)	Tinggi sample (cm)	Tegangan yang diberikan (kg/cm ²)	P (kg)	Wc (%)
BDK 1	-1.00	6.25	30.66	2	*	*	43.42

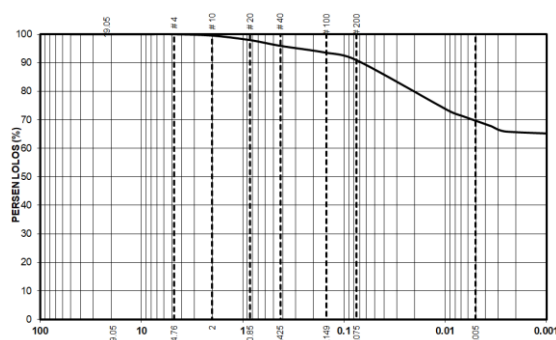
Titik Bor	Swelling				%Swelling	Tegangan pengembangan (t/m ²)
	Bacaan awal	Skala ...x0.01 mm	Bacaan akhir	Skala ...x0.01 mm		
BDK 1	0	0	175	175	1.75	8.75

Catatan

Yang diuji adalah material asli (Undisturbed sample)

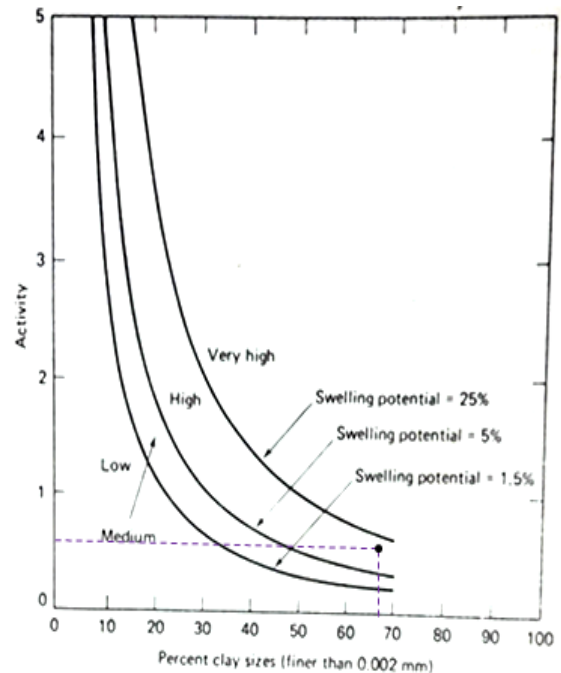
5. Hasil pengujian analisa ayakan & Hydrometer

Hasil analisa ayakan dan hydrometer pada contoh lapisan tanah yang diambil dari jalan pada daerah bojonegoro, ditampilkan dalam bentuk grafik, seperti pada Gambar 8. Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa kandungan kerikil dengan diameter lebih besar 2,36 mm = 0%, dan kandungan pasir dengan diameter 0,075 mm = 9.05%, prosen lanau dengan diameter 0,002 mm = 22.29%, prosen lempung dengan diameter dibawah 0,002 mm = 68.62%. Maka dari hasil analisa saringan yang lolos saringan nomor 200(-22µm) berdasarkan gambar 7.4 adalah sebanyak = 22.29% + 68.62% = 90.05%. Sehingga tanah tersebut 90.05% merupakan tanah lempung. Oleh karena itu perlu dilakukan analisa terhadap potensi swelling tanahnya.



Gambar 8. Hasil Analisa Ayakan dan Hydrometer

Untuk mengetahui apakah lapisan tergolong potensial swelling tinggi, rendah ataukah erpotensial sedang, maka dapat dicari dengan grafik potesial swelling, lihat Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Potensial Swelling (Sumber Skemton 1953)

Gambar 9 menunjukkan grafik hubungan antara prosen lempung atau lolos pada saringan 200 -2µm vs Activity, dimana Activity dapat dicari dengan formula sebagai berikut:

$$A = \frac{PI}{(\% - 2\mu m - 5)} \quad (1)$$

Maka harga $A = \frac{35,24}{90,05 - 5} = 0,414$, dan persen fraksi lempung <0,002 mm = 68.62%, selanjutnya bila diplotkan pada grafik pada Gambar 9 di atas, maka tanah tersebut termasuk kategori *heigh swelling potensial*, dapat disimpulkan bahwa contoh tanah yang diambil dari jalan bojonegoro termasuk lapisan tanah yang mempunyai potensial tinggi.

6. Kondisi lapangan di Bojonegoro

Kondisi jalan di Bojonegoro sering terjadi retak retak dan ambles, keretakan ini membuat Dinas PU terutama dibidang

jalan, untuk setiap tahunnya melakukan penanganan kerusakan jalan, sehingga anggaran dana untuk perawatan jalan menjadi lebih besar sedangkan sumber dana yang ada lebih kecil dibandingkan dengan biaya perawatan, agar bisa mengurangi sedikit beban perawatan tersebut, maka kami mencoba melakukan penelitian ini.

Dari hasil pengujian di laboratorium seperti yang telah diuraikan di atas menunjukkan bahwa lapisan tanah tersebut termasuk kategori heigh potensian swelling, dan hasil pengujian swellingnya mencapai 8.75% dengan tegangan 1.801 t/m². Kondisi swelling ini disebabkan oleh adanya fluktuasi air yang tinggi, dan perlu diketahui curah hujan di Indonesia adalah cukup tinggi, selain itu di Indonesia mempunyai 2 musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau, inilah yang menyebabkan kembang susut tanah sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada tanah tersebut.

7. Pembahasan dan Metode Penanganan

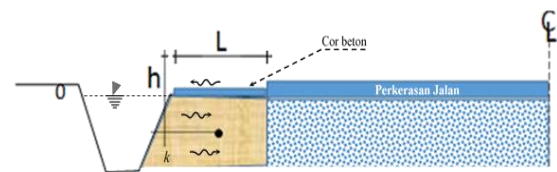
Ada beberapa metode untuk penanganan pada kerusakan jalan tersebut, antara lain adalah :

- Membuat struktur menjadi lebih kaku, artinya membuat struktur kaku, dengan jalan beton, dan biaya penanganannya cukup tinggi
- Menggunakan cerucuk kayu atau bambu dengan biaya penanganannya relatif lebih murah dari pada rigid pavement seperti pada point 1 (satu) diatas, tetapi pelaksanaannya sangat sulit.
- Stabilisasi tanah dasar, penanganannya relatif lebih murah dari point a, dan di atas, tetapi pelaksanaannya termasuk sulit, karena stabilitas tanahnya dilakukan dengan mencampur dengan zat kimia tertentu.
- Dengan menghambat jalan air yang masuk pada lapisan tanah dasar, yaitu dengan menutup lapisan beton pada bahu jalan sehingga air hujan tidak dapat masuk/meresap kedalam tanah

dibawah penutup lapisan beton tersebut. Penanganannya lebih murah dari tiga metode diatas, dan pelaksanaannya juga mudah, yakni dengan cara mengecor pada bahu jalan.

Dari ke empat alternatif tersebut maka yang dipilih adalah point yang ke 4, disamping murah, pelaksanaannya juga cukup mudah.

Berikut ini adalah analisa kecepatan rambat air, dengan sket potongan melintang jalan seperti pada Gambar 10. Pada gambar tersebut, L adalah panjang aliran air yang merembes dalam tanah menuju ke konstruksi jalan, disamping itu panjang L ini yang akan direncanakan untuk di cor di atas tanahnya dengan tujuan agar air hujan yang jatuh di lahan sepanjang L tidak dapat meresap secara vertical, tapi teralirkan kesamping menjauh dari badan jalan.



Gambar 10. Sket Potongan Jalan di Bojonegoro

Dimana :

L = panjang aliran air,

h = tinggi tekanan air,

k = Koefisien permeabilitas.

T = Tebal lapisan tanah sama dengan kedalaman saluran.

Contoh perhitungannya :

$$e = 1,6 \text{ (lihat gambar 5)}$$

maka harga k dari gambar 5 dapat ditentukan sebesar :

$$k = 4.5 \times 10^{-7} \text{ cm/detik}$$

$$= 4.5 \times 10^{-9} \times 24 \times 3600$$

= 0.000389 m/hari, lihat grafik pada Gambar 5 di atas.

$$h = 1 \text{ m}$$

$$i = h/L = (1/L) \text{ tanpa satuan}$$

$$V = k i$$

$$\begin{aligned}
 &= 4.50 \times 10^{-7} \times (1/L) \\
 &= 0.000389 \times 1/L = 0.000389/L \text{ (m/hari)} \\
 L &= V t, \rightarrow t = L/V = L/(0.000389/L) \\
 \rightarrow t &= L^2/0.000389
 \end{aligned}$$

Misal : $L = 0,5 \text{ cm}$, maka $t = L^2/0.000389 = (0,5)^2/0.000389 = 643 \text{ hari}$

Hasil analisisnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekap Hasil Analisa Waktu Rambatan Air yang Merembes ke Dalam Badan Jalan.

L (cm)	k (cm/hr)	Hari	Bulan
0.50	0.000389	643.00	21.43
1.00	0.000389	2572.02	85.73
1.50	0.000389	5787.04	192.90
2.00	0.000389	10288.07	342.94
2.50	0.000389	16075.10	535.84
3.00	0.000389	23148.15	771.60
3.50	0.000389	31507.20	1050.24
4.00	0.000389	41152.26	1371.74

Dari Tabel 4 menunjukkan bahwa waktu rambatan air untuk merembes ke badan jalan cukup besar, yaitu dengan panjang $L = 0.50 \text{ m}$, waktu yang dibutuhkan air untuk merembes adalah $t = 21.23 \text{ bulan}$, lebih dari musim. Artinya untuk aliran horisontal akibat genangan pada selokan sangat kecil sekali, oleh karena itu untuk melindungi lapisan tanah bagian atas dari pengaruh air, hanya dilakukan dari pengaruh hujan saja, dengan pelindung lapisan beton minimal ketebalannya $= 2.4 \text{ h} = 1.8 \rightarrow h = 1.8/2.4 = 0.75 \text{ cm}$, jadi ketebalan plat beton sebaiknya diambil minimal 0.75 m .

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian seperti yang telah diuraikan di atas, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Resapan air yang berpengaruh terhadap badan jalan, bukan resapan horisontal, akan tetapi yang berpengaruh cukup besar adalah resapan vertikal akibat adanya air hujan saja.
2. Ketebalan pelindung bahu jalan untuk mencegah resapan air vertikal ke bawah, dan untuk mencegah adanya kembang susut, sebaiknya diambil minimal ketebalan 0.75 cm .

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, Joseph E, 1986, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, Mc. Graw Hill, Inc. New York
- Braja M. DAS, 2001, *Principles of Geotechnical Engineering*, United States of America.
- Indrasurya B Mochtar, 2000, *Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah*, Jurusan Teknik Sipil-FTSP-ITS Surabaya.
- Badan Standarisasi Nasional, (2008), SNI 1967:2008 Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah, 25.
- Louafi B., & Bahar R, (2012), SAND: An Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils, 2012 (September), 719-725.
- Hardiyatmo, H. C., (2015), *Perencanaan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta
- Terzaghi et al, (1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Edition, Inc., New York.