



EVALUASI KEKUATAN CAMPURAN PERKERASAN BERASPAL AKIBAT PENGARUH AIR DENGAN CARA PERENDAMAN

Furqon Affandi

RINGKASAN

Tulisan ini menyajikan pengembangan pengujian sensitivitas dari kerusakan akibat air (*moisture damaging MD*) untuk campuran beraspal, pada kondisi beriklim panas dan lembab. Konsep dan pengujian ini didasarkan pada karakteristik sensitivitas kerusakan akibat air dengan kurva durabilitas jangka panjang yang menyatakan variasi kekuatan sisa dengan cara perendaman panas (60°C) sampai 14 hari.

Versi awal dari pengujian ini telah dimodifikasi dengan karakteristik sensitivitas kerusakan akibat air (MD) dengan menggunakan nilai kekuatan sisa pada umur perendaman 6 hari di air panas. Kedua pengujian tersebut telah terbukti sangat baik dibandingkan terhadap pengujian Marshall tradisional dengan perendaman satu hari dalam mendeteksi sensitivitas campuran. Metode yang dimodifikasi ini lebih praktis untuk mengganti metode yang terdahulu yang berdasarkan periode perendaman yang lebih panjang (selama 14 hari) dan dengan jumlah contoh yang banyak.

SUMMARY

This paper dealt with the development of a moisture damage (MD) sensitivity test for bituminous paving mixture under hot and humid climatic condition. The concept and test are based on characterizing the moisture damage sensitivity by long term durability curves that express the variation of retained strength with hot immersion (60°C) time as long as 14 days .

The original version of the test was modified by characterizing MD sensitivity using the retained strength value at 6 days of hot water immersion. Both version of the test have been proven to be superior to the traditional 1 day Marshall immersion test in detecting sensitive mixtures. The modified version is a practical substitute for its former version that was based on longer immersion periods (up to 14 days) and a greater number of sample sets .

I. PENDAHULUAN

Pengaruh air pada penurunan sifat fisik dan perilaku mekanis dari campuran beraspal telah diketahui beberapa tahun yang silam. Untuk mengatasi masalah ini, telah banyak pengujian laboratorium yang telah dikembangkan, dimana semuanya berusaha untuk mengevaluasi sensitivitas campuran terhadap pengaruh akibat air tersebut. Pengujian yang paling umum dan praktis ialah mengukur perubahan perilaku mekanis dari contoh yang telah dipadatkan dengan setelah mengalami perendaman, dimana hasil dari pengujian tersebut dilaporkan dalam bentuk prosentase kekuatan sisa.

Untuk beberapa tahun, pengujian rendaman Marshall, adalah satu-satunya pengujian sensitivitas yang digunakan di beberapa negara, dimana pengujian ini biasanya dimasukkan dalam spesifikasi nasional dengan persyaratan stabilitas sisa akibat rendaman ialah antara 60 - 75 %.

Baru-baru ini, keraguan terhadap kemampuan pengujian untuk mendeteksi sensitivitas campuran telah muncul. Dalam beberapa hal , campuran beraspal dengan agregat yang hydrophilic, yang telah memenuhi kriteria persyaratan dalam spesifikasi, telah mengalami pelepasan butir (stripping) yang sangat cepat, tidak lama setelah penghamparan. Keraguan terhadap kualitas dari pengujian juga muncul

dari beberapa pengguna. Karena itu tujuan dari tulisan ini ialah untuk mengembangkan pengujian yang lebih baik, sedangkan maksudnya ialah untuk menguraikan temuan-temuan yang berkaitan dengan evaluasi laboratorium akibat kerusakan air (moisture damage) terhadap campuran perkerasan beraspal.

II. PENGEMBANGAN PENGUJIAN

Tuntutan dasar dari pengembangan pengujian sensitivitas di laboratorium adalah sebagai berikut :

1. Harus relatif cepat dan sederhana.
2. Produksinya cukup tinggi
3. Harus mendapatkan sesuatu yang berbeda dengan cara yang berbeda.
4. Harus mempunyai dasar analitis yang baik.
5. Peralatan pengujian harus didapatkan di pasaran laboratorium dan pengujian merupakan bagian dari prosedur rutin untuk perencanaan pada job mix formula.
6. Kerusakan akibat air (moisture) hendaknya serupa dengan tingkat kerusakan yang terjadi di lapangan.
7. Kriteria diterima dan ditolak harus didasarkan pada hasil korelasi dengan keadaan lapangan.

Usaha yang telah dibuat untuk mengembangkan dan mengadopsi pengaruh kerusakan akibat air (moisture damage) untuk kondisi lokal, dan ternyata telah terbukti lebih unggul dari pengujian rendaman Marshall ialah

pengujian Durability Index (DI), yang semula ditujukan untuk penelitian, tetapi ternyata telah terbukti baik juga untuk penggunaan lapangan.

2.1 Versi Asli Dari Durability Index (DI)

Pengujian ini didasarkan pada lima set benda uji Marshall yang direndam pada air panas 60°C sampai dengan 14 hari. Masing-masing contoh diuji, setelah direndam pada umur rendaman yang berbeda (0,1,4,7,14 hari) dan dibuatkan grafik antara kekuatan sisa dengan lamanya rendaman yang dinyatakan dengan grafik durability. (Gambar 1). Parameter kekuatan yang digunakan biasanya ialah stabilitas Marshall, dan yang lainnya ialah resilient modulus.

Kerusakan akibat air (Moisture Damage ; MD) dari suatu campuran yang diuji, dinyatakan dengan Durability Index (DI) atau Equivalent Retain Strength (ERS). DI didefinisikan sebagai harga rata-rata dari luas kekuatan yang hilang antara garis durabilitas dan garis $S_0 = 100$ persen. Dari gambar 1, DI bisa dinyatakan sebagai berikut :

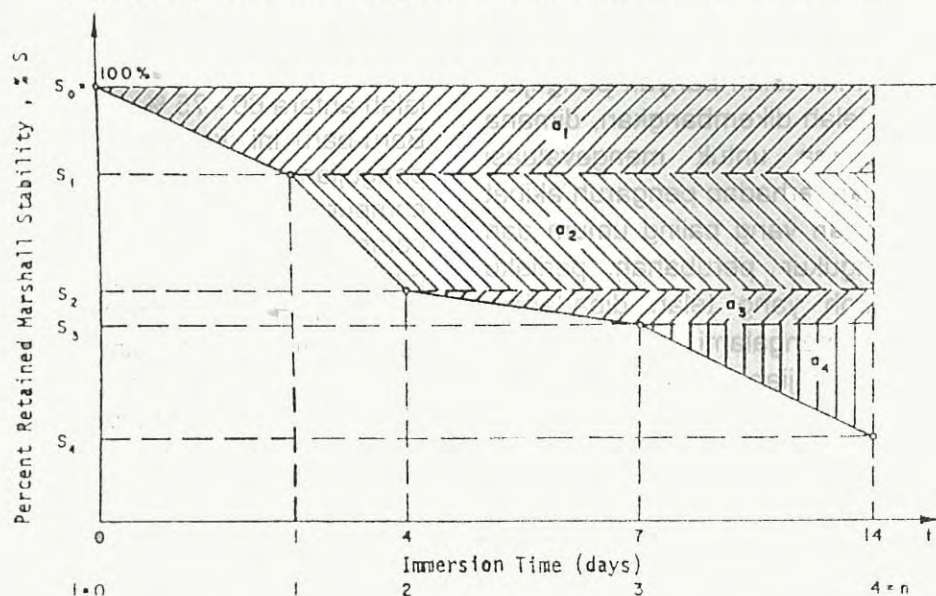
$$DI = \left(\frac{1}{tn} \right) \sum_{i=1}^n a_i = \left(\frac{1}{2tn} \right) \sum_{i=0}^{N-1} (S_i - S_{i+1}) \times [2tn - t_i + t_{i+1}] \quad (1)$$

dimana :

S_{i+1} = prosentase kekuatan sisa pada waktu $t = i + 1$.

S_i = prosentase kekuatan sisa pada saat t_i , t_{i+1} = waktu rendaman (dari awal pengujian).

Gambar 1
KURVA DURABILITAS
(Dengan parameter yang menyatakan durabilitas tersebut)



Perlu dicatat bahwa penambahan luas (ai) didefinisikan sebagai bagian horizontal, sebab hal itu menyatakan sumbangan relatif dari penambahan waktu rendaman terhadap kehilangan kekuatan total. Dalam hal ini, perbandingan relatif dari penambahan waktu awal adalah lebih besar dari penambahan waktu akhir.

DI menyatakan ekivalen dari kehilangan kekuatan 1 hari. Nilai *DI* yang positif menyatakan kehilangan kekuatan, sedangkan yang negatif menyatakan kenaikan kekuatan. Berdasarkan definisi, $DI < 100$.

Konsekwensinya, memungkinkan untuk menyatakan persentase ERS 1 hari sebagai berikut :

$$ERS = (100 - DI) \quad (2)$$

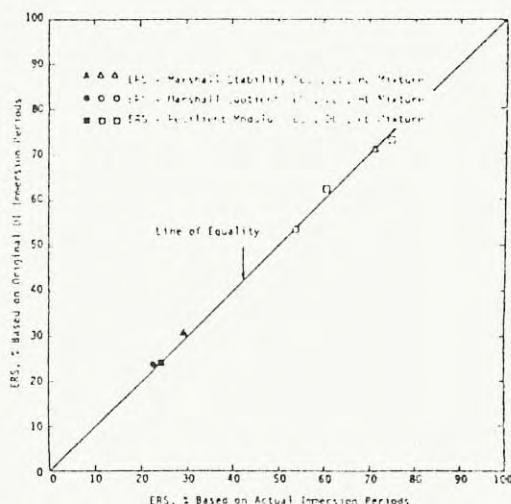
Yang perlu dicatat, meskipun lima waktu periode rendaman digunakan untuk menyatakan umur rendaman sampai dengan 14 hari, studi studi terakhir menyatakan bahwa tidak ada perubahan pada nilai ERS yang dihasilkan, walaupun periode peningkatan pengujian (sampai setiap hari , pengujian) ditambah. Lihat Gambar 2.

Pengalaman telah menunjukkan bahwa penggunaan pengujian Marshall dapat dipertanggungjawabkan untuk mendeteksi sensitivitas MD. Pengujian ini juga digunakan, sebab metode dan peralatan pengujianya umum digunakan pada teknologi perkerasan.

Akan tetapi lama perendaman dan jumlah contoh yang banyak tidak sesuai dengan tuntutan no 1 dan 5 seperti disebutkan dimuka.

Gambar 2.

EKIVALEN NILAI KEKUATAN SISA UNTUK BERBAGAI PERIODE RENDAMAN TERHADAP NILAI BERDASARKAN PROSEDUR *DI* ASLI



Karena itu usaha yang baru, harus dilakukan untuk memperbaiki keterbatasan tersebut.

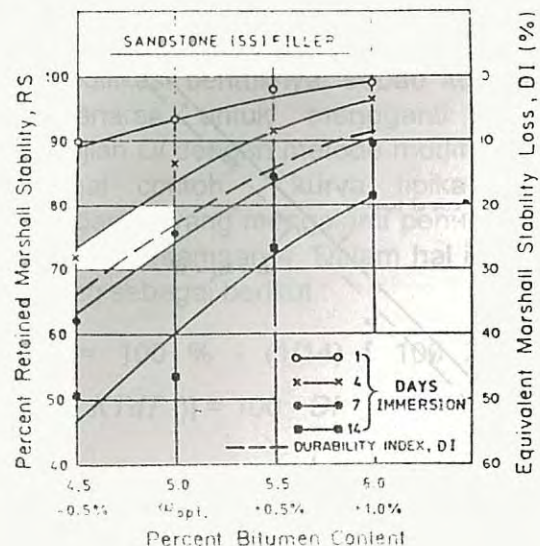
III. PENGEMBANGAN VERSI MODIFIKASI DARI DURABILITY INDEX (*DI*)

Pengumpulan dari sejumlah kurva durabilitas yang berdasarkan pada nilai stabilitas sisa Marshall yang didapat dari prosedur pengujian *DI* memperlihatkan phenomena yang sangat menarik antara umur rendaman 4 dan 7 hari. Bilamana kekuatan sisa dan kadar aspa diplotkan, terlihat bahwa kurva yang menyatakan ekivalen kehilangan kekuatan (*DI*) biasanya terletak pada daerah yang dibatasi oleh umur rendaman 4 dan 7 hari. Hal ini menimbulkan suatu ide bahwa seluruh kurva durabilitas bisa diganti dengan nilai kekuatan sisa pada umur 5 atau 6 hari. (Gambar 3).

Usaha yang pertama untuk mendukung anggapan ini telah dibuat tiga campuran dengan periode masa rendaman sebagaimana ditentukan pada versi aslinya, ditambah dengan tambahan pengujian setelah 5 hari perendaman. Campuran terdiri dari agregat basalt dan aspal pen 60 -70, akan tetapi variasi pada tipe filer dan prosentase rongga permeabel dalam campuran (Tabel 1) melengkapi kebutuhan variabilitas dari ketahanan MD. Kekuatan sisa sebagaimana dibutuhkan oleh versi asli *DI*, begitu juga setelah rendaman 5 hari, dihitung dengan berdasarkan tiga parameter mekanis(Marshall Stabilitas, Marshall Quotient, dan Resilient Modulus) ditunjukan pada Gambar 4.

Gambar 3

PENGARUH KADAR ASPAL TERHADAP DURABILITAS UNTUK BERBAGAI WAKTU RENDAMAN



Disebabkan semua nilai pada Gambar 4 jatuh disebelah kanan dari garis kesamaan (equality), maka hal itu semakin nyata bahwa umur perendaman 5 hari tidaklah cukup, karenanya umur rendaman 6 hari perlu dicoba.

Pertama, nilai kekuatan sisa teoritis pada rendaman 6 hari dihitung dari kurva durabilitas yang diturunkan dari berbagai studi, dengan menganggap penurunan linier dari kekuatan sisa antar 4 atau 5 hari dengan 7 hari rendaman, selanjutnya dibandingkan dengan nilai asli dari pengujian *DI*. Pada umur ini, tingkat kecocokan sangat tinggi, dengan nilai koefisien variasi 0,99 dari 36 contoh yang diselidiki, sebagaimana terlihat pada Gambar 5. Berdasarkan derajat korelasi yang tinggi tersebut, maka dibuat himpunan data dari berbagai tipe campuran, dimana pengujian durabilitas didasarkan atas versi pengujian asli

DI, dan juga modifikasi, dengan prosedur pengujian yang diperpendek menjadi 6 hari.. Pengalaman dari berbagai tipe campuran (konvensional hot mix, daur ulang campuran panas, aspal pen 60 -70, aspal emulsi HFMS 2h dll) sebagai mana terlihat pada Tabel 2 menunjukkan hasil yang cukup baik, dan karenanya diputuskan untuk mengganti nilai ERS dari pengujian asli *DI* dengan satu nilai pada rendaman 6 hari. Secara praktis hal itu berarti mengurangi jumlah pengujian dari 5 menjadi 3 (0,1 dan 6 hari rendaman), jadi mengurangi masa total perendaman dari 14 hari ke 6 hari. Nilai kekuatan sisa pada satu hari dibutuhkan untuk tujuan pengontrolan. Pemindahan terhadap versi dengan umur rendaman yang lebih pendek didukung tidak hanya dengan pengalaman, tetapi juga dengan pertimbangan teoritis.

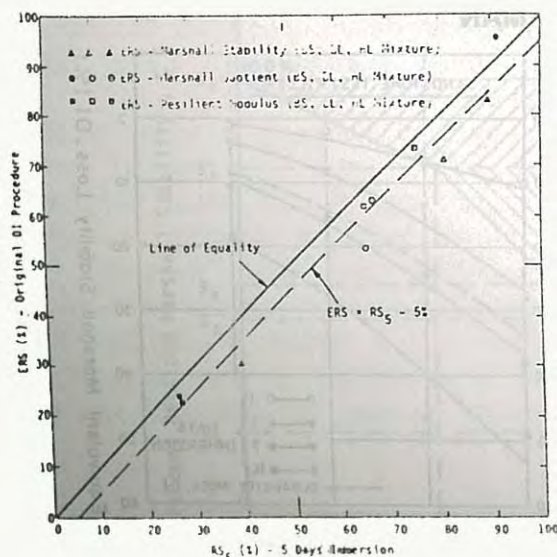
Tabel 1
SIFAT CAMPURAN YANG DIGUNAKAN

Filler Designation	Filler Type	ω_{opt}^a (%)	ω_{act}^a (%)	Mixture Density (kg/m ³)	Marshall Stability (lb)	Resilient Modulus at 25°C (kg/m ²)	Tensile Strength (psi)	Flow (1/100 in.)	Marshall Quotient (lb/in. $\times 10^{-2}$)	Air Voids (%)	Bitumen Saturation (%)	VMA (%)	Permeable Voids ^b (%)
BS	Basalt	6.0	5.5	2394	2,217	37 812	114.5	15.3	114.9	6.83	54.71	15.08	4.8
HL	Hydrated lime	7.0	6.5	2362	1,933	34 580	91.9	18.3	105.6	6.02	64.45	16.93	3.9
DL	Dolomite	5.0	5.0	2454	3,072	32 912	126.9	18.1	169.7	4.65	63.09	12.59	2.8

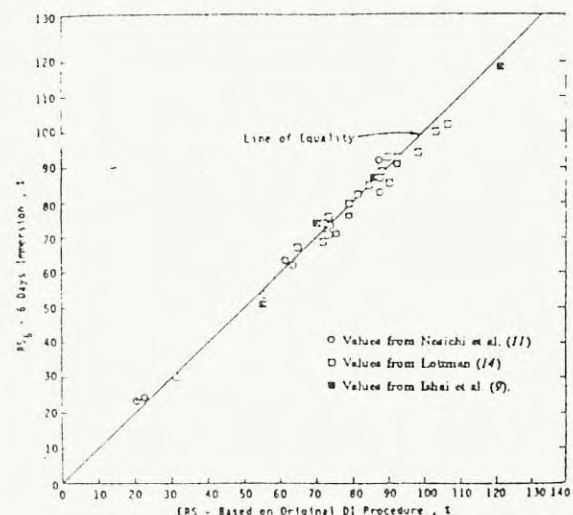
^aPercentages of total mixture weight, ω_{opt} , ω_{act} – optimum and actual bitumen contents, respectively.

^bLottman's procedures (5).

Gambar 4
EKIVALENSI NILAI KEKUATAN SISA BERDASARKAN PADA PROSEDUR ASLI *DI* DENGAN KEKUATAN SISA SETELAH 5 HARI RENDAMAN.



Gambar 5
NILAI KEKUATAN SISA SETELAH 6 HARI RENDAMAN TERHADAP NILAI KEKUATAN SISA DENGAN PROSEDUR ASLI.



Tabel 2
PERBANDINGAN ANTARA ERS DAN RS₆ UNTUK BERBAGAI CAMPURAN

Description of Mixture	ERS (%)	RS ₆ (%)	Reference
Dense-graded asphalt concrete, 5.5% 60-70 bitumen, dolomite aggregate	54	51	18
Dense-graded asphalt concrete, 7% HIFMS-2h hot emulsion, dolomite aggregate	62	63	18
Dense-graded recycled mix, 2% HIFMS-2h hot emulsion	75	74	18
Dense-graded asphalt concrete, PPA/VTB (43%/57%) bitumen, basalt aggregate	69	64	19
Dense-graded asphalt concrete, PPA/EXT (83%/17%) bitumen, basalt aggregate	53	48	19
Dense-graded asphalt concrete, PPA/EXT (85%/15%) bitumen, basalt aggregate	67	64	19
Dense-graded asphalt concrete, PPA/EXT (83%/17%) bitumen, dolomite aggregate	83	80	19
Dense-graded asphalt concrete 5% 60-70 bitumen, Israeli Specification 52 gradation	71	69	Unpublished data, 1987
Dense-graded asphalt concrete, 4.5% 60-70 bitumen, French LCPC gradation	86	85	Unpublished data, 1987

IV. MODIFIKASI PENGUJIAN *DI*, DITINJAU DARI PERTIMBANGAN TEORITIS

Salah satu gambaran yang menarik dari kurva durabilitas yang menyatakan perilaku campuran dengan pengujian versi asli (pertama) dari pengujian *DI*, bahwa itu bisa dinyatakan dengan fungsi matematik dalam bentuk sebagai berikut :

$$St = So e^{-KT} \quad (3)$$

dimana :

So = nilai kekuatan awal (pada umur rendaman nol hari) dalam satuan kekuatan atau stabilitas.

St = nilai kekuatan setelah rendaman selama T hari.

K = konstanta yang menyatakan tingkat derajat MD.

Dalam hal menyatakan kekuatan relatif (kekuatan sisa), S diganti dengan RS dan persamaan matematis disederhanakan menjadi :

$$RS_T (\%) = 100 E^{-KT} \quad (4)$$

Hal ini sangat menarik untuk dicatat, bahwa fungsi yang sama telah ditemukan untuk digunakan pada pengujian sensitivitas MD lainnya, seperti pengujian Cyclic TSR, dan

pengujian cyclic water vacuum saturation yang diikuti oleh pengujian kuat tekan.

Meskipun fungsi tersebut serupa untuk hampir semua campuran perkerasan, ada dua hal pengecualian sebagai berikut :

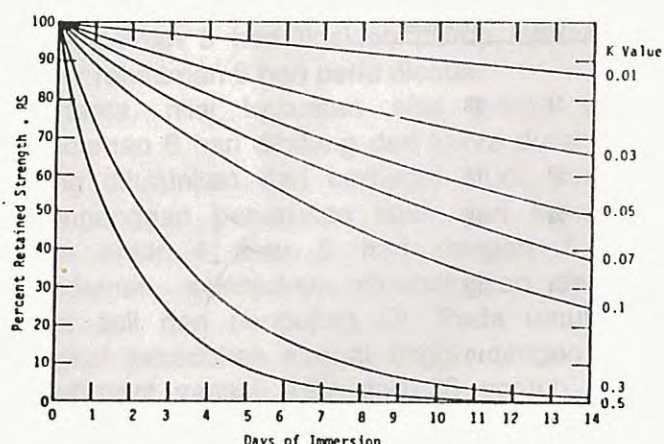
1. Campuran stabilisasi (dimana filer kapur menggantikan bagian dari campuran asli), yang akan menunjukkan perkuatan selama perendaman, dan
2. Campuran yang sangat sensitif, yang akan buyar pada rendaman kurang dari satu hari (bila glas bead filer, menggantikan bahan asli.)

Bisanya kurva durabilitas digambarkan dengan rumus 4. dimana hal tersebut adalah hal yang sangat penting untuk pengujian *DI* dan memodifikasi bentuknya, sebab itu merupakan pembenaran untuk mengganti versi asal pengujian *DI* dengan metode modifikasi lainnya. Sebagai contoh, kurva tipikal durabilitas (Gambar 6), yang mengalami penurunan sesuai dengan persamaan 4. Dalam hal ini, ERS bisa dihitung sebagai berikut :

$$ERS = 100 \% - (1/14) [100 \times 14 - 100 \{ \int_0^{14} e^{-KTdT} \}] = 100 - DI \quad (5)$$

Persamaan ini ekuivalen dengan bentuk persamaan 1 dan 2.

Gambar 6.
BERBAGAI KURVA DURABILITAS TEORITIS



Sebagaimana disinggung dimuka , dan diperlihatkan pada Gambar 5 , perhitungan berdasarkan pengukuran hilangnya kekuatan harian dari contoh yang direndam terhadap perhitungan berdasarkan pengujian asli *DI* menunjukan korelasi durabilitas yang sangat baik dari kedua prosedur tersebut.

Karenanya penggunaan persamaan 5 diakui kebenarannya. Selanjutnya nilai RS setelah perendaman 6 hari bisa dihitung sebagai berikut

$$RS_6 = 100 e^{-K6} \quad (6)$$

Sensitivitas dari kerusakan terhadap air (moisture damage) bisa diperlihatkan dengan membandingkan hasil RS untuk berbagai nilai K (tabel 3 dan Gambar 6). Perbandingan ini menunjukan bahwa adanya kesesuaian yang baik antara hasil yang didapat dengan cara prosedur asli dan yang telah dimodifikasi.

Deviasi yang besar pada $RS < 25 \%$ tidak begitu penting sebab contoh ada dalam keadaan rusak berat.

Persamaan 4 bisa menimbulkan pandangan baru pada pengujian dan kriteria Marshall rendaman. Di beberapa negara batas penerimaan dan penolakan dari hasil pengujian ini, Tabel 3. Nilai dari *DI*, ERS, RS₆ dan RS₁₄ sebagai fungsi dari K ialah $RS = 75 \%$. Berdasarkan pada persamaan 4, hal ini ekuivalen dengan dengan $ERS \approx RS_6 \approx 18$ persen.

Pengalaman di Israel menyarankan bahwa nilai ini jauh dibawah dari nilai minimum yang diterima untuk ERS (atau RS₆), dimana lebih kurang sekitar 50%, (ekuivalen dengan nilai RS₁ ≈ 89 persen pada pengujian tradisional).

Anggaplah bahwa pengurangan pada kekuatan mekanis dari pengujian *DI* menyatakan perkembangan kerusakan akibat air pada keadaan kondisi lokal (panas, lembab, dan hujan), kenaikan stabilitas rendaman Marshall pada kriteria RS lebih kurang sekitar 14 % akan berarti meningkatkan stabilitas sisa pada jangka panjang dengan angka 2,8 kalinya.

Kriteria ERS atau RS₆ adalah lebih baik dari kriteria 1 hari (RS₁) sebab kriteria tersebut menunjukan perilaku keawetan jangka panjang dari suatu campuran atau bahan stabilisasi terhadap perkembangan kerusakan akibat air (kurva durabilitas). Pada RS₁ kurvanya cukup tajam dan sensitif sedangkan pada RS₆ (yang ekuivalen dengan ERS) fungsinya adalah stabil dan datar.

Tabel 3.
NILAI DARI *DI*, ERS, RS₆ DAN RS₁₄ SEBAGAI FUNGSI DARI K

K	<i>DI</i>	ERS (%)	RS ₆ (%)	RS ₁₄ (%)
0,01	6,68	93,31	94,17	86,90
0,03	18,34	81,65	83,50	65,70
0,05	28,08	71,91	74,08	49,60
0,07	36,26	63,74	65,70	37,50
0,10	46,18	53,82	54,90	24,60
0,30	76,55	23,45	16,50	1,50
0,50	85,73	14,27	4,97	0,10

V. PENGGUNAAN PRAKTIS DARI PENGUJIAN MODIFIKASI DURABILITY INDEX (DI)

Berikut ini langkah langkah yang disarankan untuk penggunaan praktis dari pengujian modifikasi durabilitas index (DI)

1. Siapkan tiga set benda uji Marshall atau yang sejenis (paling sedikit dua buah per set)
2. Uji masing masing set benda uji tersebut setelah perendaman 0,1, dan 6 hari untuk mendapatkan stabilitas Marshallnya (atau pengujian kekuatan lainnya)
3. Hitung kekuatan sisa setelah perendaman 1 dan 6 hari.
4. Gunakan persamaan :

$$K = [\ln (RS/100) / T] \quad (7)$$
 hitung nilai K untuk data yang diberikan pada tabel dibawah ini :

T (hari)	RS (%)	Tanda dari K
1	RS ₁	K ₁
6	RS ₆	K ₆
6	RS ₆₊₅	K ₆₊
6	RS ₆₋₅	K ₆₋

5. Periksa bahwa kondisinya adalah memenuhi ketentuan sebagai berikut :

$$K_6^+ < K_1 < K_6^-$$

Kondisi ini diperlukan untuk menjamin bahwa kekuatan sisa pada umur 1 dan 6 hari adalah baik. Jika kondisi ini tidak memuaskan , ulangi lagi.

6. Laporkan sensitivitas MD dari campuran adalah sebagai nilai dari kekuatan sisa setelah rendaman 6 hari.
7. Jika campuran sangat peka terhadap kerusakan akibat kadar air (RS₁ → 0) , tinggalkan langkah 4 - 6 dan laporan mengenai sensitivitas akibat MD ialah RS₁.
8. Jika campuran adalah stabilisasi (RS₁ > 100% dan RS₆ > 95%) , sensitivitas MD ialah nilai pada RS₆ dan tinggalkan langkah 4 - 7.

VI. KESIMPULAN dan SARAN

Kesimpulan

1. Konsep dan pengujian didasarkan pada sensitivitas kerusakan akibat kadar air yang dinyatakan dengan kurva durabilitas yang menyatakan variasi kekuatan sisa akibat rendaman (pada 60 C) sampai dengan 14 hari, yang selanjutnya dimodifikasi dengan masa rendaman pada air panas selama 6 hari.
2. Kedua versi pengujian tersebut di atas telah terbukti lebih baik dari pengujian tradisional dengan rendaman satu hari untuk mengetahui sensitivits campuran .
3. Versi modifikasi lebih praktis dari pada metoda yang biasa, dimana metoda yang biasa tersebut memerlukan waktu perendaman sampai 14 hari serta contoh yang lebih banyak.
4. Hasil pengembangan versi baru ini, didukung oleh percobaan laboratorium dan lapangan , begitu juga dengan pendekatan teoritis.

Saran

1. Pengujian dengan Marshall, sebaiknya diganti dengan pengujian lain yang sifatnya lebih fundamental seperti: resilient modulus, kuat tarik langsung, yang juga akan menghasilkan jumlah contoh yang lebih sedikit.
2. Usahakan untuk mendapatkan masa rendaman yang lebih singkat lagi, misalnya dengan penambahan pemakuman pada saat perendaman. Hal ini akan mempercepat pengembangan MD, dan mungkin hasil MD yang sama akan dicapai dalam waktu yang lebih singkat lagi.
3. Diperlukan pengembangan kualiti kontrol standar berdasarkan statistik untuk digunakan sebagai kriteria batas penerimaan atau penolakan suatu campuran.

Daftar Pustaka.

1. A.D Dow. Discussion of Application and Present Status of the Immersion - Compression Test by J.T and J.F Goode, Proc., Association of Asphalt Paving Technologist, Vol.16,1974,p 392
2. Engineering and Design - Flexible Airfield Pavements - Airforce, Em 1110 - 45 - 302 . US Army Corps of Engineers, Augs. 1978, Appendix V
3. Ilan Ishai and Simon Nesichi. Laboratory Evaluation of Moisture Damage to Bituminous Paving Mixtures by Long Term Hot Immersion, Transportation Research Record 1171, 1988
4. Craus, I. Ishai, and A. Sides. Durability of Bituminous Paving Mixture as Related to Filler Type and Properties, Proc., Association of Asphalt Paving Technologist, Vol 50, 1981, pp. 291 - 316.
5. R.J Schmidt and P.E.Graf. The Effect of Water on Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes . Proc., Association of Asphalt Paving Technologist, Vol 41, 1972, pp. 118 - 162.
6. S.Nesichi , I. Ishai, M. Livneh, and J. Craus. Investigation of Durability Properties of Bituminous Concrete for Highway and Airport. Research Report 85 - 68 . Transportation Research Institute, June 1985.

Penulis :

Ir. Furqon Affandi, Msc. Peneliti Muda Bidang Perkerasan Jalan, Pusat Litbang Jalan.



KEKUATAN STONE COLUMN

M. Suherman

RINGKASAN

Prinsip dari percobaan pembebanan stone column adalah menekan column bagian atas dengan suatu gaya tekan yang menyebabkan penembusan pada tanah sampai terjadi keruntuhan.

Tujuan dari metode ini untuk menentukan besarnya beban batas dari stone column dan penurunannya.

Stone column merupakan suatu perbaikan tanah terdiri dari lobang vertikal dalam tanah yang diisi dengan batu pecah dan membentuk penyangga atau tiang yang terasmi oleh tanah.

Fungsi dari stone column dalam perbaikan tanah lembek merupakan tulangan dalam perkuatan tanah dan juga bertindak sebagai drainase vertikal agar konsolidasi dapat lebih cepat akibat pembebanan di atasnya.

Karena modulus dari stone column relatif lebih tinggi, maka beban vertikal pada tanah, bagian yang lebih besar akan diterima oleh tiang batu pecah.

SUMMARY

The principal of stone column loading test is to compress a column top with the compressive force to cause its to penetrate the soil until failure occurs. The aim of this method is to determine the ultimate load on stone column and settlement.

Stone column is a soil improvement consists in forming vertical holes in the ground which are filled with rock to form columns or piles confined by the soil.

The function of stone column in soft soil improvement is to provide strength reinforcement to the soil and they act as vertical drains to enable consolidation to occur quickly under surface loading.

Because of the relatively high modulus of the columns, a large proportion of the vertical load applied to the ground surface is transferred to the columns.

I. PENDAHULUAN

Perbaikan tanah lembek yang sering dilakukan pada pembuatan timbunan badan jalan merupakan suatu upaya untuk mendapatkan konstruksi jalan yang mantap. Tujuan utama dari perbaikan tanah lembek ini adalah agar setelah pembangunan jalan tersebut selesai diharapkan tidak menimbulkan masalah yang berkaitan dengan amblesan atau longsoran.

Tanah kohesip seperti lempung atau lanau dalam kondisi jenuh air akan mempunyai sifat daya dukung rendah serta kompresibilitas tinggi, sehingga tanah ini tidak mampu mendukung beban timbunan yang tinggi dan penurunan yang terjadi cukup besar.

Untuk mengatasi masalah daya dukung dan penurunan maka salah satu teknik perbaikan

tanah adalah dengan menggunakan " Stone column" yaitu tiang kerikil atau batu pecah yang ditanam secara tegak dalam tanah lembek. Cara ini dapat berfungsi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan juga sebagai media pengalir air pori dalam mempercepat proses penurunan konsolidasi.

Stone column sebagai fungsi untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar harus mampu mendukung beban timbunan yang berada di atasnya tanpa terjadi deformasi yang berarti. Oleh karena itu maka perlu untuk diketahui kemampuan dari setiap individu stone column secara nyata di lapangan, sehingga perencanaan perbaikan tanah tersebut akan lebih efisien.

Untuk mengetahui kekuatan dari stone column ini maka telah dilakukan percobaan pembebanan terhadap tiang batu pecah yang terpasang pada lokasi rencana jalan toll Padalarang - Cileunyi. Percobaan pembebanan terhadap stone column tunggal ini dilakukan pada bulan Agustus 1989.

Teknik perbaikan tanah dengan vertikal drain ini dipadukan dengan teknik kompresi yaitu dengan memberikan beban tambahan agar tanah dasar lebih dahulu mengalami penurunan konsolidasi sebelum konstruksi sesungguhnya diterapkan.

II. STONE COLUMN

Stone column sebagai perbaikan tanah lembek dapat menambah daya dukung tanah dasar, disebabkan bahwa material kerikil mempunyai sudut geser dalam yang lebih besar dari sudut geser tanah dasar.

Dengan terpasangnya stone column dalam tanah lembek maka beban timbunan yang tadinya dipikul oleh satu komponen tanah dasar, sekarang menjadi dua komponen yaitu stone column dan tanah dasar.

Tekanan yang diakibatkan dari beban timbunan dan beban lainnya akan dipikul bersama, namun besarnya beban yang diterima masing - masing komponen tidak sama besar dan tergantung dari modulus deformasi dari bahan tersebut.

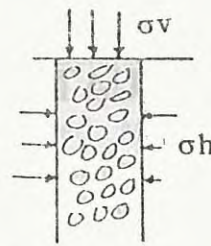
2.1. Prinsip Dasar

Stone column dapat berdiri tegak apabila tanah di sekelilingnya mampu menopang tiang batu pecah ini, kekuatannya pun akan tergantung dari parameter kohesi (c_u) tanah pendukung dan parameter sudut geser dalam (θ) dari stone column tersebut.

a. Daya Dukung Stone Column

Daya dukung untuk stone column harus didisain terhadap besarnya beban yang akan diterimanya, sehingga tegangan kritis dari individu konstruksi tersebut tidak terlampaui.

Persamaan daya dukung stone column tunggal dapat dinyatakan sebagai berikut :



$$\sigma_v = k_{pc} \times \sigma_h$$

$$K_{pc} = \frac{1 + \sin \theta_c}{1 - \sin \theta_c}$$

dimana :

σ_v = tegangan stone column (t/m^2)

σ_h = tegangan tanah di sekelilingnya (t/m^2)

K_{pc} = koefisien tekanan pasip stone column

θ_c = sudut geser dalam stone column

b. Waktu Penurunan

Waktu yang dibutuhkan untuk proses penurunan konsolidasi pada tanah lembek akan tergantung dari jarak tempuh air pori dan harga koefisien pemampatan.

Pengaliran air pori tanpa vertikal drain biasanya menempuh ke arah vertikal, sedangkan setelah dipasang stone column menjadi ke arah radial (horisontal).

Lamanya waktu dari proses konsolidasi tanah dengan adanya stone column, dapat dinyatakan dalam persamaan di bawah ini :

$$t = \frac{Tr. (1/2De)^2}{Cr}$$

dimana :

t = waktu konsolidasi (th)

De = jarak tempuh air pori (m)

Tr = faktor waktu arah radial

Cr = koefisien konsolidasi radial (m^2/th)

2.2 Pola Pemasangan

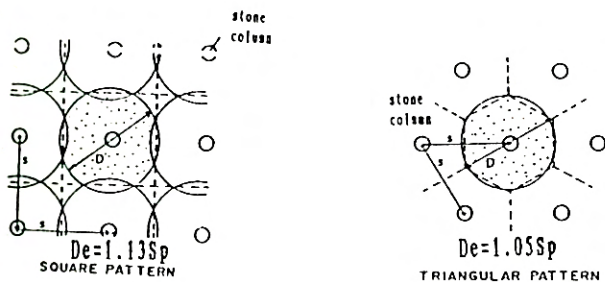
Cara penempatan konstruksi dari stone column ini sama dengan cara vertikal drain lainnya, yaitu dapat berbentuk pola segitiga (triangular pattern) ataupun pola segi empat (square pattern).

Bentuk pola ini akan berpengaruh terhadap diameter ekuivalen dari jarak tempuh air pori sewaktu proses konsolidasi berlangsung.

Diameter ekuivalen untuk pola segitiga $De = 1.05 Sp$, sedangkan untuk pola segi empat $De = 1.13 Sp$, dimana Sp adalah jarak antar column.

Macam dari pola pemasangan stone column serta daerah pengaruhnya dapat dilihat seperti gambar di bawah ini.

Gambar 1.
POLA DAN DAERAH PENGARUH
VERTIKAL DRAIN



III. PENYELIDIKAN TANAH

Tanah dasar yang akan ditempati oleh stone column perlu diketahui sifat teknik dan sifat fisiknya, sehingga penyelidikan tanah di lokasi ini perlu sekali untuk dilakukan.

Penyelidikan tanah yang telah dilakukan meliputi penyelidikan lapangan dan pengujian laboratorium. Penyelidikan lapangan meliputi: penyondiran, pemboran tangan dan pengambilan contoh tanah, sedangkan pengujian laboratorium meliputi: uji kekuatan dan klasifikasi.

Adapun uraian kegiatan penyelidikan tanah adalah sebagai berikut :

3.1. Penyondiran

Penyelidikan tanah dengan alat sondir menggunakan sondir ringan serta alat penetrasi bikonus yang dapat menghasilkan data kekuatan tanah dan hambatan lekatnya.

Penyondiran ini mencapai kedalaman 30.00 meter di bawah muka tanah setempat, dan sampai kedalaman tersebut masih belum dijumpai lapisan tanah keras.

Penyondiran yang telah dilakukan sebanyak 2 titik sondir.

3.2. Pemboran tangan

Pemboran tanah secara manual telah dilakukan dengan menggunakan mata bor. Pemboran mencapai kedalaman 10.00 meter di bawah permukaan tanah, yang ditempatkan dekat titik penyondiran.

Dengan adanya hasil pemboran ini, maka susunan lapisan tanah di lokasi ini dapat diketahui jenis dan konsistensinya. Pemboran yang telah dilakukan sebanyak 2 titik lobang bor.

3.3. Pengambilan contoh

Pengambilan contoh tanah sebagai sampel terhadap obyek yang diteliti, maka tempat contoh yang diambil mewakili dari populasi untuk penelitian.

Contoh tanah yang telah diambil dengan menggunakan tabung sebanyak 2 contoh yaitu dari kedua lobang pemboran.

3.4. Pengujian laboratorium

Pengujian laboratorium terhadap contoh tanah yang diambil dari lapangan meliputi triaxial, pemampatan, saringan berat isi dan atterberg.

3.5. Hasil penyelidikan

Dari kegiatan tersebut di atas, maka penyelidikan tanah di lapangan dan pengujian di laboratorium memberikan hasil sebagai berikut :

Kedalaman (M)	Jenis Tanah	Nilai Sondir (Kg/cm ²)	Hasil Laboratorium
0.00 - 1.50	tanah timbunan	10 - 30	c=0.28.52kg/cm ² θ=10° - 13° Cc=0.42 - 2.90 Cv=2.78-3.55cm ² /dt lolos#200=90-93 %
1.50 - 4.00	lempung lanau hitam	3 - 10	
4.00 - 10.00	lanau lempungan abu-abu hitam	1 - 4	
10.0 - 12.00	-	4 - 10	
12.0 - 18.00	-	2 - 4	
18.0 - 22.00	-	10 - 25	
22.0 - 30.00	-	4 - 6	

IV. PERCOBAAN PEMBEBANAN

4.1. Pemasangan Stone Column

Stone column yang dipasang pada lokasi rencana jalan toll Padalarang-Cileunyi yaitu di bawah timbunan oprit jembatan antara lintasan jalan raya dengan jalan kereta api tepatnya pada Sta 41+840.

Batu pecah yang digunakan dalam perbaikan tanah ini berukuran 2.00 - 7.00 cm yang dimasukan ke dalam tanah lembek dengan

peralatan crane yang dilengkapi dengan alat pemadat getar (vibroflot).

Jarak antara tiang - tiang batu pecah yang satu dengan yang lainnya adalah $S_p = 2.00$ meter untuk rencana tinggi timbunan $H = 4.00$ meter, sedangkan untuk tinggi timbunan $H = 6.00$ meter jarak antar column $S_p = 1.80$ meter dengan pola pemasangan dibuat secara segitiga.

Setelah dilakukan pemasangan, maka diameter stone column yang terjadi sebesar $\phi = 0.90$ meter, dengan mencapai kedalaman 18.00 meter di bawah muka tanah setempat.

Susunan pemasangan dari stone column dapat dilihat pada gambar 4

4.2. Pembebanan

Pembebanan ini dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan stone column secara individu dalam menahan beban yang akan dipikulnya nanti, karena apabila kekuatan stone column ini dilampaui oleh beban timbunan dan beban lainnya yang berada di atasnya, maka keruntuhan akan terjadi.

a. Peralatan

Alat pemberi beban yang digunakan berupa hydarulic jack yang dilengkapi dengan pompa dan manometernya. Kapasitas kekuatan pikul dari jack dan alat baca pengukur besarnya beban (manometer) mempunyai kemampuan sebesar 180 ton.

Alat pengukur penurunan atau penetrasi yang digunakan adalah dial gauge sebanyak 2 buah dengan panjang tangkai masing masing 7.50 cm dan 10.00 cm, yang mempunyai ketelitian 0.001 inchi.

b. Beban Kontra

Sebagai penahan di atas jack telah dibuatkan beban kontra yang terdiri dari besi - besi profil WF 30 cm sebanyak 8 buah. Profil ini disusun sedemikian rupa sehingga membentuk meja beban, yang di atasnya ditumpuk secara teratur balok beton berukuran $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ m³ sebagai pemberat.

c. Sistem Pembebanan

Dalam percobaan pembebanan ini digunakan sistem bertahap yaitu beban diberikan secara sedikit demi sedikit agar dapat mengetahui perilaku dari stone column pada setiap tahapan pembebanan.

Tahapan pembebanan yang diberikan adalah : 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, dan 46 ton.

Setiap tahap pemberian beban, penurunan yang terjadi pada dial gauge selalu dibaca dan dicatat pada setiap interval waktu tertentu.

Beban kemudian ditambahkan apabila penurunan pada pembebanan sebelumnya telah berhenti atau dianggap berhenti karena perbedaan penurunan yang sangat kecil.

Begitulah selanjutnya sampai pembebanan yang terakhir.

Sistem pembebanan dan konstruksi beban kontra seperti tampak pada gambar 3.

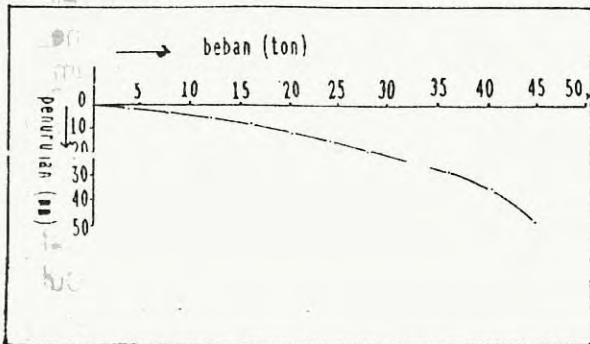
4.3. Hasil Pengujian

Hasil pengamatan penurunan dari setiap tahapan pemberian beban dan lamanya waktu pembacaan, disajikan seperti tabel di bawah ini.

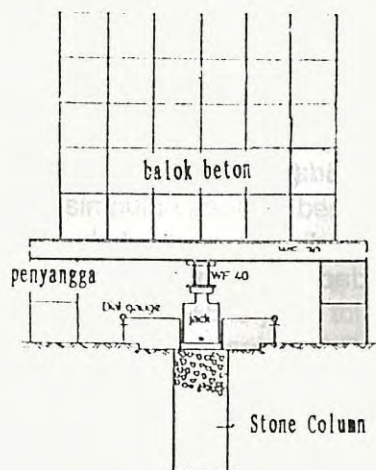
Beban (ton)	Penurunan (mm)	Waktu (jam)
4	1.15	3
8	3.50	4
12	5.48	4
16	8.46	7
20	10.47	5
24	12.93	7
28	16.07	4
32	20.18	4
36	23.69	5
40	28.94	4
44	43.36	11
46	44.93	3

Dari hasil pengamatan di atas, maka dibuat suatu grafik untuk mengetahui perilaku hubungan antara beban dan penurunan.

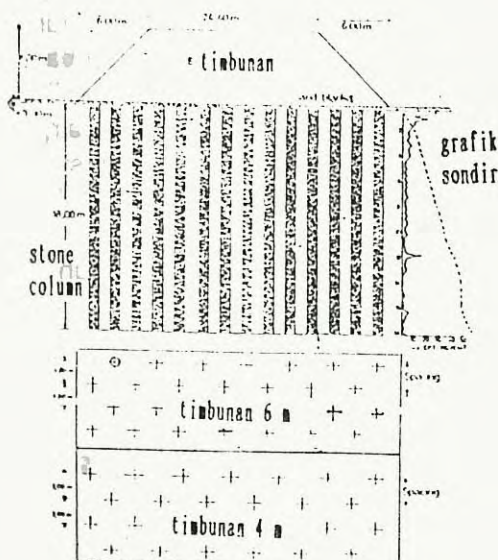
Gambar 2
GRAFIK HUBUNGAN BEBAN - PENURUNAN



Gambar 3
PERCOBAAN PEMBEBANAN



Gambar 4
STONE COLUMN DI BAWAH TIMBUNAN DAN SITUASINYA



V. ANALISIS DAN EVALUASI

Stone column yang ditempatkan di bawah timbunan didisain untuk memikul beban dari timbunan dan beban lainnya. Di samping berfungsi sebagai peningkatan daya dukung tanah dasar, juga berfungsi sebagai drainase untuk mengalirkan air pori ke luar dari dalam tanah. Untuk itu maka analisis dan evaluasi dititik beratkan kepada masalah kekuatan dan penurunan.

Berdasarkan hasil percobaan pembebanan di atas, maka selanjutnya digambarkan dalam bentuk grafik hubungan antara beban dan penurunan.

5.1. Modulus Deformasi

Dari grafik ini, terlihat bahwa sampai beban sebesar $P = 28$ ton, penurunan yang terjadi sebesar $s = 16 \text{ mm} = 0.016 \text{ m}$.

$$E_c = \frac{P}{s \times d} = \frac{28}{0.16 \times 0.90} = 1944 \sim 2000 \text{ t/m}^2$$

dimana :

E_c = modulus deformasi stone column (t/m^2)
 P = beban (ton)
 s = penurunan (m)
 d = diameter pelat (m)

Modulus deformasi tanah didasarkan dari hasil sondir, yaitu :

$$E_s = 2 q_c = 2 \times 100 = 200 \text{ t/m}^2$$

Maka perbandingan antara modulus deformasi stone column dan tanah di sekelilingnya :

$$R = E_c / E_s = 2000 / 200 = 10$$

5.2. Pembagian Beban

Beban timbunan yang berada di atas stone column dan tanah dasar akan didistribusikan menurut besarnya modulus deformasi dari masing-masing bahan pendukungnya.

Persamaan daya dukung :

$$q.A = P_s . A_s + P_c . A_c$$

$$\frac{P_s}{q} = \frac{1}{1 + A_c/A_s(R-1)}$$

Diameter stone column $D = 0.90 \text{ m}$

Jarak antar column $S_p = 1.80 \text{ m}$

Diameter equivalen $D_e = 1.05 \times 1.80 = 1.89 \text{ m}$

Luas equivalen $A = 2.805 \text{ m}^2$

Luas stone column $A_c = 0.636 \text{ m}^2$

Luas tanah dasar $A_s = 2.805 - 0.636 = 2.169 \text{ m}^2$

$$A_c/A_s = 0.636/2.805 = 0.227$$

$$\frac{P_s}{q} = \frac{1}{1 + 0.227(10-1)} = \frac{1}{3}$$

- Untuk beban timbunan setinggi $H_t = 6.00 \text{ m}$:

$$q = t \times H_t = 1.8 \times 6.00 = 10.80 \text{ t/m}^2$$

Tekanan yang diterima tanah dasar

$$P_s = 1/3 \times 10.80 = 3.60 \text{ t/m}^2$$

$$Q_s = 2.169 \times 3.60 = 7.808 \text{ ton}$$

Tekanan yang diterima stone column

$$P_c = R \times P_s = 10 \times 3.60 = 36.00 \text{ t/m}^2$$

$$Q_c = 0.636 \times 36.00 = 22.89 \text{ ton}$$

$$Q_c = 22.89 / (10.8 \times 2.805) = 0.755$$

Dari hasil load test ternyata pada beban sebesar 46 ton stone column masih mampu menahan.

$$\text{Faktor keamanan } F = 46.00 / 22.89 = 2.01$$

- Untuk beban timbunan setinggi $H_t = 4.00 \text{ m}$:

Dengan cara yang sama seperti di atas, maka didapat beban yang diterima stone column sebesar $Q_c = 17.217 \text{ ton}$.

$$Q_c = 17.217 / (7.2 \times 3.46) = 0.69$$

$$\text{Faktor keamanan } F = 46 / 17.217 = 2.67$$

5.3. Daya Dukung Stone Column Tunggal

Tiang batu pecah ini dapat berdiri tegak disebabkan adanya penyangga di sekeliling tiang, sehingga daya dukung dari stone column tergantung dari harga sudut geser dalam dan kuat geser tanah sekelilingnya.

Persamaan daya dukung :

$$\sigma_v = K_{pc} \times \sigma_{sh}$$

$$\sigma_{sv} = K_{pc} \times C_u \times N_c = K_{pc} \times N_c \times C_u$$

$$K_{pc} \times N_c \text{ diumpamakan} = a$$

$$\sigma_v = a \times C_u$$

Berdasarkan dari load test beban dianggap maksimum sebesar $P = 46 \text{ ton}$, dengan kuat geser tanah dasar $C_u = 2.8 \text{ t/m}^2$ (hasil laboratorium), persamaan di atas menjadi :

$$46 / 0.636 = a \times 2.80$$

$$a = 46 / (0.636 \times 2.80) = 25.83$$

Dari hasil di atas maka kekuatan stone column tunggal dapat diestimasi :

$$\sigma_v = 25 C_u$$

dimana:

$$\sigma_v = \text{daya dukung stone column (t/m}^2\text{)}$$

$$C_u = \text{kuat geser undrained (t/m}^2\text{)}$$

5.4. Waktu Penurunan

Di samping meningkatkan daya dukung tanah dasar, stone column juga berfungsi sebagai vertikal drain untuk mempercepat penurunan. Lamanya penurunan dapat dipercepat dengan memper pendek jarak pengaliran air, yaitu minimal sama dengan jarak spacing antar stone column. Harga koefisien konsolidasi $C_v = 2.78 \text{ cm}^2/\text{dt} = 8.76 \text{ m}^2/\text{th}$.

Perbandingan antara jarak tempuh air dan jari-jari stone column :

$$R_e/r_w = 0.90 / 0.45 = 2$$

Tabel untuk mendapatkan harga T_r :

Ur %	Re / re		
	5	10	5
90	0.27	0.455	0.567
99	0.539	0.907	1.135

Dari tabel didapat minimal $Re / re = 5$
 Untuk tingkat konsolidasi t 90% , $T_r = 0.27$
 Harga $C_r = C_h$

$$t = \frac{0.27 \times (0.90)}{8.76} = 0.025 \text{ tahun}$$

VI. KESIMPULAN

Bedasarkan hasil percobaan pengujian kekuatan stone column di lapangan serta analisisnya, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Stone column yang dipasang pada oprit jembatan di Sta : 41 +840 jalan tol Padaleunyi mempunyai kekuatan sebesar $P = 46.00$ ton dengan penetrasi $S = 4.50$ cm.
- Dengan terpasangnya stone column ini, maka beban timbunan dipikul sebagian besar oleh column. Untuk jarak antar column $Sp = 1.80$ m, beban timbunan sebesar 75% dipikul oleh stone column dan 25% oleh tanah dasar, sedangkan untuk jarak $Sp = 2.00$ m, sebesar 69% oleh stone column dan 31% oleh tanah dasar.
 Dengan demikian stone column dapat meningkatkan daya dukung tanah dasar.

- Stone column sebagai fungsi drainase, akan mempercepat proses konsolidasi tanah lembek, karena jarak tempuh air pori akan lebih pendek yaitu ke arah horisontal sejauh jarak antar column.
- Untuk sementara dari hasil percobaan pembebanan ini, maka dalam menentukan besarnya daya dukung stone column tunggal dapat diestimasi dari kuat geser tanah undrained yaitu sebesar $\sigma_v = 25 C_u$.

DAFTAR PUSTAKA

- Edward William Brand and Rolf Peter Brownner : Soft Clay Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1981.
- Greenwood and K.Kirsch : Specialist Ground by Vibratory and Dinamic Method, 1983.
- Manfred G Bayer The Vibrocompaction and Vibro displacement Processes, 1971.
- Narvac DM 7 : Design Manual Soil Mecanics Foundations and Earth Structures , 1971.
- Soemartono M, Percobaan Pembebanan Tiang Pusat Litbang Jalan, 1977.
- Suherman.M, Laporan Load test Stone column Pusat Litbang Jalan, 1989.

Penulis :

Drs. M. Suherman, Ajun Peneliti Madya Bidang Geoteknik, Pusat Litbang Jalan.