

# INVESTIGASI SUB-PERMUKAAN TANAH UNTUK PERENCANAAN JALAN MENGUNAKAN SURVAI PEMBIASAN SEISMIK

Adi Purnomo  
Alumni Prodi Sarjana  
Jurusan Teknik Sipil  
Univ. Muhammadiyah Yogyakarta

Sri Atmaja P. Rosyidi\*  
Staf Pengajar  
Jurusan Teknik Sipil  
Univ. Muhammadiyah Yogyakarta  
Email: atmaja\_sri@umy.ac.id  
\*Korespondensi penulis

Anita Widianti  
Staf Pengajar  
Jurusan Teknik Sipil  
Univ. Muhammadiyah Yogyakarta  
Email: anita\_widianti@yahoo.com

## ABSTRAK

Survai pembiasan gelombang seismik merupakan salah satu pengujian lapangan yang tidak merusak (*non-destructive testing*, NDT). Metode ini sedang dikembangkan sebagai suatu pengujian untuk menilai struktur sub-permukaan tanah dalam disain perkerasan jalan. Makalah ini bertujuan untuk memberikan penjelasan penggunaan survai pembiasan seismik yang diimplementasikan dalam program perencanaan perkerasan jalan khususnya untuk menentukan daya dukung tanah berdasarkan perambatan gelombang seismik, ketebalan lapisan tanah yang ada dan jenis tanah. Survai pembiasan gelombang terdiri dari dua bagian yaitu pengambilan data di lapangan dan analisis untuk grafik waktu kedatangan (*intercept time*). Grafik ini selanjutnya digunakan untuk menentukan kecepatan rata-rata gelombang seismik Primer (P) pada tiap lapisan. Berdasarkan kecepatan rata-rata dan waktu kedatangan gelombang, ketebalan dan jenis tanah pada setiap lapisan dapat ditentukan. Empat metode analisis pembiasan gelombang seismik yaitu metode waktu penerimaan (*intercept time*), waktu tundaan (*delay time*), jarak kritis (*critical distance*) dan *Generalized Reciprocal Method GRM*; dibandingkan dalam studi ini. Hasil analisis survai pembiasan seismik yang diperoleh dari data primer menunjukkan bahwa keempat metode analisis tersebut dapat menunjukkan profil lapisan tanah dengan baik. Jenis tanah setiap lapisan dapat ditentukan dengan jelas yaitu lapisan pertama berupa tanah lempung berpasir, lapisan kedua tanah lempung bercampur pasir padat dan lapisan ketiga berupa formasi batuan padat. Perbandingan keempat metode analisis pembiasan gelombang seismik dalam kriteria ketepatan interpretasi nilai kecepatan gelombang P, ketebalan lapisan, kemudahan analisis dan validasi terhadap hasil profil tanah yang nyata dibahas dalam makalah ini.

**Kata kunci:** Survai pembiasan seismik, gelombang P, disain perkerasan jalan, metode NDT

## 1. PENDAHULUAN

Metode *dynamic cone penetrometer* (DCP) dan *California bearing ratio* (CBR) merupakan metode lapangan biasa digunakan untuk mengetahui stratifikasi lapisan tanah dan kapasitas dukung lapisan sub-permukaan tanah untuk parameter input perencanaan jalan. Meskipun, prosedur kerja kedua metode tersebut adalah mudah namun memerlukan waktu pelaksanaan yang lama karena dikerjakan dari titik ke titik pengukuran. Selain itu, intepretasi hasil dari kedua metode tersebut tidak mampu mewakili sifat modulus reaksi tanah yang sebenarnya yang diperlukan untuk perencanaan perkerasan jalan. Modulus reaksi hanya diperoleh berdasarkan model empirik yang hanya bisa digunakan pada keadaan yang terbatas.

Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pengujian yang mampu menampilkan stratifikasi profil tanah yang lebih terperinci, sekaligus dapat menunjukkan nilai kapasitas daya dukung tanah yang sesuai untuk perencanaan jalan, tanpa merusak dan ekonomis. Metode pembiasan

gelombang seismik (*seismic refraction method*) adalah suatu metode geofisika khususnya untuk industri perminyakan (Triumpf, 1992). Metode ini didasarkan kepada perekaman waktu kedatangan perambatan gelombang seismik Primer (gelombang P) yang dihasilkan dari suatu sumber gelombang buatan. Setelah mengalami perkembangan teknologi komputer, instrumentasi dan algoritma untuk analisis gelombang, metode pembiasan telah dikembangkan untuk tujuan mengevaluasi stratifikasi dan parameter kekakuan dinamik setiap lapisan profil sub-permukaan tanah pada pekerjaan konstruksi jalan. Makalah ini bertujuan untuk memberikan penjelasan penggunaan survai pembiasan gelombang seismik untuk mendapatkan daya dukung tanah (parameter kekakuan) yang diwakili oleh kecepatan gelombang primer, stratifikasi setiap lapisan dan untuk mengklasifikasi jenis tanah pada profil sub-permukaan tanah.

## **2. METODE PEMBIASAN GELOMBANG SEISMIK**

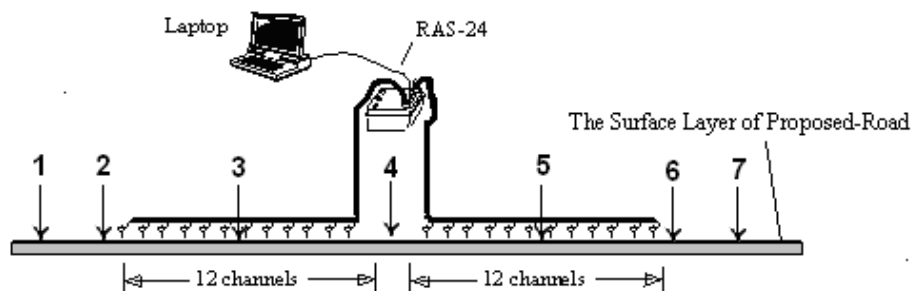
Kramer (1996) menjelaskan bahwa tipe gelombang yang terjadi di permukaan bumi terdiri dari gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan yang merambat dalam suatu media dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan pola gerakan partikelnya, yaitu gelombang Primer (P) dan gelombang Sekunder (S). Metode pembiasan gelombang adalah teknik geofisika yang memanfaatkan gelombang P dari energi impulsif. Energi impulsif adalah pembangkit dari sumber seismik berupa sumber mekanik (palu, pemberat dijatuhkan) dan sumber ledakan (dinamit), yang dipilih sesuai dengan kedalaman observasi tanah akan ditinjau. Getaran dari energi seismik yang berfrekuensi rendah dipancarkan oleh kedua sumber gelombang tersebut. Bentuk dari gelombang tergantung pada kondisi tanah sekitar dan kedalaman penetrasinya. Metode pembiasan gelombang biasa digunakan untuk menentukan kedalaman lapisan tanah keras, kemampuan lapisan tanah keras, kedalaman permukaan air di bawah tanah, atau kedalaman dari batas kecepatan seismik yang lain (Northwest Geophysical Associates Inc., 2002).

## **3. METODOLOGI PENELITIAN**

### **3.1 Konfigurasi Lapangan untuk Pengambilan Data**

Data yang digunakan dalam studi ini adalah data seismik gelombang primer yang diperoleh dari hasil pengujian gelombang seismik yang dilakukan di Malaysia. Survai seismik

pembiasan dilakukan pada trase perencanaan jalan melalui daerah perbukitan di Perlis State National Park yang terletak di bagian utara Perlis. Rencana jalan ini akan menghubungkan kota Kaki Bukit ke Wang Kelian, Malaysia. Pada survai pembiasan ini, digunakan unit akuisisi seismograf Seistronix RAS-24 dengan sistem interfase berkecepatan tinggi. Sebuah sistem komputer disambungkan dengan seismograf tersebut untuk melakukan operasi pengukuran dan perekaman data gelombang seismik (Gambar 1). Sistem RAS ini dilengkapi oleh dua set kabel konektor yang dihubungkan dengan 24 sensor geopon vertikal (*vertical geophones*). Dalam studi ini digunakan geopon dengan frekuensi natural 14 Hz dari produksi *mark*. Energi gelombang P dibangkitkan dari palu dengan berat 10 lbs yang dipukulkan ke plat baja di atas permukaan tanah untuk menghasilkan sinyal frekuensi rendah yang berkualitas baik. Data yang didapat dari seismograf RAS 24 merupakan data digital. Data gelombang dalam satu set pengukuran perlu dilakukan dengan konfigurasi titik sumber gelombang sebanyak 7 titik (Gambar 1).



Gambar 1. Konfigurasi pengukuran sistem RAS 24

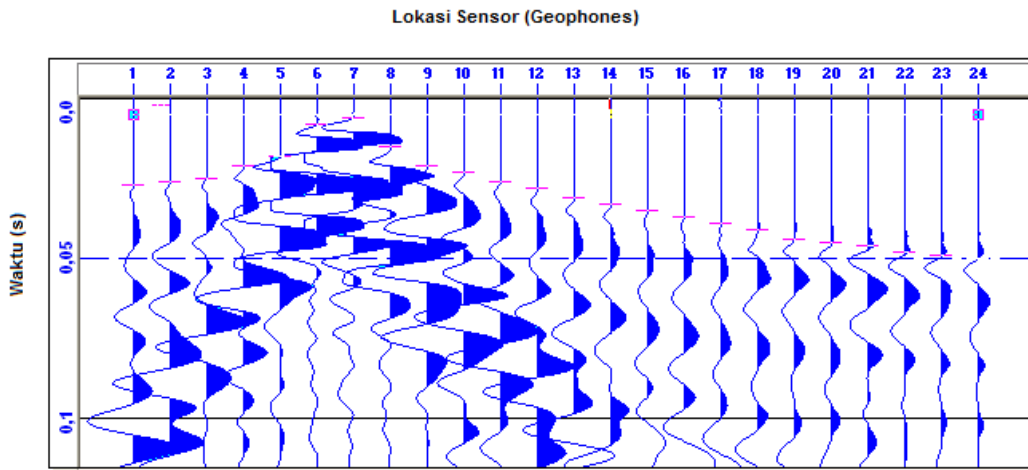
Titik pemukulan ke-1 dan 7, dan titik ke-2 dan ke-6 masing-masing diletakkan pada jarak 7 m dan 1 m dari geopon pertama dan terakhir. Titik ke-3 dan ke-5 masing-masing diletakkan di antara geopon 6 – 7 dan geopon 18 – 19. Titik pemukulan ke-4 diletakkan tepat di tengah-tengah susunan 2 geopon yaitu geopon ke 12 – 13. Untuk memperoleh kedalaman observasi sub-permukaan lebih dari 10 meter, jarak antara sensor ditentukan sejauh 3 m.

### 3.2 Deskripsi Metode Analisis

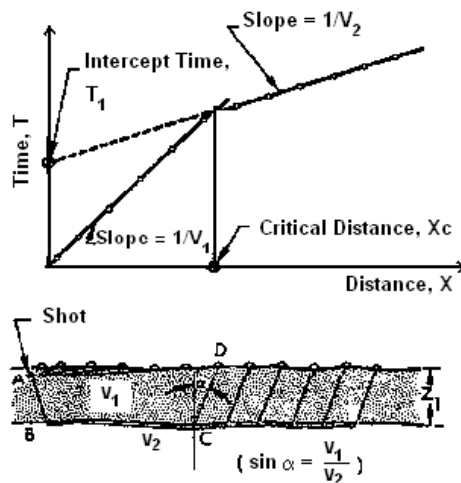
Dalam studi ini, digunakan empat metode analisis yaitu metode waktu penerimaan (*intercept time, IT*), jarak kritis (*critical distance, CD*), waktu tundaan (*delay time, DT*) dan *Generalized Reciprocal Method (GRM)*. Beberapa parameter utama pada analisis keempat metode tersebut dijelaskan pada bagian di bawah ini.

### 3.2.1 Kecepatan Gelombang Primer

Ketika energi gelombang dari suatu sumber mekanik dihasilkan di atas permukaan tanah, pada selang waktu tertentu satu rangkaian sensor geophon (*geophones*) yang diletakkan di permukaan tanah akan menerima sinyal dari energi gelombang yang merambat secara langsung dan yang terpantulkan dalam tanah (Gambar 2). Kedatangan corak amplitudo gelombang pertama kali dalam rekaman seismograf diidentifikasi sebagai gelombang P karena gelombang ini merambat tercepat dibandingkan dengan gelombang seismik lainnya (Yuan et al., 1999). Selanjutnya grafik plot waktu kedatangan pertama (*first arrival time*) gelombang yang diterima seluruh sensor yang digunakan untuk merekam data gelombang dapat ditentukan (Redpath, 1973) sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 2. Contoh rekaman gelombang seismik dalam domain waktu dari unit seismograf pada titik pemukulan 3



Gambar 3. Deskripsi geometrik pengukuran dan grafik waktu kedatangan terhadap jarak pada kasus profil tanah dua lapisan (Redpath, 1973)

Dengan menganalisis waktu kedatangan gelombang P sebagai fungsi terhadap jarak dari sumber gelombang, maka kecepatan gelombang seismik P pada media tanah dapat ditentukan. Contoh grafik plot waktu kedatangan pertama (*first arrival time*) gelombang terhadap jarak (Gambar 3) menunjukkan dua garis kemiringan (*slope*) yang merupakan nilai kecepatan gelombang P ( $V_1$  dan  $V_2$ ) untuk kasus dua lapisan yang berbeda. Garis  $V_1$  merupakan energi gelombang P yang diplot secara langsung dari perambatan gelombang P menuju ke geopon sedangkan garis  $V_2$  ditentukan dari rekaman gelombang P yang memantul dari lapisan kedua setelah satu jarak tertentu yang disebut sebagai jarak kritis (*critical distance*).

### 3.2.2 Ketebalan Lapisan

Ketebalan lapisan dari profil secara sederhana dapat dihitung dengan metode waktu penerimaan menggunakan persamaan:

$$Z_1 = \frac{T_i V_{P1} V_{P2}}{2(V_{P2}^2 - V_{P1}^2)^{1/2}} \quad (1)$$

dengan  $Z_1$  = kedalaman dari lapisan atas (m),  $T_i$  = *intercept time* untuk tiap lapisan (m/s),  $V_{P1}$  dan  $V_{P2}$  = kecepatan gelombang P pada lapisan pertama dan lapisan kedua (m/s). Untuk ketebalan lapisan kedua dapat dicari dengan persamaan:

$$Z_2 = \frac{1}{2} \left[ t_{i2} - \frac{2Z_1 \sqrt{V_{P3}^2 - V_{P1}^2}}{(V_{P3})(V_{P1})} \right] \frac{(V_{P3})(V_{P2})}{\sqrt{V_{P3}^2 - V_{P2}^2}} \quad (2)$$

dengan  $Z_2$  adalah ketebalan lapisan kedua dan  $V_{P3}$  = kecepatan gelombang P pada lapisan ketiga.

Metode yang kedua dari perhitungan ketebalan lapisan adalah metode jarak kritis. Dengan pendekatan yang serupa dalam rumus waktu penerimaan, ketebalan lapisan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Z_1 = \frac{X_c}{2} \frac{(1 - V_{P1}/V_{P2})}{\cos(\sin^{-1} V_{P1}/V_{P2})} \quad (3)$$

dengan,  $X_c$  adalah jarak kritis. Untuk ketebalan lapisan kedua dapat dicari dengan persamaan yang sama.

Metode yang ketiga adalah waktu tundaan yaitu perhitungan ketebalan menggunakan perbedaan waktu perjalanan gelombang dari titik pukulan pertama dengan titik pukulan terakhir. Metode waktu tunda mempunyai keunggulan yaitu profil ketebalan lapisan dapat diperhitungkan jauh lebih detil. Persamaan umum untuk perhitungan ketebalan dapat ditulis sebagai berikut:

$$Z_1 = \frac{\Delta T_1 V_{P1}}{\cos(\sin^{-1} V_{P1} / V_{P2})} \quad (4)$$

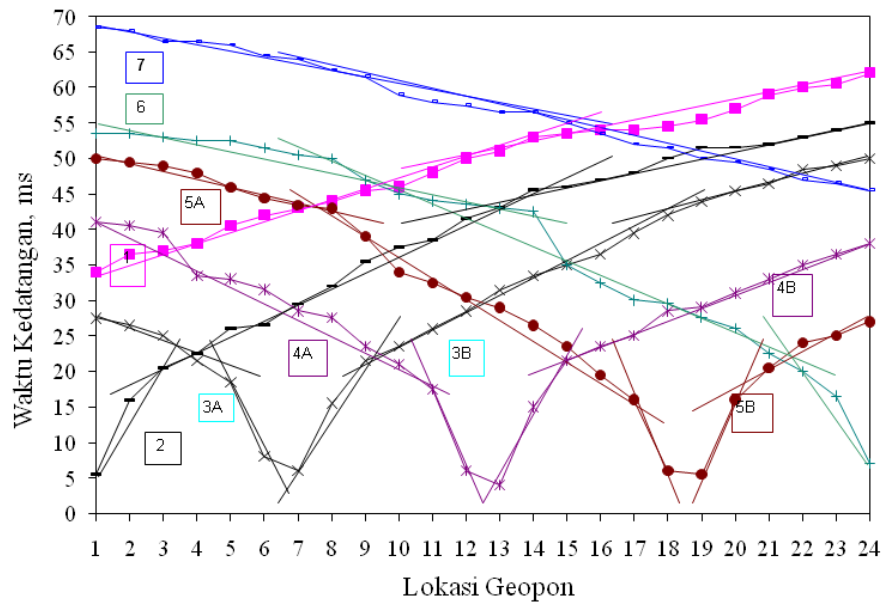
dengan,  $\Delta T_1$  adalah waktu tundaan pada geopon pada lapisan pertama. Untuk ketebalan lapisan kedua dapat dicari dengan persamaan yang sama.

Metode GRM dijalankan melalui analisis inversi tomografi antar data kecepatan gelombang P pada profil tanah yang didapatkan pada setiap garis geoponnya. Untuk mendapatkan bagian profil antar geopon dilakukan korelasi silang linier menggunakan analisis setiap pixelnya. Penjelasan penurunan persamaan pada metode GRM dapat dirujuk kepada Palmer (1986) dan W\_Geosoft (2001).

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Grafik Waktu Kedatangan terhadap Jarak (Geopon)

Grafik waktu kedatangan terhadap jarak (Geopon) ini merupakan grafik hubungan antara nilai waktu kedatangan pertama gelombang P pada tiap geophone (sebagai sumbu y) dengan jumlah geophone yang digunakan (sebagai sumbu x). Dari contoh data rekaman seismik (Gambar 2), ditentukan amplitudo pertama gelombang seismik yang terekam. Penentuan ini disebut sebagai analisis pemetikan (*picking analysis*). Dari satu titik pemukulan didapatkan 24 nilai waktu kedatangan dan jarak yang diwakili oleh lokasi sensor geopon. Data ini selanjutnya diplot dalam grafik dan prosedur yang sama dilakukan untuk data dari titik pemukulan lainnya. Gambar 4 menunjukkan plot grafik waktu kedatangan terhadap jarak (lokasi geopon) untuk ketujuh titik pemukulan pada lokasi pengujian. Dari setiap garis hubungan waktu kedatangan pada setiap titik pemukulan, dapat ditarik beberapa garis kemiringan kecepatan gelombang P. Tabel 1 menunjukkan hasil analisis kecepatan gelombang P dari keempat metode analisis yang digunakan. Nilai  $V_P$  yang dihasilkan dari setiap metode tidak sama kecuali untuk metode *CD* dan *DT*. Hal ini disebabkan oleh penggunaan kecepatan pada lokasi titik pukulan yang berbeda-beda. Pada metode *IT* kecepatan gelombang yang digunakan adalah pada titik pukulan 2 dan 6, sedangkan pada metode *CD* dan *DT* kecepatan gelombang yang digunakan adalah pada titik pukulan 2, 3, 4, 5, 6. Untuk metode *GRM*, analisis kecepatan dilakukan pada setiap pixel tomografi sehingga kecepatan dikategorikan pada setiap klasifikasi pixel dalam bilangan bulat. Meskipun demikian, metode *GRM* melakukan analisis lebih terperinci disebabkan profil kecepatan gelombang P di antara geopon juga turut.



Gambar 4 Plot waktu kedatangan gelombang P terhadap lokasi geopon (jarak)

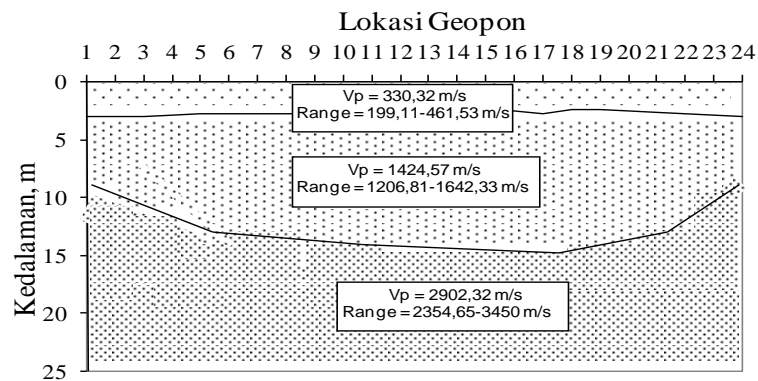
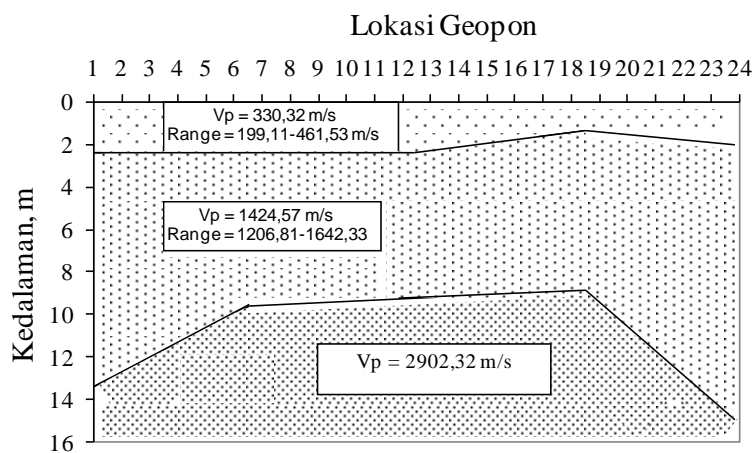
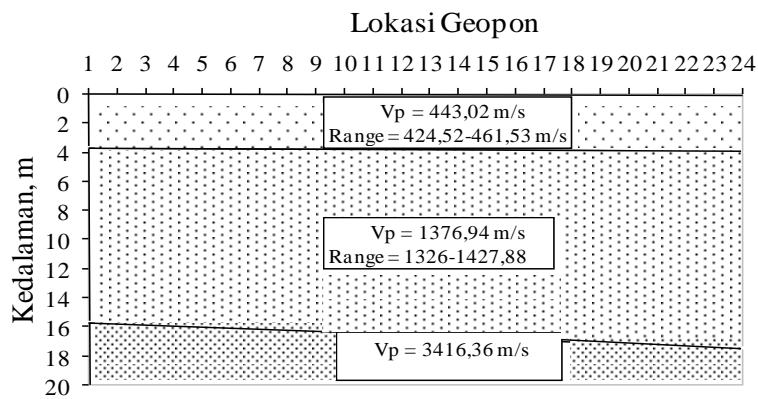
Tabel 1 Hasil perhitungan kecepatan gelombang Primer untuk seluruh metode analisis

Profil	Metode			
	<i>IT</i> (ms)	<i>CD</i> (ms)	<i>DT</i> (ms)	<i>GRM</i> (ms)
Lapisan ke 1	424,52 - 461,53	199,11 - 461,53	199,11 - 461,53	400-600
Lapisan ke 2	1326 - 1427,88	1206,81 - 1642,33	1206,81-1642,33	1000-1600
Lapisan ke 3	3382,72 - 3450	2354,65 - 3450	2354,65 - 3450	2800-5000

Gambar 5 dan 6 menunjukkan profil tanah pada lokasi kajian dari hasil analisis metode IT, CD, DT dan GRM. Keempat metode analisis menunjukkan bahwa profil tanah memiliki tiga lapisan tanah yang berbeda. Meskipun demikian, hasil stratifikasi lapisan dari keempat metode menunjukkan ketebalan yang berbeda. Kemiripan pola stratifikasi secara umum terlihat dari perbandingan antara hasil analisis metode CD dan metode tomografi GRM, sehingga pada kasus ini metode CD menghasilkan profil tanah dan stratifikasi sub-permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan metode IT dan DT.

#### 4.2 Klasifikasi Tanah berdasarkan Kecepatan Gelombang P

Tabel 2 menunjukkan hasil pengklasifikasian jenis tanah berdasarkan kecepatan rata-rata gelombang P berdasarkan tabulasi data klasifikasi batuan dan tanah dari Redpath (1973).

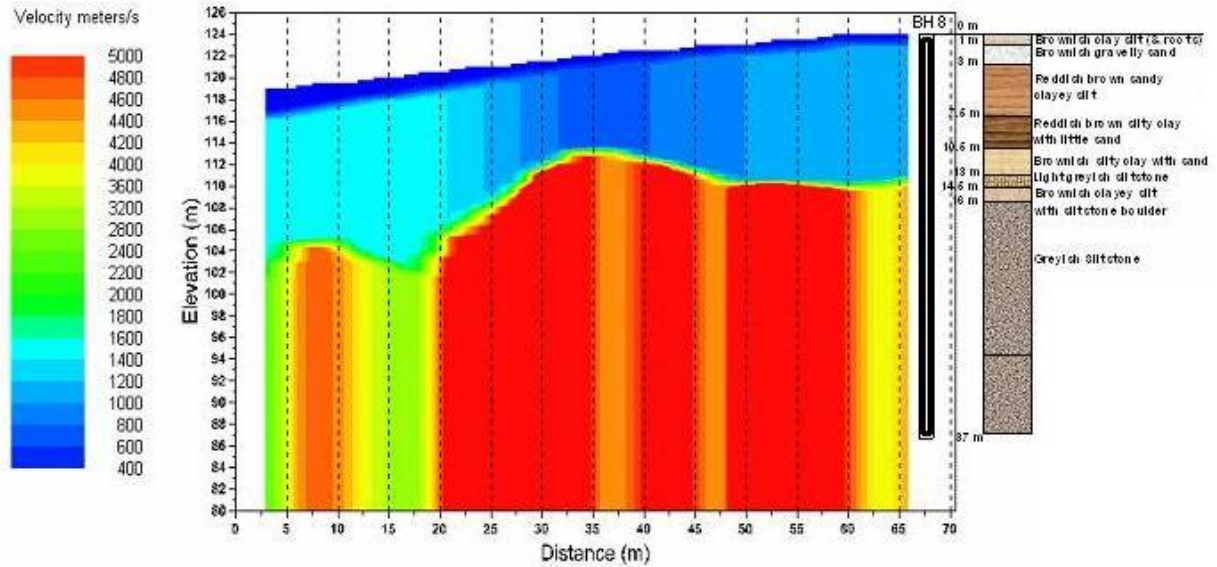


Gambar 5. Profil tanah hasil analisis survai pembiasan seismik menggunakan (a) metode *IT*, (b) metode *CD*, (c) metode *DT*

Satu pengujian pengeboran telah dilakukan berdekatan dengan lokasi pengujian untuk mendapatkan tebal lapisan aktual dan jenis tanahnya (Gambar 6). Hasil perbandingan menunjukkan bahwa hasil klasifikasi tanah berdasarkan kecepatan gelombang P (Tabel 1) mendekati dengan hasil pengeboran. Perbandingan terhadap jumlah dan ketebalan lapisan



sub-permukaan juga menunjukkan hasil yang relatif baik khususnya untuk metode CD dan metode GRM.



Gambar 6. Profil tanah hasil analisis survai pembiasan seismik menggunakan metode GRM dan hasil pengeboran pada lokasi yang berdekatan

Tabel 2 Pengklasifikasian tanah berdasarkan kecepatan rata-rata gelombang P

Profil	Metode IT	Metode CD dan DT	Metode GRM	Hasil Pengeboran (BH8) (Gambar 6)
	Jenis Tanah			
Lapisan 1	Tanah lempung ( <i>clay</i> ), Tanah lempung berpasir ( <i>sandy clay</i> )	Tanah lempung berlanau ( <i>silty clay</i> )	Tanah lempung berlanau ( <i>silty clay</i> )	Tanah lempung sedikit berlanau dan berpasir (1 – 3 m)
Lapisan 2	Tanah lempung padat dan basah ( <i>clay dense and wet</i> ), pecahan batuan ( <i>Fractured rock</i> )	Tanah lempung padat dan basah ( <i>clay dense and wet</i> ), pasir ( <i>sand</i> ), pecahan batuan ( <i>Fractured rock</i> )	Tanah lempung padat dan basah ( <i>clay dense and wet</i> ), pasir ( <i>sand</i> ), pecahan batuan ( <i>Fractured rock</i> )	Tanah lanau berlempung dengan sedikit pasir, pada bagian bawah mengandung pecahan batuan (3 – 16 m)
Lapisan 3	Formasi batuan padat ( <i>Basalt</i> )	Formasi batuan padat ( <i>Basalt</i> )	Formasi batuan padat ( <i>Basalt</i> )	Formasi batuan greyish siltstone (> 16 m)

## 5. PENUTUP

Dalam studi ini, telah ditunjukkan kemampuan metode NDT survai pembiasan seismik untuk mengevaluasi profil tanah dalam parameter daya dukung tanah yang diwakili oleh kecepatan gelombang P dan stratifikasi lapisan sub-permukaan tanah. Keempat metode yaitu metode

waktu penerimaan (*intercept time, IT*), jarak kritis (*critical distance, CD*), waktu tundaan (*delay time, DT*) dan *Generalized Reciprocal Method (GRM)*, menunjukkan hasil profil yang relatif baik dibandingkan dengan hasil pengeboran. Dari perbandingan secara keseluruhan didapatkan bahwa metode CD dan GRM merupakan teknik analisis terbaik untuk survai pembiasan gelombang P untuk menghasilkan profil sub-permukaan. Dari studi ini juga dapat disimpulkan bahwa survai pembiasan seismik terbukti mampu dikembangkan untuk survai lapangan pada kegiatan perencanaan jalan khususnya untuk menyediakan informasi daya dukung tanah, jenis tanah dan kondisi stratifikasi sub-permukaan tanah.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Kramer, S. L., 1996, **Geotechnical Earthquake Engineering**, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Northwest Geophysical Associates, Inc., 2002, **Technique-Seismic Refraction and Reflection**, Geophysical Services, Corvallis.
- Palmer, D., 1986, **Refraction Seismics**, Geophysical Press, London.
- Redpath, B. B., 1973, **Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations**, Technical Report E-73-4, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Explosive Excavation Research Laboratory, California.
- Triumpf, C.A., 1992, **Geofysik för Geotekniker – Metoder och tillämpningar** (geophysics for geotechnicians –methods and applications) dalam bahasa Swedia, Report T-31, Byggeforskningsrådet.
- W\_Geosoft., 2001, **Seismic Refraction Processing Software for Windows**, Instruction Manual, W\_Geosoft Geological and Geophysical Software, Lully Geneva.
- Yuan, D., Nazarian, S., Chen, D. Dan McDaniel, M., 1999, “Use of Seismic Methods in Monitoring Pavement Deterioration During Accelerated Pavement Testing with TxMLS”, **Proc.of International Conference on Accelerated Pavement Testing**, Nevada.