

Penilaian Model Empirik Keupayaan Galas Tanah Baki Sedimen daripada Kaedah Gelombang Permukaan

(Empirical Model Evaluation of Sedimentary Residual Soil Bearing Capacity from Surface Wave Method)

Sri Atmaja Rosyidi*, Mohd. Raihan. Taha & Khairul Anuar Mohd Nayan

ABSTRAK

Secara keseluruhan, keupayaan galas lapisan subgred banyak mempengaruhi keadaan struktur turapan. Dalam kajian ini, kaedah Analisis Spektrum Gelombang Permukaan (lebih dikenali dengan Spectral Analysis of Surface Wave-SASW) telah digunakan bagi penilaian kekukuhan lapisan subgred turapan. Kaedah SASW dijalankan berasaskan rambatan gelombang Rayleigh. Menggunakan data beza fasa gelombang Rayleigh, lengkung serakan uji kaji halaju fasa boleh ditentukan. Selanjutnya proses songsangan dijalankan bagi mendapatkan halaju gelombang ricih dan modulus dinamik bahan pada struktur turapan. Hasil kajian menunjukkan beberapa model empirik halaju gelombang ricih dan modulus elastik dinamik melawan keupayaan galas tanah seperti nisbah galas California (CBR) dan metertusukan kon dinamik (DCP) telah diterbitkan. Kesesuaian yang baik turut didapati antara model-model empirik tersebut berbanding hasil kajian sebelumnya.

Kata kunci : Kaedah SASW; subgred tanah; halaju gelombang ricih; modulus elastik; CBR; DCP

ABSTRACT

Bearing capacity of the subgrade layers has significant influence on the performance of the overall pavement structure. In this study, the Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) method was used for assessing the stiffness of pavement subgrade layer. The SASW method employed was based on the Rayleigh-wave propagation. Using the phase difference data of Rayleigh waves, the experimental dispersion curve of phase velocity was obtained. Consequently, inversion process was conducted to obtain the shear wave velocity and the dynamic modulus of the pavement structure. The results showed that some empirical models of the shear wave velocity and the dynamic elastic modulus versus soil bearing capacity of the California bearing ratio (CBR) and dynamic cone penetrometer (DCP) were derived. Good agreement was also found between these empirical models compared to that of previous studies.

Keywords : SASW method; soil subgrade; shear wave velocity; elastic modulus; CBR; DCP

PENGENALAN

Kaedah uji kaji tanpa musnah (*non-destructive testing*, NDT) analisis spektrum gelombang permukaan (*Spectral Analysis of Surface Wave*, SASW) telah mengalami kemajuan dan pembaikan yang intensif sejak tahun 1980. Penggunaan kaedah SASW pertama kalinya telah dilakukan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) yang menjelaskan penggunaan SASW bagi analisis kekukuhan tanah dan turapan. Penggunaan teknik SASW telah didapati berjaya bagi beberapa uji kaji geoteknik lapangan dalam penyiasatan tapak seperti untuk pencirian tanah untuk asas bangunan (Stokoe et al. 1994), pengukuran di situ nilai kekukuhan tanah (Matthews et al. 1996), penilaian kepadatan tanah (Kim et al. 2001) dan penilaian modulus ricih dan nisbah redaman (Rosyidi et al. 2008).

Kertas kerja ini bertujuan untuk menilai modulus elastik dan menerbitkan model empirik keupayaan galas

pada lapisan subgred tanah baki sedimen yang dihasilkan daripada korelasi sifat dinamik tanah melalui ujikaji SASW. Model empirik diterbitkan daripada pengubahsuaian persamaan matematik daripada pengukuran seismik yang dijalankan oleh Rosyidi et al. (2009) bagi menilai kekukuhan lapisan subgred turapan. Lapisan subgred tanah merupakan lapisan asas turapan yang mana keupayaan galasnya akan mempengaruhi keadaan struktur jalan raya di atasnya. Dalam penilaian model empirik yang dihasilkan, perbandingan hasil kajian ini dengan hasil penyelidikan terdahulu turut diperbincangkan.

Prinsip kaedah SASW adalah menjalankan analisis spektrum isyarat gelombang yang dihasilkan daripada rambatan gelombang permukaan daripada punca mekanik. Gelombang *R* disifatkan sebagai mod asas rambatan gelombang yang merambat dalam bentuk elips beraturan dan nilai amplitudnya akan berkurangan kepada kedalaman.

Jika gelombang R merambat pada struktur turapan yang berlapis dengan sifat kekukuhan (diwakili oleh modulus elastik bahan) yang berbeza antara satu sama lain, nilai halaju gelombang R yang merambat di setiap lapisan juga akan berbeza. Fenomena ini yang disebut sebagai serakan telah banyak dianalisis secara teori pada akhir tahun 1940an sebagaimana dijelaskan secara terperinci oleh Ewing et al. (1957) dan Kausel dan Rössset (1981).

METODOLOGI KAJIAN

PERALATAN PENGUJIAN SASW

Untuk menjalankan uji kaji SASW ke atas struktur turapan jalan diperlukan peralatan pengesan gelombang yang terdiri daripada peralatan punca penjana gelombang R dan dua pengesan yang disambungkan kepada sistem analisis dan alat perakam isyarat (penganalisis spektrum), diletakkan di atas permukaan turapan seperti yang dijelaskan dalam Rajah 1. Punca mekanik berupa bebola keluli dengan ukuran diameter 11.8, 18.9 dan 25.1 mm telah dipilih untuk penjanaan frekuensi tinggi, manakala tukul (dengan berat 1.92 dan 4.87 kg) pula boleh digunakan untuk menghasilkan gelombang berfrekuensi rendah. Pengesan gelombang yang digunakan adalah daripada jenis meter pecut pemindaharuh piezoelektrik paksi tunggal DJB model A/123/E dengan julat gerakbalas frekuensi berkesan ($\pm 5\%$) pada 1.2 hingga 20 kHz, yang mampu mengesan profil turapan hingga lapisan subgred. Disamping itu, penganalisis spektrum *Harmonie*

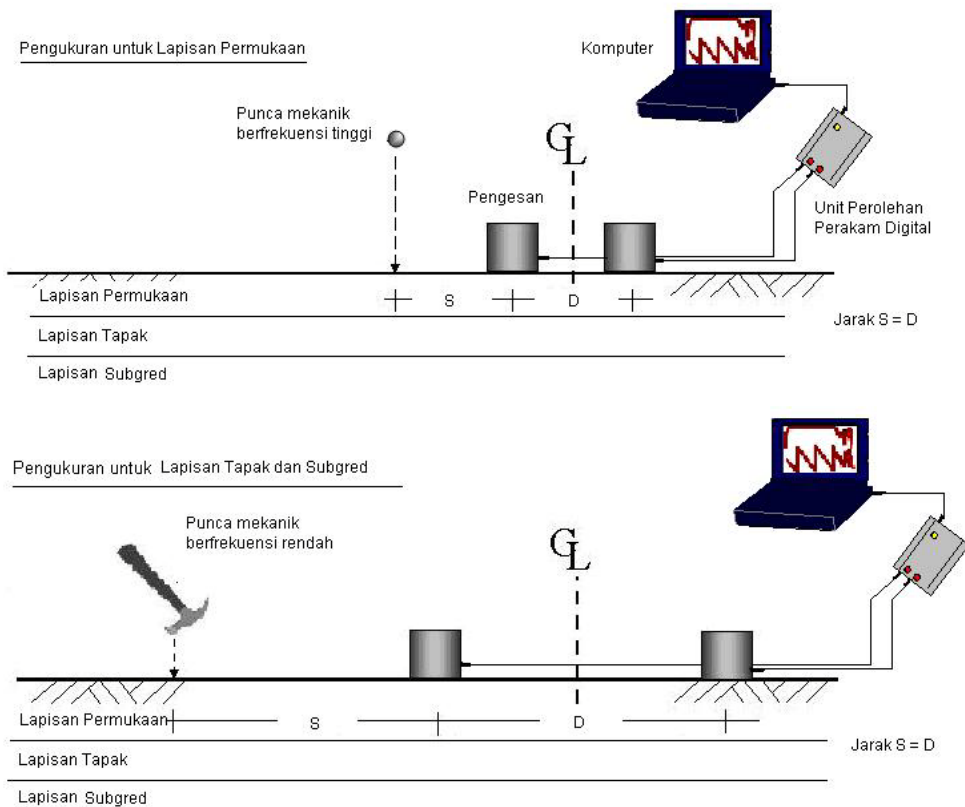
01dB jenis 1 berspesifikasi IEC 651-804 boleh digunakan sebagai unit perolehan dan perakaman data digital gelombang, manakala untuk pemprosesan data gelombang digunakan perisian dBFA32 dan MATLAB bagi menjanakan spektrum fasa dalam domain frekuensi.

TATACARA PENGUKURAN DAN KAEDAH ANALISIS

Pengukuran SASW oleh Rosyidi et al. (2009) dijalankan pada turapan boleh lentur jalan lingkungan di Kampus Bangi Universiti Kebangsaan Malaysia, Selangor, yang terletak di jalan keluar Pintu Masuk Lingkungan 1 dan di hadapan Pusat Kesihatan. Pada titik yang sama untuk pengukuran SASW, uji kaji DCP (*dynamic cone penetrometer*) bagi mendapatkan korelasi nilai keupayaan galas tanah CBR (*california bearing ratio*) turut dijalankan. Secara amnya, terdapat tiga tahap yang digunakan dalam pengujian SASW iaitu (1) pengujian di lapangan termasuk pemilihan punca dan pengesan pergerakan gelombang yang sesuai, (2) pengukuran dan penjanaan lengkung serakan daripada data lapangan dan (3) songsangan lengkung serakan uji kaji untuk menghasilkan profil yang tepat.

1. Tatarajah pengukuran lapangan dan lokasi uji kaji

Bagi mendapatkan data gelombang yang terperinci pada setiap lapisan turapan, tatarajah geometri titik tengah pengesan sepunya (*common receiver mid point, CRMP*)



RAJAH 1. Tatarajah Peralatan SASW pada Turapan

telah digunakan. Tatarajah geometri ini dijalankan dengan menetapkan satu titik tengah khayalan. Jarak antara punca gelombang terhadap pengesan (S) dan jarak antara pengesan pertama dan kedua (D) diletakkan pada ukuran yang sama (Rajah 1). Seterusnya pengesan dan punca dipindahkan secara berganda dengan merujuk kepada titik tersebut bagi mendapatkan data gelombang untuk lapisan yang lebih dalam. Jarak antara pengesan berkesan yang boleh digunakan dalam pengukuran terhadap turapan jalan dimulai daripada jarak 5 cm dan seterusnya bertambah secara ganda iaitu 10, 20, 40, 80, 160 cm hingga boleh mencapai jarak yang ditentukan untuk mendapatkan data rambatan gelombang pada lapisan tanah di bawah turapan.

2. Penjanaan lengkung serakan halaju fasa uji kaji

Lengkung serakan halaju fasa adalah plot halaju fasa melawan perubahan nilai frekuensinya. Lengkung serakan ini mempunyai maklumat penting lapisan bawah permukaan dan ciri teknikalnya yang berguna untuk proses songsangan profil suatu struktur. Proses ini dibahagi kepada tiga peringkat iaitu pertama: proses penyembunyian isyarat, kedua: proses pembaikan isyarat daripada gangguan persekitaran, tak koheren dan pantulan gelombang melalui penurasan dan, ketiga: proses penjanaan lengkung serakan individu dan gabungan.

Berasaskan data beza fasa yang ditampilkan dalam spektrum fasa, lengkung serakan halaju fasa boleh diperolehi (Rosyadi 2004). Maklumat beza fasa boleh diperolehi melalui hasil jelmaan Fourier terhadap anjakan gelombang dalam spektrum fungsi pindahan berunit sudut fasa untuk setiap nilai frekuensi yang dijanakan. Kaedah beza fasa (*phase different method*) adalah cara yang meluas dipakai untuk mengira halaju gelombang menggunakan masa pergerakan gelombang. Masa pergerakan gelombang (*t*) boleh dihitung daripada nilai beza fasa (*f*) daripada kedua-dua pengesan menggunakan persamaan sebagai

berikut:

$$\phi = 2\pi f_0 t \tag{1}$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \tag{2}$$

Selanjutnya jika jarak antara dua pengesan ditetapkan maka halaju fasa (V_{PH}) dan panjang gelombang (λ) boleh ditentukan daripada :

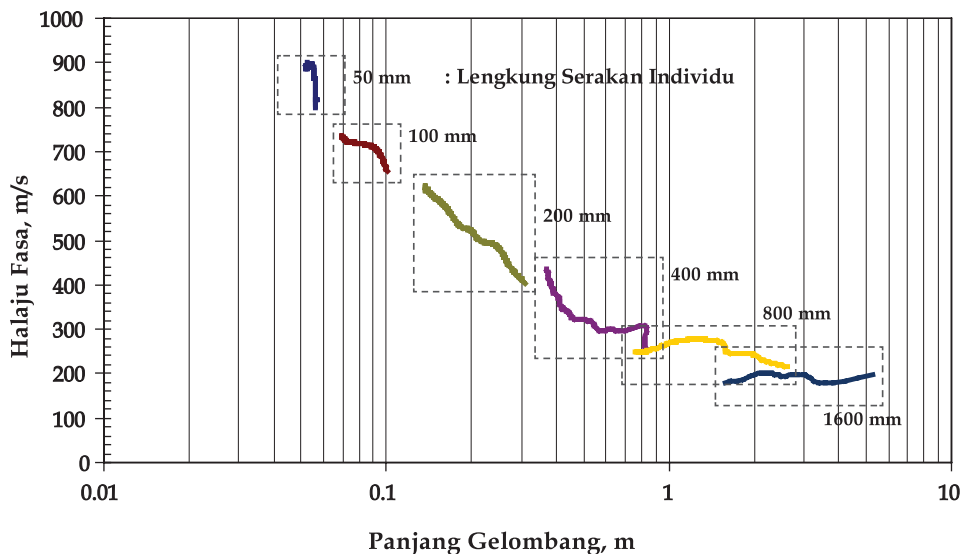
$$V_{PH} = \frac{d}{t_1} = f_0 \lambda \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{d}{\phi/2\pi} \tag{4}$$

Penggabungan setiap lengkung serakan individu daripada setiap jarak pengesan disebut sebagai lengkung serakan gabungan. Rajah 2 menunjukkan salah satu contoh lengkung serakan gabungan yang diperolehi daripada pengukuran ke atas turapan jalan di lokasi uji kaji. Dalam penjanaan lengkung serakan tersebut, tidak semua data beza fasa digunakan. Kaedah purata untuk meringkaskan data lengkung serakan yang banyak telah dicadangkan oleh Joh (1996).

3. Proses songsangan lengkung serakan halaju fasa uji kaji

Profil halaju gelombang ricih diperolehi daripada proses songsangan kepada lengkung serakan eksperimen. Dalam proses songsangan, suatu parameter model permulaan (*starting model parameter, SMP*) perlu dianggarkan dahulu. Ia seharusnya dianggarkan dengan nilai hampir sama dengan nilai sebenar bagi turapan dan yang menjadi asas data masukan bagi analisis matriks kekukuhan. Profil SMP



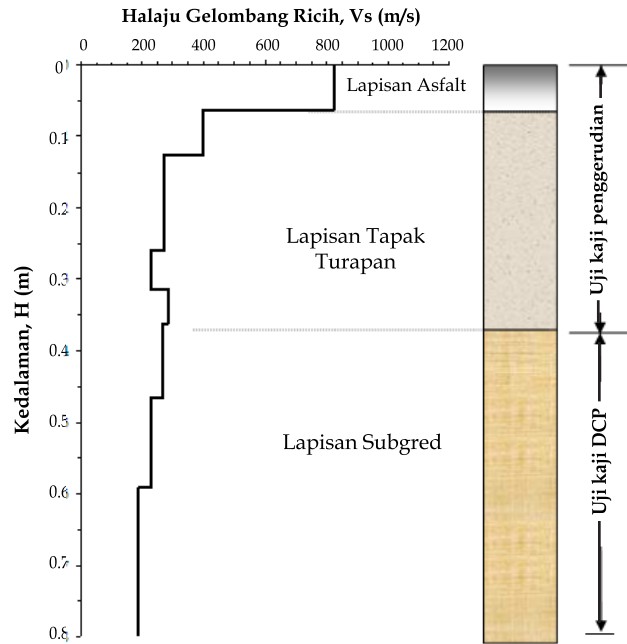
RAJAH 2. Salah Satu Contoh Lengkung Serakan Uji Kaji Gabungan daripada Lengkung Individu Setiap Jarak Pengesan daripada Tapak Kajian

mengandungi maklumat jumlah lapisan turapan, tebal setiap lapisan yang dianggarkan, halaju ricih, nisbah Poisson, ketumpatan dan redaman bahan. Selanjutnya, daripada profil SMP lengkung halaju fasa teori boleh dijanakan. Padanan diantara lengkung uji kaji dan teori seterusnya dijalankan sehingga padanan terbaik diperolehi dengan nilai selisih yang minima. Dalam kajian ini kaedah songsangan global dan tatasusunan (Joh 1996) digunakan untuk proses songsangan *SASW*. Prosedur songsangan tersebut menggabungkan penggunaan kaedah matriks kekukuhan 3 D dan algoritma kaedah kemiripan maksimum serta kaedah *Newton-Raphson* untuk proses pengoptimuman. Kaedah matrik kekukuhan dinamik digunakan untuk menjanakan lengkung serakan teori manakala kaedah kemiripan maksimum dan *Newton-Raphson* dalam proses lelaran (*iteration*) bagi mendapatkan nilai kesalahan punca kuasa dua purata (*root mean square*, RMS) yang terkecil mungkin dalam proses perpadanan antara lengkung serakan teori dan uji kaji. Penyelesaian analitik matriks kekukuhan model 3 D untuk perambatan gelombang permukaan R pada media berlapis diberikan dalam (Kausel & Peek 1982; Gucunski 1991):

$$w_{so}(r) = -\frac{i\pi qR}{2} \sum_{l=1}^{2N} \frac{(\phi_z^{ll})^2 J_1(k_l R) H_0^{(2)}(k_l r)}{k_l} \quad (5)$$

disini $w(r)$ merupakan perpindahan zarah menegak dalam domain ruang, J_l adalah fungsi *Bessel* jenis pertama, r adalah perpindahan dalam domain ruang dihitung, q adalah amplitud beban menegak yang teragih tidak seragam dengan jejari R , ϕ_z^{ll} merupakan perpindahan menegak pada mod ke- l di permukaan, k_l adalah nilai eigen ke- l , dan $H_0^{(2)}$ adalah fungsi *Henkel* jenis kedua.

Untuk menjalankan proses songsangan secara auto, perisian *WinSASW* versi 2.4 telah digunakan. Rajah 3 menunjukkan salah satu contoh profil halaju ricih gelombang hasil songsangan pada lokasi uji kaji. Seluruh lapisan pada struktur turapan boleh dikesan dengan baik oleh kaedah *SASW*. Halaju ricih gelombang memperlihatkan nilai yang berpatutan untuk struktur turapan. Lapisan permukaan asphalt dikesan mempunyai nilai halaju ricih yang lebih besar berbanding lapisan tapak dan lapisan



RAJAH 3. Contoh Profil Halaju Gelombang Ricih Turapan Melawan Kedalaman di Lokasi Uji Kaji Berbanding Pengukuran Kedalaman Sebenarnya daripada Penggerudian dan Ujian DCP

subgred. Jumlah dan kedalaman lapisan turapan hasil *SASW* pula menunjukkan nilai yang berhampiran dengan hasil ujian lubang gerudi dan pengujian *DCP*.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

SIFAT FIZIK TANAH BAKI SEDIMEN

Kabir (2005) mengkaji jenis tanah baki di kawasan UKM, Bangi. Berdasarkan uji kaji dasar sifat tanah (menggunakan BS 1377: 1990) dan Sistem Pengkelasan Tanah Bersekutu (*Unified Soil Classification System*, USCS), beliau mendapati bahawa jenis tanah subgred di UKM adalah tanah baki sedimen dengan kod SC (*clayey sand*) atau tanah lempung berpasir. Sifat fizik tanah baki sedimen tersebut diberikan dalam Jadual 1.

JADUAL 1. Sifat Fizik Tanah Baki Sedimen di Kampus Bangi, UKM (Kabir 2005)

Sifat Fizik	Tanah Baki Sedimen
Graviti tentu	2.60
Pecahan pasir (2 – 0.063 mm) (%)	59
Pecahan kelodak (0.063 – 0.002 mm) (%)	18
Pecahan lempung (< 0.002 mm) (%)	23
Had cecair (%)	36
Had plastik (%)	17
Indeks keplastikan (%)	19
Kandungan organik	0.63

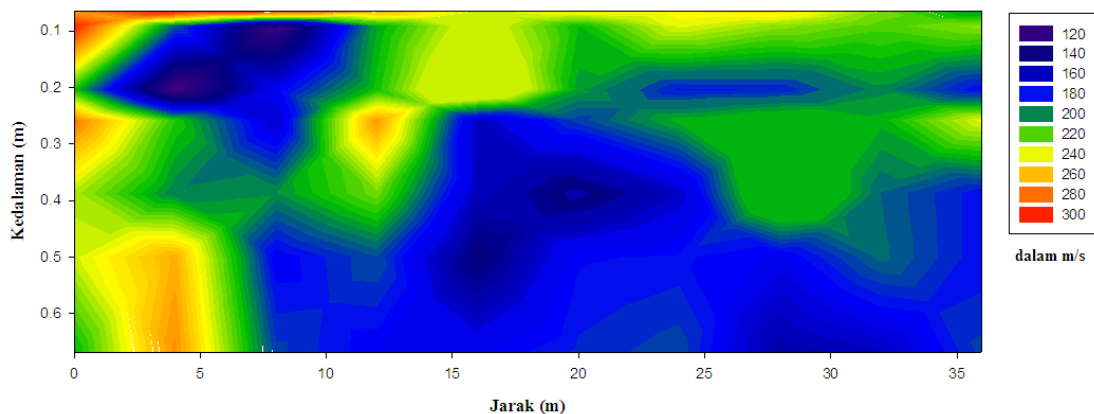
HALAJU GELOMBANG RICIH SUBGRED TURAPAN

Taburan nilai halaju gelombang ricih daripada hasil pengukuran *SASW* pada salah satu tapak ujikaji ditunjukkan dalam Rajah 4. Dalam rajah ini, analisis tomografi telah dijalankan ke atas beberapa profil halaju gelombang ricih yang menghasilkan profil 2-D halaju gelombang ricih untuk lapisan turapan (mulai kedalaman 0.08 m) dan subgred. Berdasarkan data penggerudian, lapisan tanah subgred boleh dijumpai pada kedalaman sekitar 0.3 hingga 0.4 m. Perubahan halaju ricih tanah daripada Rajah 4 menunjukkan bahawa lapisan subgred turapan dibina daripada lapisan tanah metasedimen. Ini akibat kepada nilai kekukuhan tanah menjadi tidak sama pada setiap lapisan dan perubahan kekukuhan antara lapisan tanahnya dilihat amat jelas dan kompleks. Beberapa bahagian tanah terlihat mempunyai nilai halaju ricih yang tinggi, sekitar 200-240 m/s, manakala pada bahagian lain yang berdekatan mempunyai nilai halaju ricih dalam julat yang lebih rendah (kurang daripada 120 m/s).

Berdasarkan data halaju gelombang ricih yang diperoleh, julat halaju gelombang ricih tanah subgred untuk Jalan Lingkungan 1 UKM adalah antara 76.44 hingga 301.41 m/s dan untuk Jalan Pusat Kesihatan UKM adalah antara 51.05 hingga 279.71 m/s seperti yang disenaraikan dalam Jadual 2. Julat yang lebar ini disebabkan oleh

wujudnya lapisan tanah berkekukuhan lemah pada profil subgred. Ini mungkin terjadi akibat kerja-kerja pemadatan yang tidak baik, lalu menghasilkan lapisan subgred yang tidak seragam.

Nilai halaju gelombang ricih lapisan subgred pada kedua-dua lokasi turapan memiliki data taburan yang hampir menyerupai taburan normal dengan nilai purata masing-masing adalah 178.42 m/s untuk Jalan Lingkungan 1 UKM dan 159.17 m/s untuk Jalan Pusat Kesihatan UKM (Rajah 5). Kualiti lapisan subgred berasaskan purata nilai halaju gelombang ricih untuk Jalan Lingkungan didapati lebih baik daripada Jalan Pusat Kesihatan. Sungguhpun demikian, bahan subgred pada kedua-dua lokasi uji kaji masih memiliki varian data yang tinggi iaitu melebihi 20 % (ditunjukkan daripada nilai koefisien varians-COV pada Jadual 2). Nilai COV melebihi 20 % tersebut mungkin juga berlaku kerana kajian *SASW* dijalankan ke atas profil turapan yang memiliki sistem lapisan tak teratur. Tambahan lagi, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahawa lapisan subgred dibina daripada lapisan tanah baki sedimen tersusun daripada beberapa lapisan kompleks metasedimen. Hal ini berbeza apabila kaedah *SASW* dijalankan ke atas lapisan tanah atau profil geologi yang lebih teratur atau homogen. Nilai COV pada lapisan yang beratur dan homogen boleh mencapai julat antara 5 hingga 10 % sebagaimana kajian yang dijalankan oleh Marosi dan Hiltunen (2004). Mereka

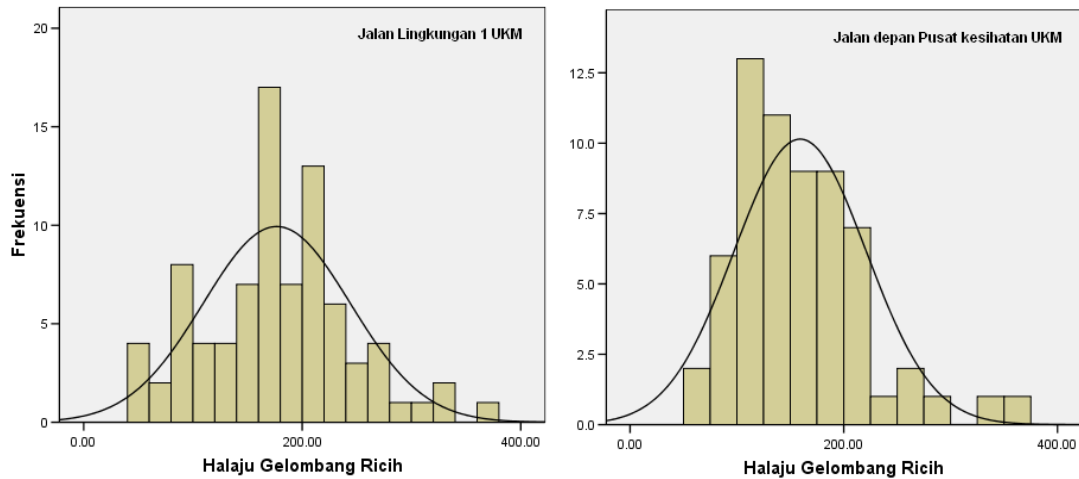


RAJAH 4. Profil 2-D Halaju Geombang Ricih Lapisan Subgred daripada Pengukuran *SASW* di Tapak Uji Kaji

JADUAL 2. Julat Halaju Gelombang Ricih untuk Lapisan Subgred

Parameter Statistik	Jalan Lingkungan 1 UKM	Jalan depan Pusat Kesihatan UKM
Purata (m/s)	178.42	159.17
Median (m/s)	174.44	131.05
SD (m/s)	44.61	49.34
COV (%)	0.25	0.31
SE (m/s)	4.74	5.23
Nilai <i>t</i>	25.47*	18.59*

* perbezaan tidak bererti pada 0.001



RAJAH 5. Taburan Data Halaju Gelombang Ricih daripada Pengukuran SASW pada Lokasi Uji Kaji Berbanding Lengkung Taburan Normal

JADUAL 3. Perbandingan Halaju Ricih pada Tapak Uji Kaji daripada Kajian Terdahulu

Hasil Kajian	Jenis Tanah	Halaju Gelombang Ricih, V_s dalam m/s
Kajian ini	Tanah baki sedimen berpasir	178.42 (Lingkungan 1) 159.17 (Pusat Kesihatan)
Das (1993)	Pasir baik	30.5 – 152.4
	Pasir padat	228.6
	Kerikil	182.88 – 228.6
Nazarian & Stokoe (1984)	Pasir lepas	147.5 – 211.9
	Pasir padat	277.9 – 282.9
Lai & Rix (1998)	Pasir sederhana – baik	140 – 150

juga membuat kesimpulan bahawa nilai COV halaju gelombang ricih daripada pengukuran SASW adalah lebih tinggi untuk profil yang tidak teratur seperti keputusan yang diperolehi daripada kajian ini.

Maklumat halaju ricih purata (V_s) juga boleh digunakan untuk menentukan jenis tanah pada tapak uji kaji. Jadual 3 menunjukkan perbandingan nilai halaju ricih hasil kajian ini berbanding hasil kajian daripada penyelidik terdahulu. Berdasarkan Jadual 3, tapak uji kaji yang dijalankan dalam penyelidikan ini boleh dikelaskan sebagai tanah berpasir berasaskan nilai halaju gelombang ricih. Ini turut menyokong keputusan sifat fizik dan pengkelasan tanah berasaskan USCS sebagaimana telah dijelaskan dalam Jadual 1.

Seterusnya berasaskan nilai halaju gelombang ricih, kekukuhan dinamik bahan seperti modulus dinamik elastik (E) lapisan subgred boleh ditentukan sebagai berikut (Rosyadi 2004):

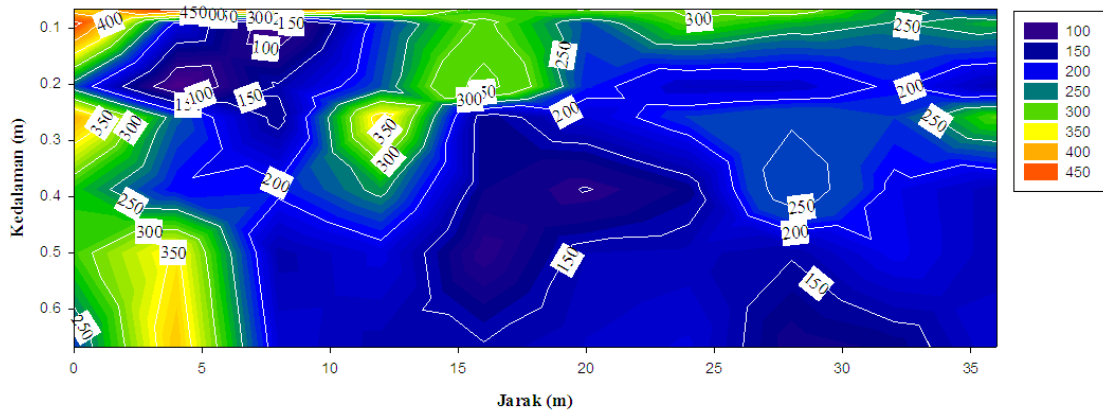
$$E = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \tag{6}$$

Di sini, ρ adalah ketumpatan jisim, diperolehi daripada ,

$\frac{\gamma_t}{g}$ dimana γ_t adalah berat unit bahan, g merupakan pecutan graviti (9.807 m/s^2) dan ν adalah nisbah Poisson.

Berdasarkan nilai halaju ricih, profil 2-D modulus elastik boleh dijanakan daripada persamaan 8 dengan mengambil kira parameter ketumpatan jizim sekitar 1900 kg/m^3 dan nisbah Poisson sebesar 0.33. Rajah 6 menunjukkan hasil pengiraan modulus elastik untuk lapisan tapak dan subgred dalam profil 2-D daripada data halaju gelombang ricih daripada Rajah 4. Serupa dengan profil 2-D halaju ricih, perubahan nilai modulus elastik pada lapisan subgred dikesan dengan jelas sebagai akibat daripada lapisan tanah metasedimen.

Jadual 4 menunjukkan nilai purata modulus elastik lapisan subgred pada kedua-dua tapak uji kaji. Sebagaimana pengkelasan lapisan subgred sebelumnya, maklumat modulus elastik dinamik yang dihasilkan juga boleh digunakan untuk menunjukkan jenis dan kualiti bahan subgred. Jadual 4 memberikan hasil kajian modulus elastik dinamik daripada beberapa penyelidik sebelumnya yang menggunakan pelbagai uji kaji makmal dan di situ. Daripada perbandingan nilai modulus elastik ini ditunjukkan bahawa bahan lapisan subgred tapak uji



RAJAH 6. Profil 2-D Modulus Elastisiti Lapisan Subgred daripada Pengukuran *SASW* di Tapak Uji Kaji

JADUAL 4. Perbandingan Modulus Dinamik Bahan Subgred

Hasil Kajian	Jenis Tanah	Peringkat Terikan (%)	E_{dinamik} (MPa)
Hasil kajian	Tanah baki sedimen berpasir	$< 1 \times 10^{-3}$	185.61* 147.11**
Prakash et al. (1986)	Tanah laterit Pasir berlodak	2.8×10^{-3} 5.6×10^{-3}	129*** 117.83***
Puri (1969)	Pasir berlodak baik dengan gred buruk	1.0×10^{-4}	168.91***
Nazarian & Stokoe (1986)	Tanah berpasir padat	$< 1 \times 10^{-3}$	172.38 – 227.54
Prakash et al. (1970)	Pasir sederhana	3.0×10^{-3}	81.39***

*) Tapak Jalan Lingkungan 1, **) Tapak Jalan Depan Pusat Kesihatan

***) dikira daripada nilai modulus ricih yang diperolehi

kaji boleh dikelaskan kepada tanah berpasir. Keputusan pengelasan ini sesuai dengan hasil pengelasan daripada sifat fizik tanah dan nilai halaju gelombang.

PERBANDINGAN NILAI KEKUKUHAN DINAMIK TERHADAP KEUPAYAAN GALAS

Beberapa model matematik empirik halaju gelombang ricih dan modulus dinamik elastik terhadap keupayaan galas tanah dari hasil kajian ini dan beberapa penyelidik terdahulu diberikan dalam Jadual 5.

Persamaan 7 hingga 10 merupakan persamaan empirik yang diterbitkan daripada kajian ini. Persamaan-persamaan ini menunjukkan hubungan antara halaju gelombang ricih dan modulus elastik dinamik terhadap nilai keupayaan galas (nilai *DCP* dan *CBR*) untuk jenis tanah berpasir dan tanah baki sedimen berpasir di kawasan kampus Bangi UKM. Walau bagaimanapun, persamaan tersebut hanya sesuai digunakan untuk nilai *CBR* hingga 60 % atau nilai kadar tusukan *DCP* hingga daripada 120 mm/tusukan. Oleh itu, model yang diterbitkan lebih sesuai digunakan untuk jenis tanah dan nilai had *CBR* tersebut.

Rajah 7 menunjukkan perbandingan antara persamaan empirik modulus elastik dinamik bahan melawan nilai *CBR* daripada hasil kajian ini (persamaan 8) terhadap hasil kajian Huekelom dan Klomp (1962), Powell et al. (1984) dan Abu-Farsakh et al. (2004). Hasil perbandingan menunjukkan bahawa persamaan empirik yang terhasil daripada kajian ini adalah sangat bersesuaian dengan Huekelom dan Klomp (1962). Walau bagaimanapun perbandingan dengan persamaan empirik Powell et al. (1984) menunjukkan sisihan yang cukup besar. Ini kerana nilai modulus resilien dalam kajian yang dijalankan oleh Powell et al. (1984) di Transport Road Research Laboratory (TRRL) menggunakan uji kaji triaxial dengan pembebanan berulang dengan terikan yang melebihi 0.001 %. Nilai *CBR* yang diperolehi daripada lengkung nilai modulus elastik melebihi 50 MPa (nilai *CBR* melebihi 4.7 %) daripada kajian mereka lebih besar dibandingkan nilai *CBR* yang diperolehi lengkung uji kaji ini.

Demikian juga untuk model empirik daripada Abu-Farsakh et al. (2004). Nilai modulus elastik dinamik diperolehi daripada uji kaji meterpesongan berat jatuh ringan (*LFWD*) yang menghasilkan nilai modulus elastik

Jadual 5. Model Empirik Kekukuhan Bahan yang Dihasilkan daripada Kajian Ini Berbanding Model Empirik daripada Penyelidik Lainnya

Penyelidik	Persamaan Empirik*
Kajian ini	
	$CBR = 5 \left(\frac{V_s}{10^2} \right)^2 \quad (7)$
	$CBR = 0.1021 \times E_{SASW} \quad (8)$
	$\log E_{SASW} = 3.55 - \log (DCP)^{1.25} \quad (9)$
	$CBR = 424.62 / (DCP)^{1.273} \quad (10)$
Huekelom dan Klomp (1962)	$E = 10.34 CBR \quad (11)$
	$CBR = 0.097 E \quad (12)$
Harrison (1986)	$\log CBR = 2.56 - 1.16 \log DCP \quad (13)$ (tanah lempung dengan $DCP > 10$)
	$\log CBR = 2.70 - 1.12 \log DCP \quad (14)$ (tanah berbutir dengan $DCP < 10$)
Abu-Farsakh et al. (2004)	$CBR = -14 + 0.66(E_{LFD}) \quad (15)$ untuk $12.5 < E_{LFD} < 174.5$ MPa
	$CBR = 1.03 + \frac{2600}{-7.35 + DCP^{1.84}} \quad (16)$ untuk $6.31 < DCP < 66.67$
	$\ln E_{LFD} = 2.35 + \frac{5.21}{\ln DCP} \quad (17)$ untuk $4.81 < DCP < 66.7$
Webster et al. (1992), Livneh et al. (1995)	$CBR = 292 / DCP^{1.12} \quad (18)$
Powell et al. (1984)	$E \text{ (MPa)} = 17.58 CBR^{0.64} \quad (19)$
Chua dan Lytton (1981)	Persamaan teori: $\log (E_s) = B - 0.4 \log (DCP) \quad (20)$ Nilai pemalar B diberikan dalam Jadual 6
Pen (1990)	$\log (E) = 3.25 - 0.89 \log (DCP) \quad (21)$
	$\log (E) = 3.652 - 1.17 \log (DCP) \quad (22)$
Chen et al. (1995)	$E_{FWD} = 338(DCP)^{0.39} \quad (23)$
Ministry of Works Malaysia (1987)	NALS model : $CBR = 269 / DCP \quad (24)$

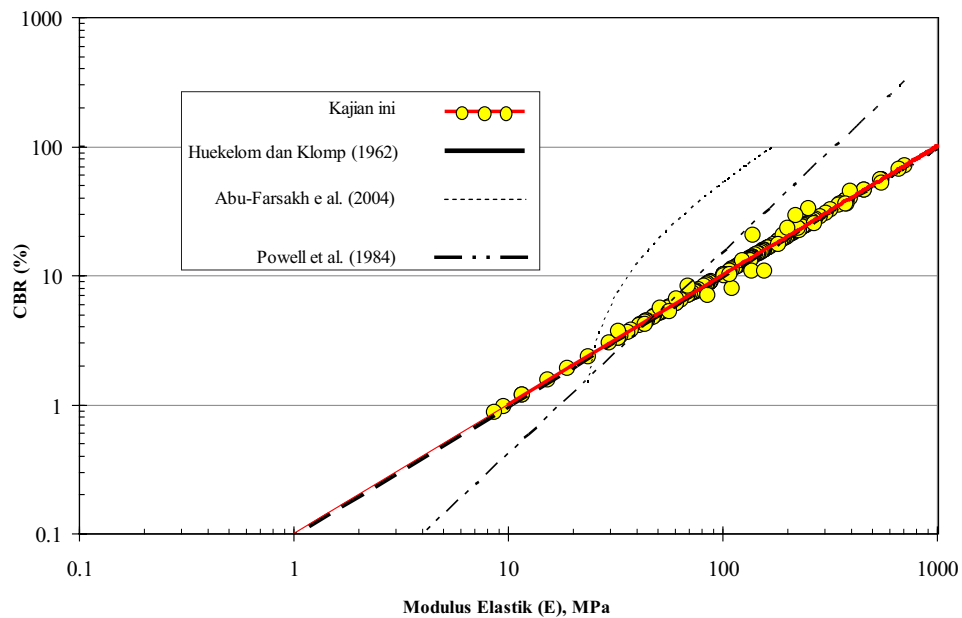
* Simbol yang digunakan dalam persamaan empirik dijelaskan dalam Jadual 7.

JADUAL 6. Nilai Pemalar B daripada Persamaan 20 (Jadual 5)

Jenis Tanah	$2\tau_0$ (fungsi tegasan utama pada keadaan gagal)	B
lempung plastik (<i>plastic clay</i>)	25	2.22
tanah lempung (<i>clayey soil</i>)	50	2.44
tanah kelodak (<i>silty soil</i>)	75	2.53
tanah pasir (<i>sandy soil</i>)	150	2.63

JADUAL 7. Simbol yang Digunakan Dalam Persamaan Empirik dalam Jadual 5

Simbol	Pengertian
V_s	halaju gelombang ricih dalam m/s
CBR	dalam unit %
DCP	dalam unit mm/hentaman untuk kon DCP dengan sudut 60°
G_{SASW}	modulus ricih maksimum daripada uji kaji $SASW$ (MPa)
E_{SASW}	modulus elastik maksimum daripada uji kaji $SASW$ (MPa)
E_{LFD}	modulus elastik maksimum daripada uji kaji meter pesongan berat jatuh ringan (MPa)
E_s	Modulus elastik teori (MPa)

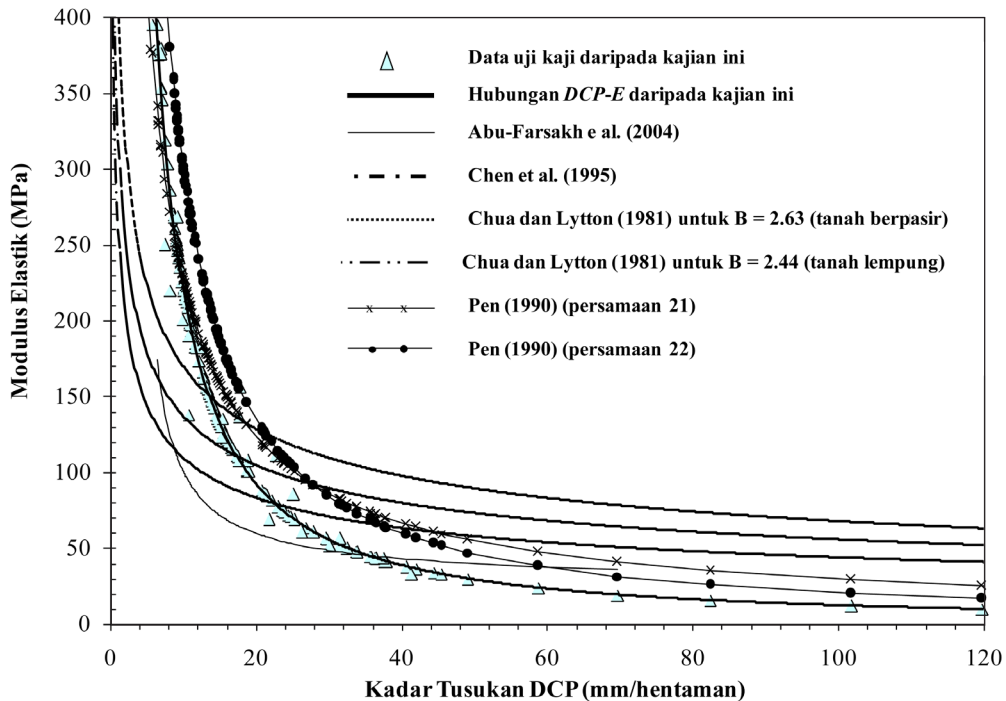
RAJAH 7. Perbandingan Model Empirik $CBR-E$ daripada Kajian Ini dengan Hasil Kajian Huekelom dan Klomp (1962), Powell et al. (1984) dan Abu-Farsakh et al. (2004)

bahan pada keadaan elastik tak lurus. Tambahan lagi, model empirik Abu-Farsakh et al. (2004) diterbitkan daripada korelasi gabungan modulus resilien daripada tiga jenis tanah yang berbeza iaitu tanah terstabil/mantap, tanah berbutir dan tanah lempung tak stabil pada had 12.5 hingga 174.5 MPa.

Hubungan empirik lain yang boleh dihasilkan daripada kajian ini adalah hubungan antara nilai kadar tusukan (*penetration rate, PR*) DCP berbanding nilai modulus elastik dinamik bahan yang diberikan dalam persamaan 9. Rajah

8 menunjukkan perbandingan model empirik daripada kajian ini dengan hasil kajian Chua dan Lytton (1981), Pen (1990), Chen et al. (1995) dan Abu-Farsakh et al. (2004).

Keseluruhan lengkung daripada model empirik kajian ini dan kajian penyelidik lainnya menunjukkan corak yang hampir sama. Semakin tinggi kadar tusukan DCP, modulus elastik bahan menjadi berkurangan. Lengkung empirik daripada kajian ini lebih hampir dengan hasil kajian Pen (1990) khasnya untuk kadar DCP kurang daripada 15 mm/hentaman. Seterusnya, model empirik Pen (1990)



RAJAH 8. Perbandingan Model Empirik Kadar Tusukan *DCP-E* daripada Kajian Ini dengan Kajian Chua dan Lytton (1981), Pen (1990), Chen et al. (1995) dan Abu-Farsakh et al. (2004)

memberikan hasil modulus elastik yang lebih besar dengan perbezaan purata masing-masing 62 % dan 53 % untuk persamaan 21 dan persamaan 22 terhadap model empirik kajian ini (persamaan 9). Perbezaan yang jelas terlihat pada perbandingan antara hasil kajian ini dengan model empirik daripada Chen et al. (1995) dan Abu-Farsakh et al. (2004). Kedua-dua penyelidik tersebut mendapatkan nilai modulus elastik dinamik tanah daripada uji kaji pesongan iaitu *FWD* dan *LFWD*. Sebagaimana telah dijelaskan sebelum ini, perbezaan model ini disebabkan penentuan nilai modulus elastik pada keadaan ujikaji yang berbeza. Modulus elastik daripada kedua-dua kaedah pesongan diperolehi pada peringkat terikan ambang elastik tak lurus manakala nilai modulus daripada uji kaji *SASW* didapatkan daripada keadaan bahan yang elastik lurus (persamaan 8). Tambahan lagi, model empirik daripada Chen et al. (1990) hanya dihadkan pada kadar DCP antara 10 hingga 60 mm/hentaman. Sementara itu, lengkung model empirik daripada kajian ini kelihatan hampir dengan model Abu-Farsakh et al. (2004) pada julat 20 hingga 50 mm/tusukan.

Seterusnya itu, hubungan kadar *DCP-E* daripada model teori Chua dan Lytton (1981) untuk tanah berpasir dan lempung menunjukkan perbezaan yang cukup besar berbanding model empirik kajian ini. Kedua-dua model empiriknya memberikan nilai modulus elastik yang lebih tinggi, namun untuk kadar DCP di bawah 20 mm/hentaman nilai modulus lebih rendah daripada model kajian ini. Perbezaan ini lebih disebabkan oleh faktor tegasan utama pada keadaan gagal yang menjadi asas penentuan nilai pemalar *B* pada model Chua dan Lytton (1981) yang terlalu tinggi. Ia perlu disahkan dengan kajian eksperimen atau uji kaji lapangan. Demikian juga, perbezaan kelakuan bahan tegasan pada keadaan gagal bagi menentukan modulus elastik pada keadaan elastik lurus pada model teori Chua dan Lytton perlu dikaji semula.

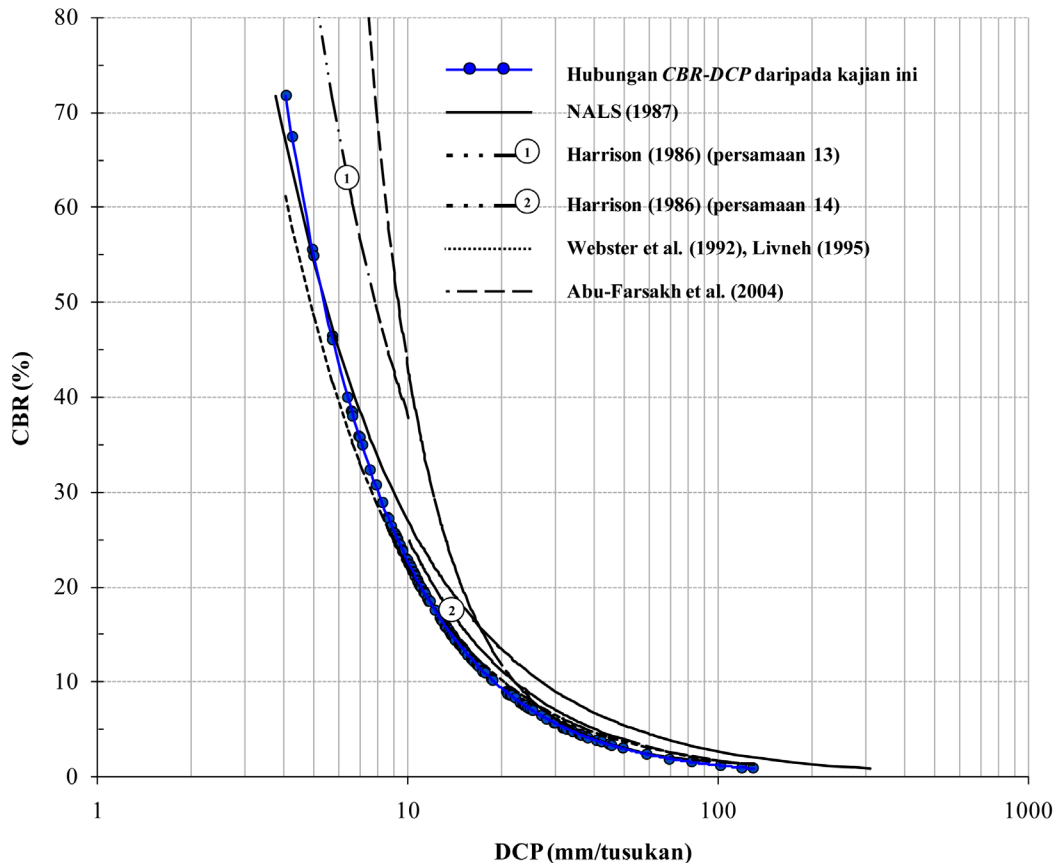
Hubungan antara DCP dan CBR daripada persamaan 10 yang dihasilkan daripada kajian ini seterusnya dibandingkan dengan model empirik daripada Webster et al. (1992), Livneh (1995), NALS (1987), Harrison (1986) dan Abu-Farsakh et al. (2004) sebagaimana diberikan dalam Rajah

8. Model empirik daripada Webster et al. (1992), Livneh (1995) dan NALS (1987) didapati mempunyai padanan yang baik dengan model empirik daripada kajian ini. Model Harrison (1986) untuk kadar *DCP* lebih daripada 10 mm/tusukan memiliki corak hampir sama dengan model kajian ini manakala untuk lengkung model lebih rendah daripada 10 mm/tusukan (persamaan 14) kelihatan sangat berbeza. Sementara itu, model yang dicadangkan Abu-Farsakh et al. (2004) hanya memiliki korelasi yang sesuai/baik dengan model empirik daripada kajian ini untuk kadar *DCP* yang

lebih besar daripada 20 mm/tusukan. Hal ini sesuai dengan hasil korelasi antara *DCP* dan modulus elastik sebagaimana ditunjukkan dalam Rajah 9.

CADANGAN PENILAIAN KUALITI SUBGRED MENGGUNAKAN HALAJU GELOMBANG RICIH

Berasaskan nilai korelasi *CBR* daripada model empirik dalam kajian ini (persamaan 7), kualiti kekukuhan



RAJAH 9. Perbandingan Antara Model Empirik *CBR-DCP* daripada Kajian Ini dengan Kajian daripada Webster et al. (1992), Livneh (1995), NALS (1987), Harrison (1986) dan Abu-Farsakh et al. (2004)

tanah subgred boleh dikelaskan merujuk pada sistem pengelasan yang dicadangkan oleh Baker et al. (1975). Pengelasan ini berguna bagi rekabentuk ketebalan turapan jalan dan penilaian nilai kekukuhan bahan untuk kerja-kerja penyelenggaraan. Jadual 8 menunjukkan korelasi antara kualiti kekukuhan tanah subgred yang diwakili oleh keupayaan gelas (*CBR*) berbanding nilai halaju gelombang ricih daripada korelasi empirik kajian ini. Jadual tersebut

juga menunjukkan satu pengelasan kualiti subgred baru menggunakan halaju gelombang ricih.

Berasaskan kategori pada Jadual 8 ini, kualiti bahan subgred di kedua-dua tapak uji kaji boleh dikelaskan sebagai lapisan subgred yang sangat baik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai *CBR* daripada persamaan empirik kajian ini iaitu 15 % untuk Jalan di Lingkungan 1 dan 12.66 % untuk Jalan di hadapan Pusat Kesihatan.

JADUAL 8. Kategori untuk Penilaian Subgred Turapan

Kategori	CBR (%)*	Halaju ricih (V_s)**
Sangat Baik (VG)	> 10	> 145
Baik (G)	> 6 – 10	> 110 – 145
Buruk (P)	3 – 6	75 - 110

* Sumber : Baker et al. (1975)

** Cadangan kategori kualiti kekukuhan subgred daripada korelasi empirik kajian ini (persamaan 7)

KESIMPULAN

Daripada kajian SASW yang dijalankan di atas turapan boleh lentur bagi menilai kualiti lapisan subgred, beberapa kesimpulan utama boleh diberikan sebagai berikut:

1. Kaedah SASW berupaya mengesan dengan baik nilai halaju gelombang ricih dan modulus elastik serta modulus ricih dinamik bahan lapisan subgred. Berasaskan parameter dinamik bahan ini, jenis tanah boleh dikelaskan dengan baik. Hasil pengkelasan daripada parameter dinamik bersesuaian dengan hasil pengkelasan tanah daripada sifat fizik dan kategori USCS.
2. Beberapa model empirik telah diterbitkan yang boleh digunakan untuk meramalkan keupayaan galas lapisan subgred bagi tujuan rekabentuk dan penyelenggaraan jalan. Ini termasuklah persamaan empirik antara modulus elastik dinamik bahan subgred terhadap nilai DCP dan CBR. Model empirik hubungan antara CBR-DCP pula telah diterbitkan dalam kajian ini.
3. Perbandingan model empirik modulus elastik dan parameter keupayaan galas (CBR dan DCP) dengan beberapa model empirik yang dicadangkan dengan kajian terdahulu (Huekelom & Klomp 1962; Pen 1990) turut menunjukkan hasil yang bersesuaian. Manakala model CBR-DCP bersesuaian dengan beberapa model empirik yang dicadangkan dengan kajian terdahulu (Webster et al. 1992; Livneh 1995; Harrison 1986; NALS 1987).
4. Perbezaan yang didapati antara model empirik daripada kajian ini dengan penyelidik sebelumnya adalah kerana terdapat perbezaan dalam kaedah pengukuran modulus elastik bahan. Kaedah SASW menghasilkan parameter modulus elastik dalam peringkat terikan yang kecil dan bahan berada dalam keadaan elastik lurus.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan terima kasih kepada Kementerian Sains, Teknologi dan Sekitaran, Malaysia bagi sokongan penyelidikan ini melalui projek IRPA No.09-02-02-0055-EA151, dan juga kepada Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Direktorat Jendera Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional yang masing-masing telah menyediakan peruntukan melalui

Engineering Research Grant 2004-2005 dan Dana Hibah Bersaing 2007.

RUJUKAN

- Abu-Farsakh, M. Y., Alshibli, K., Nazzal, M. & Seyman, E. 2004. Assessment of in-situ test technology for construction control of base courses and embankmen, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *Final Report (FHWA/LA.04/385)*, pp. 126.
- Baker, R. F., Byrd, L. G. & Mickle, D. 1975. *Handbook of Highway Engineering*. New York: van Nostrand Reinhold Co.
- Chen, J., Hossain, M. & LaTorella, T. 1995. Use of falling weight deflectometer and dynamic cone penetrometer in pavement evaluation. *Transportation Research Record* 1655: 145-151.
- Chua, K. M. & Lytton, R. L. 1981. Dynamic analysis using the portable dynamic cone penetrometer. *Transportation Research Record* 1192: 702-708.
- Das, B. M. 1993. *Principles of Soil Dynamics*. Boston: PWS-KENT Publishing Company.
- Ewing, W. M., Jardetzky, W. S. & Press, F. 1957. *Elastic Waves in Layered Media*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Gucunski, N. 1991. Generation of low frequency Rayleigh wave for the spectral analysis of surface wave method, Ph.D.Diss., University of Michigan, Ann Arbor.
- Harrison, J. A. 1986. Correlation of CBR and dynamic cone penetrometer strength measurement of soils. *Australian Road Research* 16(2):130-136.
- Heisey, J. S., Stokoe II, K. H. & Meyer, A. H., 1982. Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves. *Transportation Research Record* 852: 22-31.
- Heukelom, W. & Klomp, A. J. G. 1962. Dynamic testing as means of controlling pavements during and after construction. *Proc. the First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan*.
- Joh, S. H. 1996. Advance in interpretation & analysis technique for spectral analysis of surface wave (SASW) measurements, Ph.D. Diss., the University of Texas at Austin.

- Kabir, M. H. 2005. Residual soils as a material for landfill compacted soil liners, Master's Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Kausel, E. & Peek, R. 1982. Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution. *Bulletin of the Seismological Society of America* 72(5):1459-1481.
- Kausel, E. & Rössset, J. M. 1981. Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America* 71(6):1743-1761.
- Kim, D. -S., Shin, M. -K. & Park, H. C. 2001. Evaluation of density in layer compaction using SASW method. *Soil Dynamic & Earthquake Engineering* 21:39-46.
- Lai, C. G. & Rix, G. J. 1998. Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. *Research Report*. Georgia: Georgia Institute of Technology.
- Livneh, M., Ishai, I. & Livneh, N. 1995. Effect of vertical confinement on dynamic cone penetrometer strength values in pavement and subgrade evaluations. *Transportation Research Record* 1473:1-8.
- Marosi, K. T. & Hiltunen, D. R. 2004. Characterization of spectral analysis of surface waves shear wave velocity measurement uncertainty. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(10):1034-1041.
- Matthews, M. C. Hope, V. S. & Clayton, C. R. I. 1996. The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods. *Proc. 30th Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society*, pp.1-13.
- Ministry of Works Malaysia. 1987. National axle load study (NALS). *Technical Note* 3 & 17.
- Nazarian, S. & Stokoe II, K. H. 1984. In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. *Proc. of 8th World Conf. on Earthquake Engineering* 3:31-38.
- Nazarian, S. & Stokoe II, K. H. 1986. In situ determination of elastic moduli of pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave method (theoretical aspects). *Research Report* 437-2. Austin: Center of Transportation Research. Bureau of Engineering Research. The University of Texas at Austin.
- Pen, C. K. 1990. An Assessment of the Available Methods of Analysis for Estimating the Elastic Moduli of Road Pavements. *Proc. Third Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim.
- Powell, W. D., Potter, J. F., Mayhew, H. C. & Nunn, M. E. 1984. The structural design of bituminous roads. *TRRL Report LR 1132*, pp. 62.
- Prakash, S. & Gupta, M. K. 1970. Report on dynamic properties of soil for Diesel Power House Nakodar. *Earthquake Engineering Studies Report*. School of Research & Training in Earthquake Engineering. University of Roorkee. India
- Prakash, S., Basavanna, B. M. & Arya, A. S. 1986. Report on soil characteristics for heavy duty forging hammer foundation of Hindustan Aeronautics Ltd., Koraput. *Earthquake Engineering Studies Report*. School of Research & Training in Earthquake Engineering. University of Roorkee. India
- Puri, V. K. 1969. Natural frequency of block foundations under free and forced vibrations, Master Thesis, University of Roorkee.
- Rosyidi, S. A. 2004. Penilaian kekukuhan dinamik bahan lapisan turapan menggunakan kaedah SASW, Master Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S. A., Taha, M. R., Chik, Z. & Ismail. A. 2008. Determination of attenuation and geometric damping on clayey sand residual soil in irregular profile using surface wave method. *Proc. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp. 1-13, Goa, India.
- Rosyidi, S. A., Taha, M. R., Ismail, A. & Chik, Z. 2009. Penilaian kualiti subgred turapan menggunakan kaedah analisis spektrum gelombang permukaan. *Sains Malaysiana* 38(1):21-30.
- Stokoe II, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A. & Rössset, J. M. 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Woods, R. D. editor, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering Technical Committee 10. *Proc. 8th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 15-25. New Delhi, India.
- Webster, S. L., Grau, R. H., & Williams, R. P. 1992. Description and application of dual mass dynamic cone penetrometer. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, *Instruction Report*, No. GL-92-3.
- Sri Atmaja Rosyidi
Jabatan Kejuruteraan Awam,
Universiti Muhammadiyah Yogyakarta,
Jalan Lingkar Selatan, 55183 Yogyakarta,
Indonesia.
- Sri Atmaja Rosyidi & Mohd. Raihan. Taha
Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur,
Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia,
Bangi 43600, Selangor,
Malaysia.
- Khairul Anuar Mohd Nayan
Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur,
Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia,
Bangi 43600, Selangor,
Malaysia.

*Corresponding author; e-mail: atmaja_sri@hotmail.com

Received Date : 20th Sept 2006

Accepted Date : 24th April 2010

