

BAB V

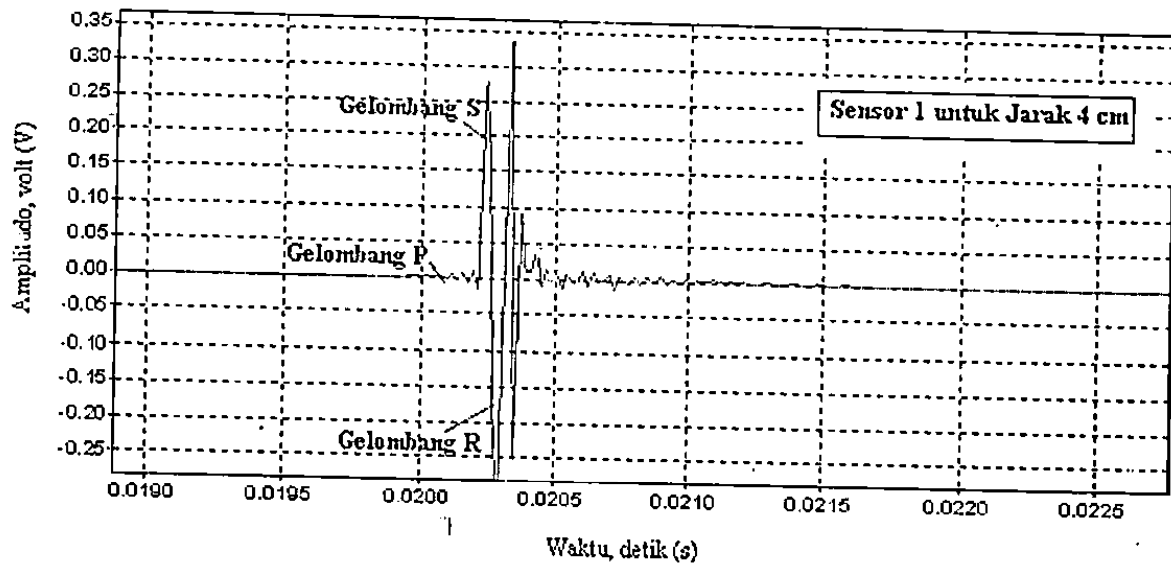
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Pendahuluan

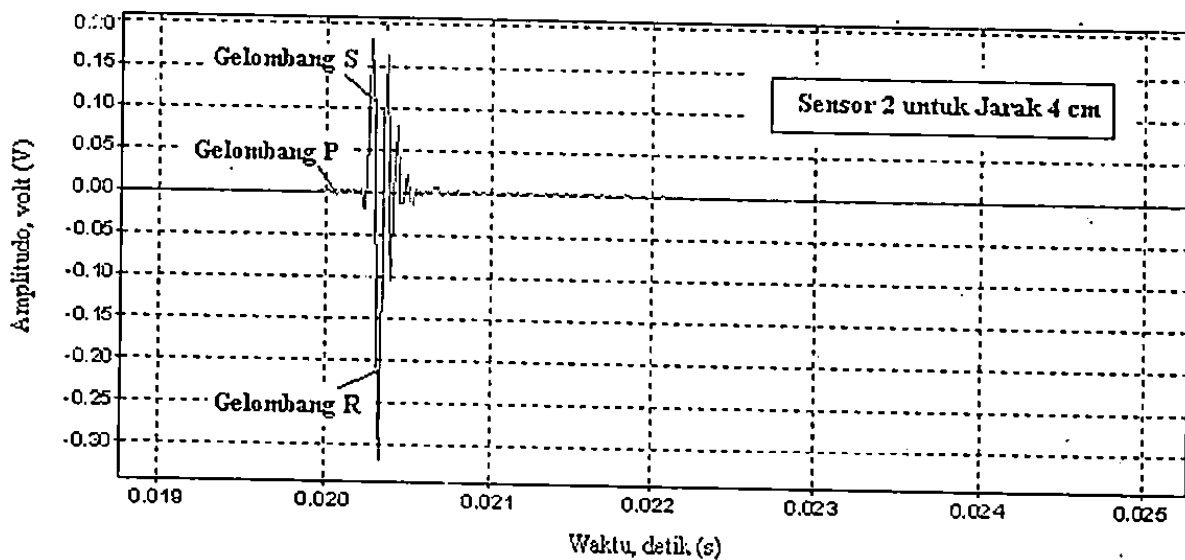
Dalam bagian ini dipresentasikan beberapa hasil yang menjadi inti kajian dalam penelitian ini. Pada bagian pertama disampaikan hasil analisis perambatan gelombang seismik menggunakan algoritma Cooley-Tukey atau FFT dan beberapa tampilan spektrumnya. Selanjutnya adalah pembangunan kurva dispersi kecepatan fase gelombang dan kelompok gelombang menggunakan metode beda fase. Profil kecepatan gelombang geser yang diinversikan dari kurva fase tersebut menggunakan matrik kekakuan dinamik 3 D adalah akhir paparan analisis gelombang seismik. Di akhir bagian ini adalah penentuan daya dukung tanah lapisan tanah dasar perkerasan lentur menggunakan beberapa model empiris yang telah dihasilkan dan uji validasi DCP terhadap hasil analisis tersebut.

5.2. Corak Gelombang Seismik

Salah satu rekaman data gelombang seismik dari hasil pengukuran pada sensor pertama dan kedua dengan jarak antara sensor 4 cm di atas lapisan permukaan perkerasan diberikan dalam Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Gelombang dihasilkan dari energi mekanik dari impak jatuh bebas bola baja berdiameter kecil untuk memberikan energi perambatan gelombang seismik berfrekuensi tinggi. Dari kedua rekaman sensor gelombang, dapat diamati terdapat tiga jenis gelombang utama yang terdeteksi oleh sensor, yaitu gelombang tubuh P terekam datang pertama kali dengan nilai amplitudo percepatan yang rendah, selanjutnya disusul penerimaan dari gelombang tubuh S dan gelombang permukaan R.



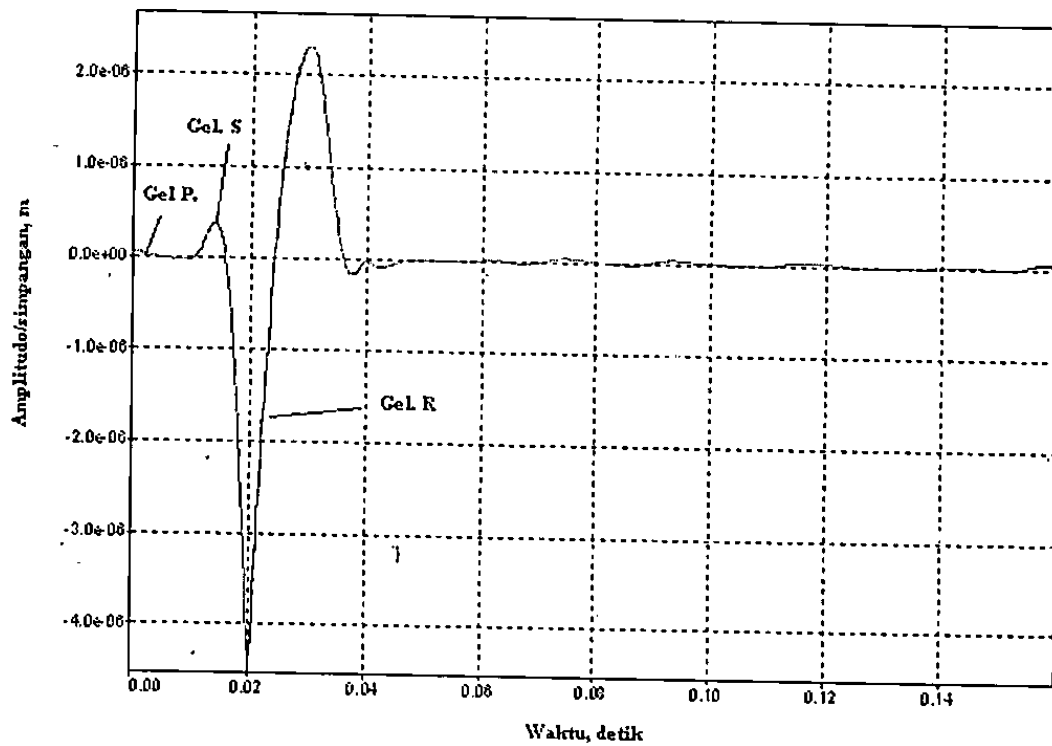
Gambar 5.1 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 4 cm



Gambar 5.2 Hasil rekaman sensor kedua untuk jarak antar sensor 4 cm

Pada jarak pendek (4 cm), sensor akan menerima interfensi gelombang tubuh P dan S yang cukup banyak. Selain itu, juga kemungkinan diterimanya gelombang pantulan tubuh cukup besar karena adanya gelombang yang memantul dari interface lapisan permukaan dan fondasi perkerasan jalan yang berbeda nilai kekakuannya. Gelombang pantulan ini nampak dari beberapa corak gelombang P yang diterima dan gelombang S. Amplitudo gelombang R yang diterima menunjukkan magnitudo yang tinggi dan nilainya gelombang

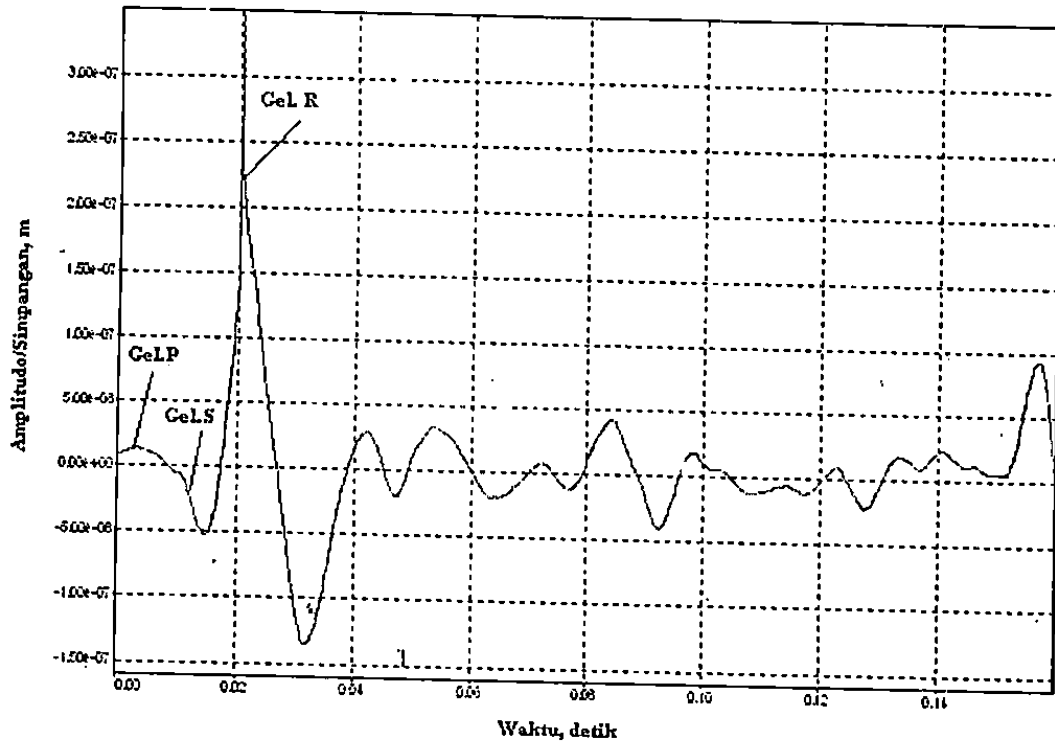
pengurangan energi pada nilai amplitudo di sensor pertama dan kedua. Kondisi ini sesuai dengan kajian teori bahwa sekitar 67 % energi gelombang mekanis dirambatkan dalam bentuk gelombang R. Karakteristik ini juga menunjukkan adanya peredaman gelombang pada material perkerasan jalan. Untuk melihat dissipatif energi ini, Gambar 5.3 memperlihatkan rekaman amplitudo gelombang seismik dari Gambar 5.1 yang diterjemahkan dalam unit simpangan (meter). Gelombang P membentuk simpangan yang kecil di awal perekaman data, yang selanjutnya diikuti oleh gelombang S. Untuk gelombang R sendiri, menghasilkan simpangan gelombang terbesar berbentuk sinusoidal yang selanjutnya terlihat energi gelombang akan teredam.



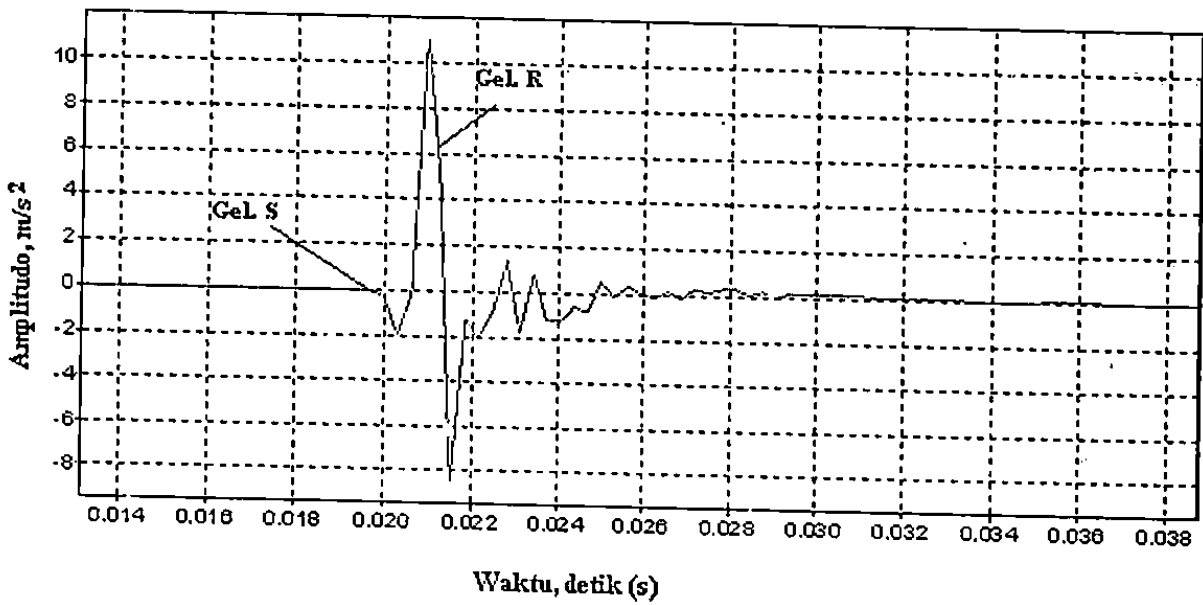
Gambar 5.3 Spektrum simpangan sensor pertama dalam jarak sensor 4 cm

Spektrum simpangan berdomain waktu untuk sensor kedua (Gambar 5.4) terlihat berbeda dari sensor pertama. Hal ini disebabkan energi yang diterima oleh sensor kedua terlihat berkurang dan corak gelombang (waveform) pun terekam sederhana dan tidak panjang (Gambar 5.2). Meskipun demikian, simpangan gelombang R terlihat sebagai dominasi energi dalam rekaman seismik yang diterima oleh sensor. Bentuk sinusoidal masih terlihat dalam rekaman ini.

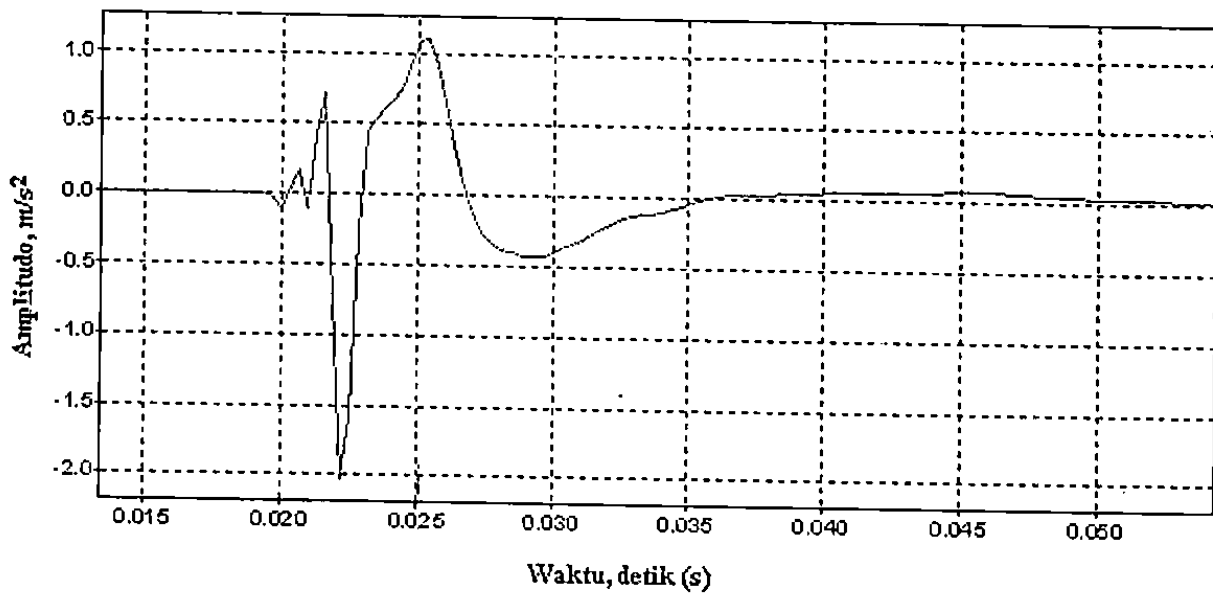
Gambar 5.4, meskipun demikian gangguan tersebut tidak mempengaruhi secara keseluruhan rekaman data gelombang.



Gambar 5.4 Spektrum simpangan sensor kedua dalam jarak sensor 4 cm



Gambar 5.5 Spektrum percepatan sensor kedua dalam jarak sensor 4 cm

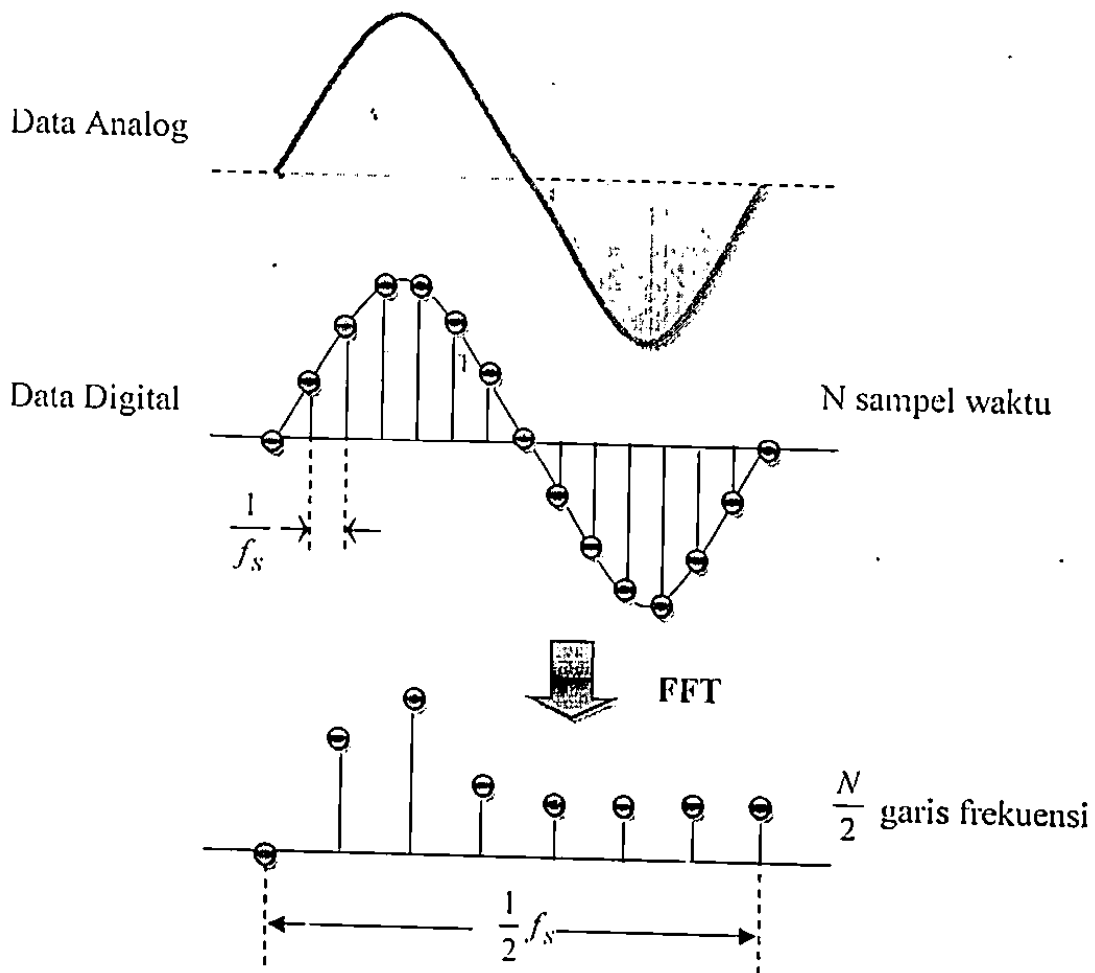


Gambar 5.6 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 200 cm

Corak rekaman gelombang dari sensor pertama dan kedua untuk pengukuran jarak antar sensor yang lebih panjang, yaitu 8, 16, 32, 64, 100 dan 200 cm adalah serupa. Meskipun demikian, terdapat ciri khusus untuk rekaman 64 cm ke atas, bahwa energi gelombang P dan S yang diterima oleh gelombang menunjukkan nilai yang tidak signifikan atau minimal, sebagaimana terlihat dalam Gambar 5.5 dan 5.6 yang menunjukkan rekaman gelombang untuk jarak sensor 64 dan 200 cm. Khusus untuk jarak 200 cm, corak gelombang seismik ditunjukkan sangat sederhana yaitu 3 hingga 4 corak sinusoidal saja. Ini karena interfensi gelombang tubuh sudah tidak terekam disebabkan jarak sensor yang jauh dari sumber gelombang, sehingga energi gelombang tubuh dan pantul menjadi hilang sebelum mencapai sensor. Pada kondisi ini, sumber energi perlu dihasilkan dari sumber gelombang mekanik bertenaga besar misalnya berat jatuh bebas atau palu berat. Dalam penelitian ini, palu dengan berat 5 kg dan pelat besi adalah digunakan untuk menghasilkan gelombang seismik adalah berfrekuensi rendah pada jarak sensor 64, 100 dan 200 cm. Selain sumber gelombang yang berenergi besar, gangguan sinyal berfrekuensi tinggi terkadang muncul akibat kondisi lingkungan, gelombang dari sumber

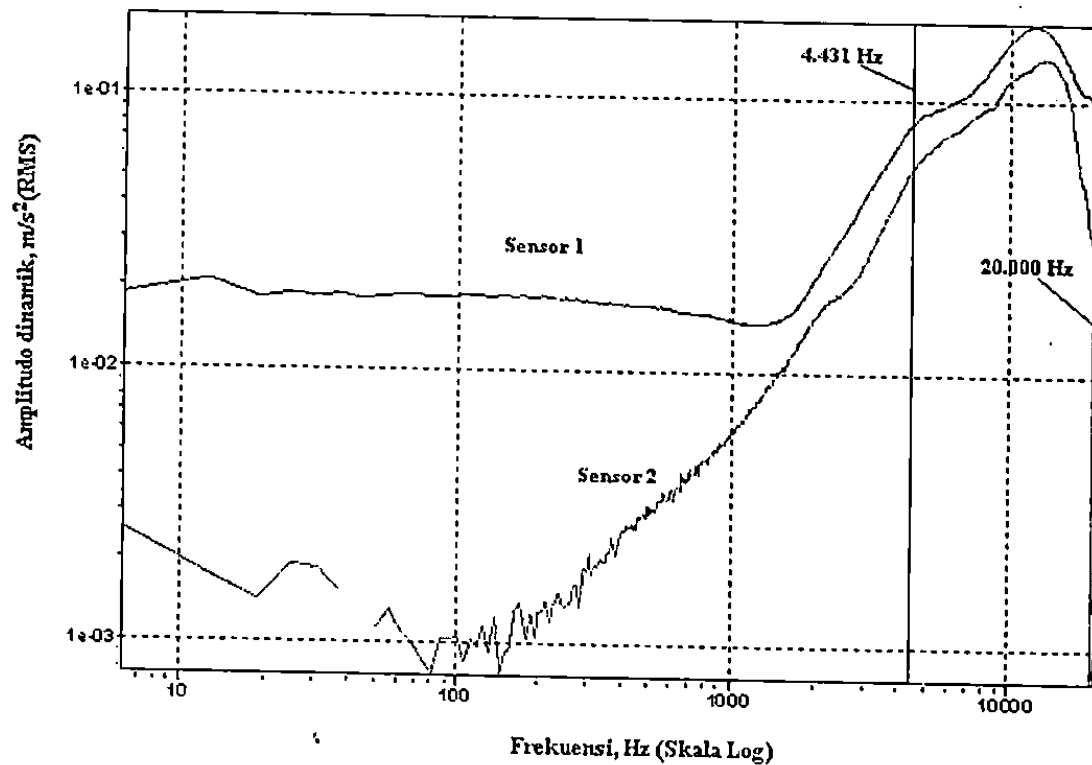
5.1.1 Analisis Cooley-Tukey dan Spektrum Gelombang Auto

Analisis selanjutnya yang perlu dilakukan untuk menghasilkan parameter ukur seismik dan parameter teknik untuk kualitas material perkerasan jalan adalah analisis Cooley-Tukey atau analisis FFT. Dalam analisis tersebut, data gelombang seismik berdomain waktu dialihkan/ditransformasikan ke dalam domain frekuensi. Tujuan utama analisis ini adalah mendapatkan parameter seismik yang lebih jelas berdomain frekuensi untuk dianalisis guna mendapatkan sifat bahan jalan. Penggunaan analisis frekuensi ini akan meminimalisasi penggunaan algoritma yang kompleks dalam analisis data seismik berdomain waktu (Rosyidi 2004).



Gambar 5.7 menunjukkan diagram proses sederhana tentang analisis domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma Cooley-Tukey atau FFT. Dasar algoritma yang digunakan adalah integral Fourier yang mendiskritkan suatu persamaan menggunakan fungsi dasar sinus dan kosinus. Data analog gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik dikonversikan ke dalam data digital menggunakan ADC atau unit akuisisi (penjelasan alat ini ada dalam bagian metodologi penelitian, Bab 3). Data blok digital diperlukan oleh algoritma dalam proses FFT untuk merubah domain waktu ke domain frekuensi. Selanjutnya beberapa tampilan spektrum bisa dihasilkan dari spektrum sinyal digital. Proses ini berjalan dalam fungsi linier sehingga aplikasi algoritma tidak kompleks.

Analisis data seismik yang pertama dilakukan untuk mendapatkan respon energi dalam domain frekuensi melalui plot spektrum auto-density. Algoritma untuk membangun spektrum auto-density dapat dilihat dalam Persamaan 2.23 dan 2.24. Gambar 5.8 menunjukkan spektrum auto-density hasil analisis FFT dari rekaman data seismik Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Amplitudo gelombang seismik berdomain waktu yang direkam telah ditransformasikan ke bentuk frekuensi. Melalui spektrum ini dapat diperoleh bahwa perambatan gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik (jatuhan bebas bola baja kecil), merambat dengan frekuensi puncak gelombang pada 12 kHz dan berdasarkan analisis wilayah gelombang yang diterima (*acceptable range*) dengan metode Bandwith (Kramer 1996; Rosyidi 2004), diperoleh wilayah frekuensi respon antara 4,43 – 20 kHz. Wilayah gelombang ini menunjukkan frekuensi tinggi dimana sesuai untuk karakteristik bahan yang keras. Pada jarak antar sensor sejauh 4 cm, dengan sumber frekuensi tinggi akan menghasilkan gelombang akan merambat pada permukaan yang dangkal atau lapisan permukaan saja. Ia menunjukkan karakteristik parameter seismik berupa frekuensi respon untuk lapisan perkerasan yang tersusun dari campuran aspal. Melalui cara yang sama dengan plot spektrum auto untuk lapisan permukaan jalan, dari jarak sensor 16 dan 32 cm, dan jarak sensor 64, 100 dan 200 cm dapat juga

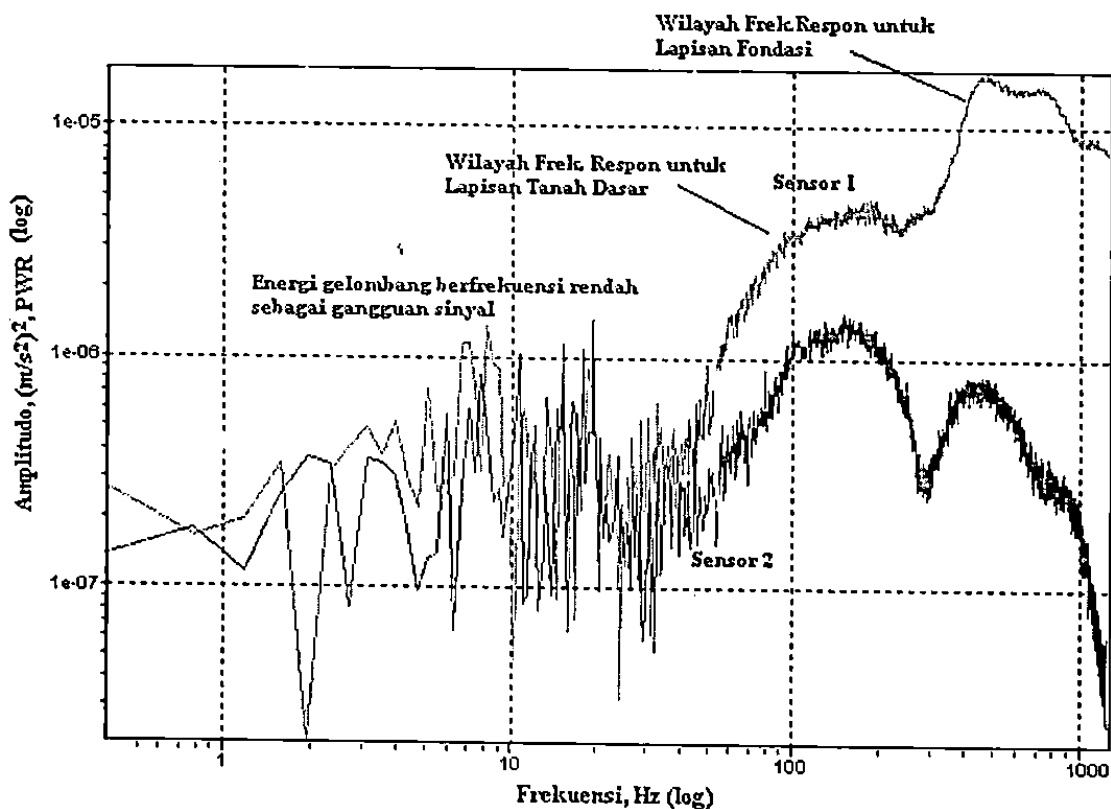


Gambar 5.8 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 64 cm

Pada konfigurasi pengukuran jarak sensor 64 cm ditafsirkan mampu mendeteksi perambatan gelombang seismik pada peralihan lapisan fondasi dan tanah dasar. Melalui spektrum auto yang ditampilkan (Gambar 5.9), kedua wilayah respon frekuensi bagi kedua lapisan penyusun perkerasan tersebut dapat dikenali dengan baik. Lapisan fondasi jalan dideteksi memiliki respon frekuensi di atas 400 Hz yang dilihat dari puncak kedua spektrum auto, sedangkan lapisan tanah dasar diidentifikasi pada wilayah frekuensi antara 40 hingga 300 Hz. Untuk mendapatkan konsistensi respon frekuensi pada lapisan tanah dasar, spektrum auto untuk jarak sensor 100 atau 200 cm dapat digunakan. Spektrum auto pada jarak sensor 200 cm menampilkan analisis respon frekuensi pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan dan tanah asli pada lokasi pengujian (di Jalan Wonosari/Piyungau-Gading).

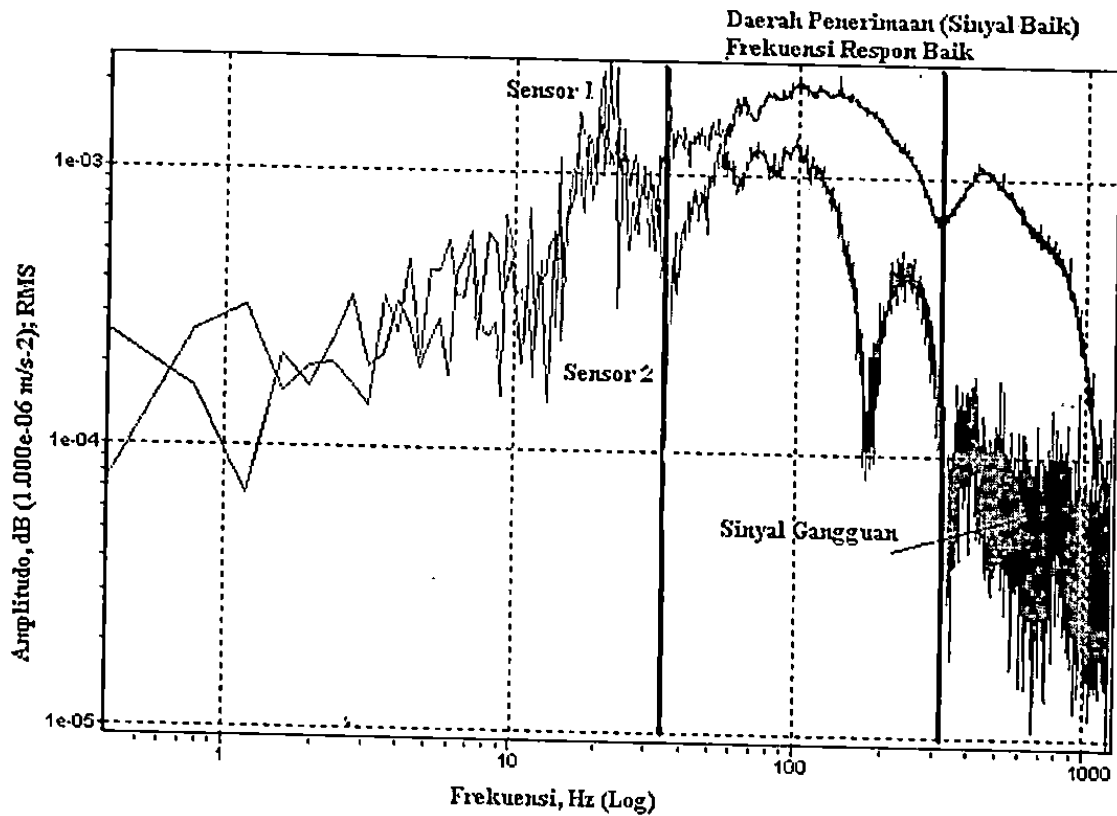
Hasil spektrum auto menunjukkan wilayah frekuensi respon yang baik dari analisis gelombang yang diterima adalah 32 hingga 300 Hz (Gambar 5.10), hal ini menunjukkan konsistensi hasil dengan rekaman jarak 64 cm (Gambar 5.9). Wilayah frekuensi di bawah dan atas daerah tersebut menunjukkan corak grafik energi (dalam konteks fungsi

frekuensi gelombang tidak dominan. Sinyal gangguan pun dapat terdeteksi dengan baik menggunakan tampilan spektrum auto pada sensor kedua. Gangguan ini diperoleh karena energi gelombang pada frekuensi di atas 300 Hz yang diterima oleh sensor kedua adalah lemah dan sinyal gangguan dari sumber lain lebih mendominasi dengan corak yang random. Pada keadaan ini, tampilan spektrum telah memberikan informasi respon frekuensi gelombang yang baik bagi pendeteksian respon seismik pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan.



Gambar 5.9 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 4 cm

Analisis spektrum auto tersebut di atas membuktikan bahwa terdapat keuntungan penggunaan algoritma Cooley-Tukey atau metode FFT untuk menganalisis respon

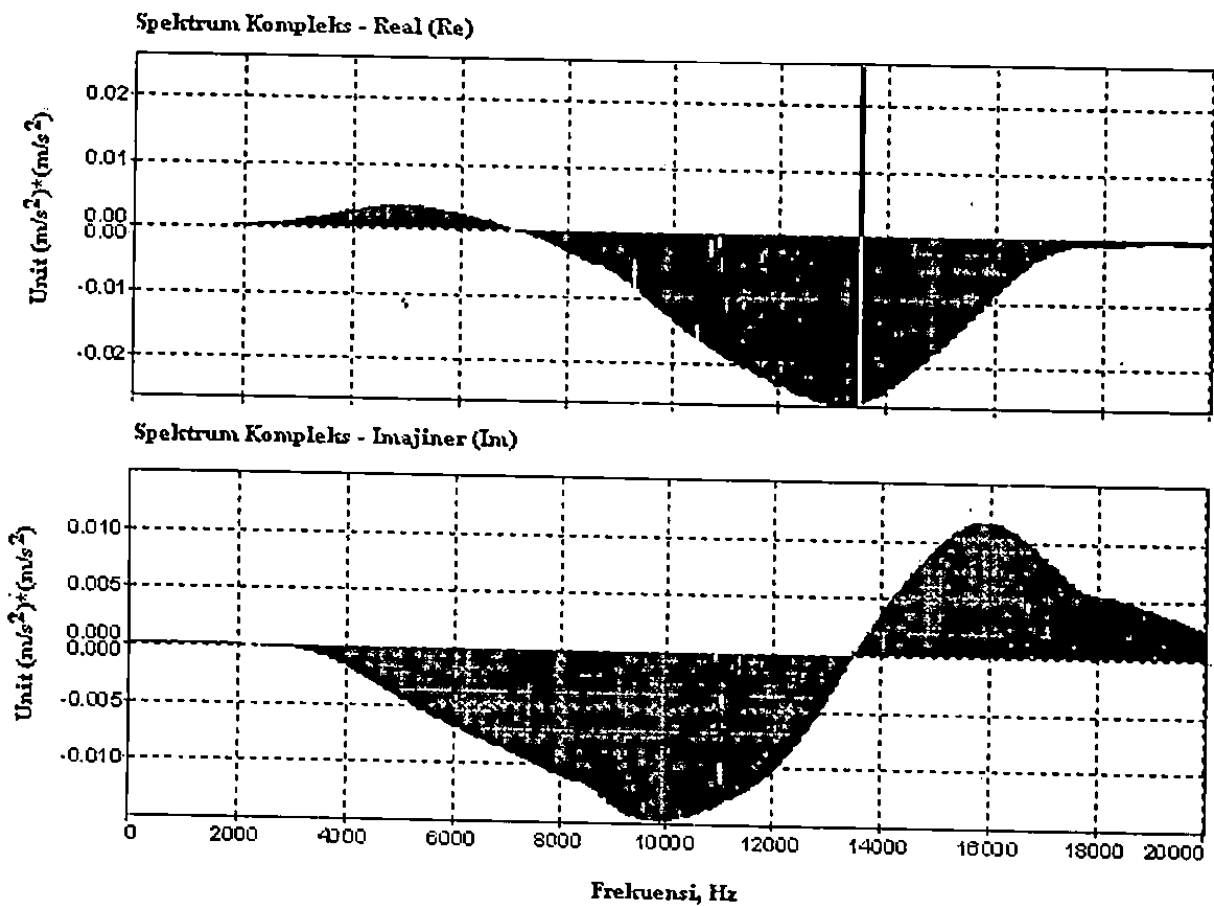


Gambar 5.10 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 200 cm

5.1.2 Analisis Spektrum Gelombang Tenaga Silang dan Fungsi Transfer

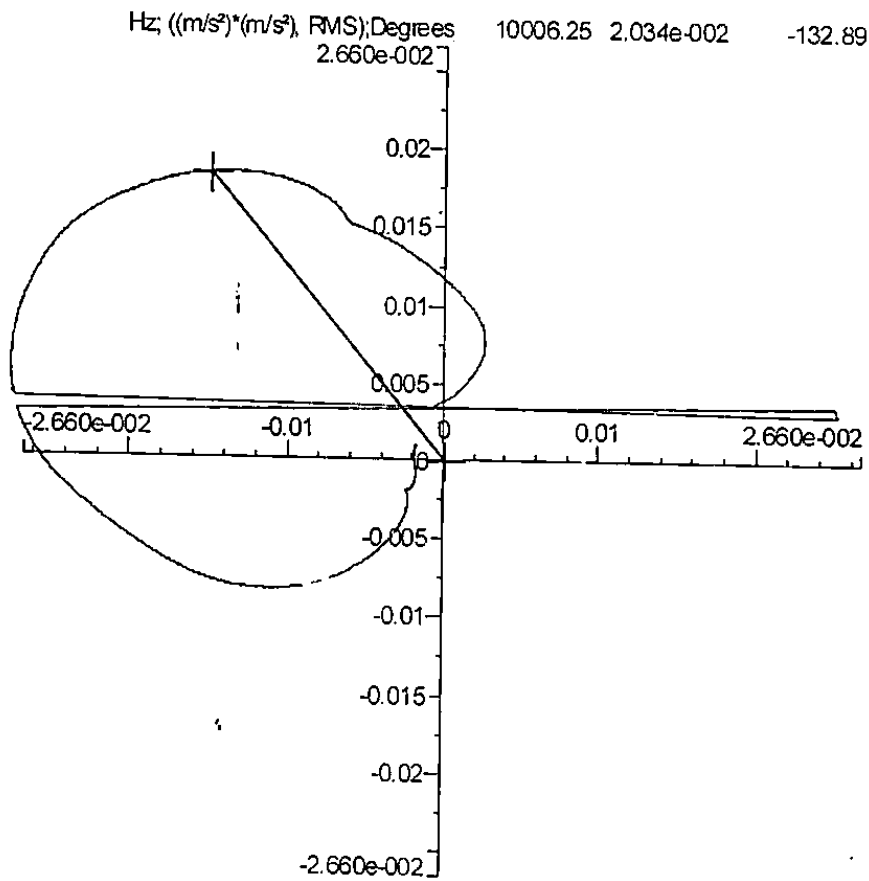
Untuk mendapatkan karakteristik seismik kekakuan bahan, data spektrum auto perlu terlebih dahulu dianalisis ke dalam spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*) dan fungsi transfer (*transfer function spectrum*). Pengoperasian spektrum tersebut adalah untuk mengidentifikasi kesamaan dan keterkaitan (*similarity*) di antara dua sinyal yang diterima. Fungsi ini juga dikenali sebagai fungsi gerak balas/reaksi frekuensi dalam bentuk perubahan waktu (*time-shift*). Dari data ini diperoleh informasi identitas waktu tertentu yang dideteksi oleh sensor pertama dan selanjutnya sebagai identitas di sensor kedua. Selisih identitas waktu tersebut akan sama dengan selisih waktu untuk mencari kecepatan perambatan gelombang yang merambat di antara kedua sensor. Gambar 5.11 menunjukkan spektrum kompleks dari tampilan spektrum tenaga silang dari pengukuran data seismik pada jarak antar sensor 4 cm. Dari Gambar 5.11 dapat dianalisis dalam bentuk spektrum Nichols/Nyquist untuk melihat plot corak kekompleksan sinyal yang

diperolehi bahwa corak gelombang yang diterima oleh sensor pertama dan kedua dari jarak pengukuran 4 cm adalah sama dan saling terkait. Corak sederhana dan jelas ditunjukkan dalam spektrum Nichols/Nyquist (Gambar 5.12). Hal ini juga mengindikasikan bahwa sinyal gangguan dari sumber lain (misalnya lalu lintas, sumber getaran di sekitar lokasi, gerakan bumi, pengaruh interfensi gelombang listrik, dll.) berfrekuensi tinggi tidak ditemui dalam pengukuran jarak sensor 4 cm.

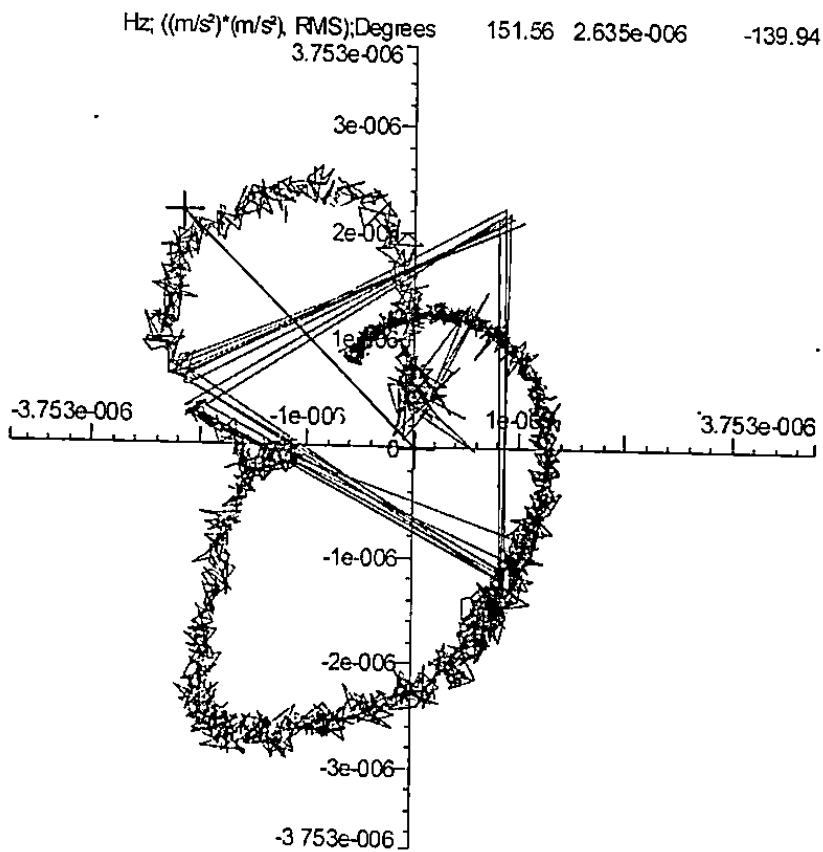


Gambar 5.11 Spektrum-tenaga silang dalam bentuk kompleks untuk jarak sensor 4 cm.

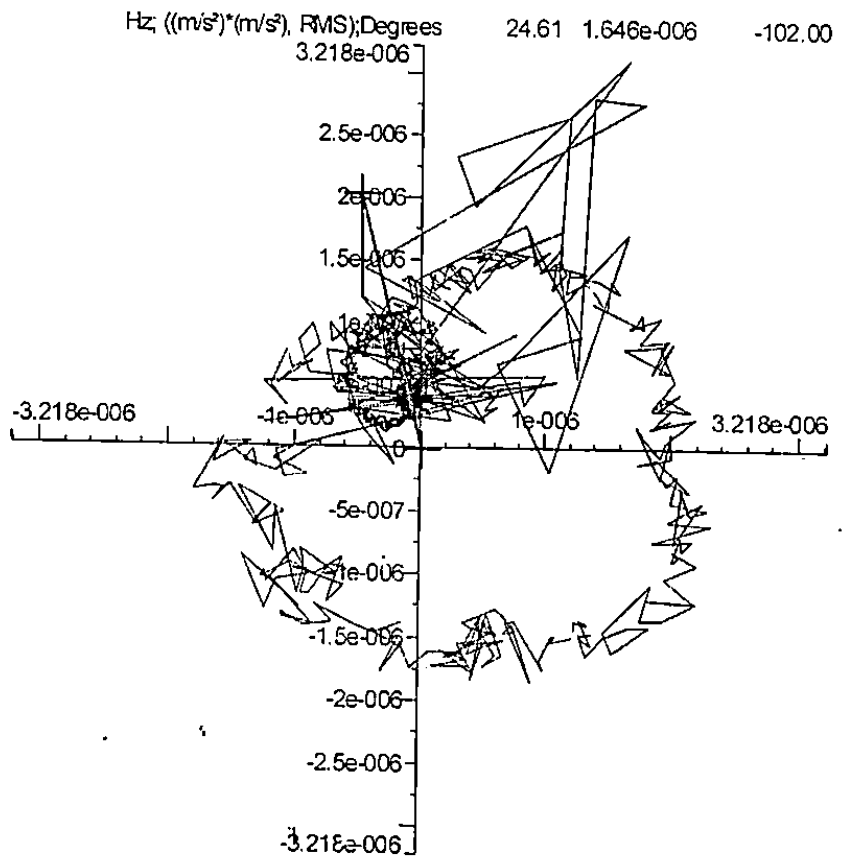
Kondisi ini berbeda dengan spektrum Nichols/Nyquist pada jarak sensor 64 dan 200 cm. Gambar 5.13 dan Gambar 5.14 menunjukkan tampilan Re dan Im dalam spektrum Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 64 dan 200 cm. Corak spektrum lebih kompleks dan diidentifikasi terdapat sinyal gangguan yang masuk pada frekuensi yang sama dengan gelombang seismik yang dihasilkan dari sumber mekanik. Ini menyebabkan terdapat simpangan random yang dihasilkan dalam spektrum. Pada kondisi ini teknik



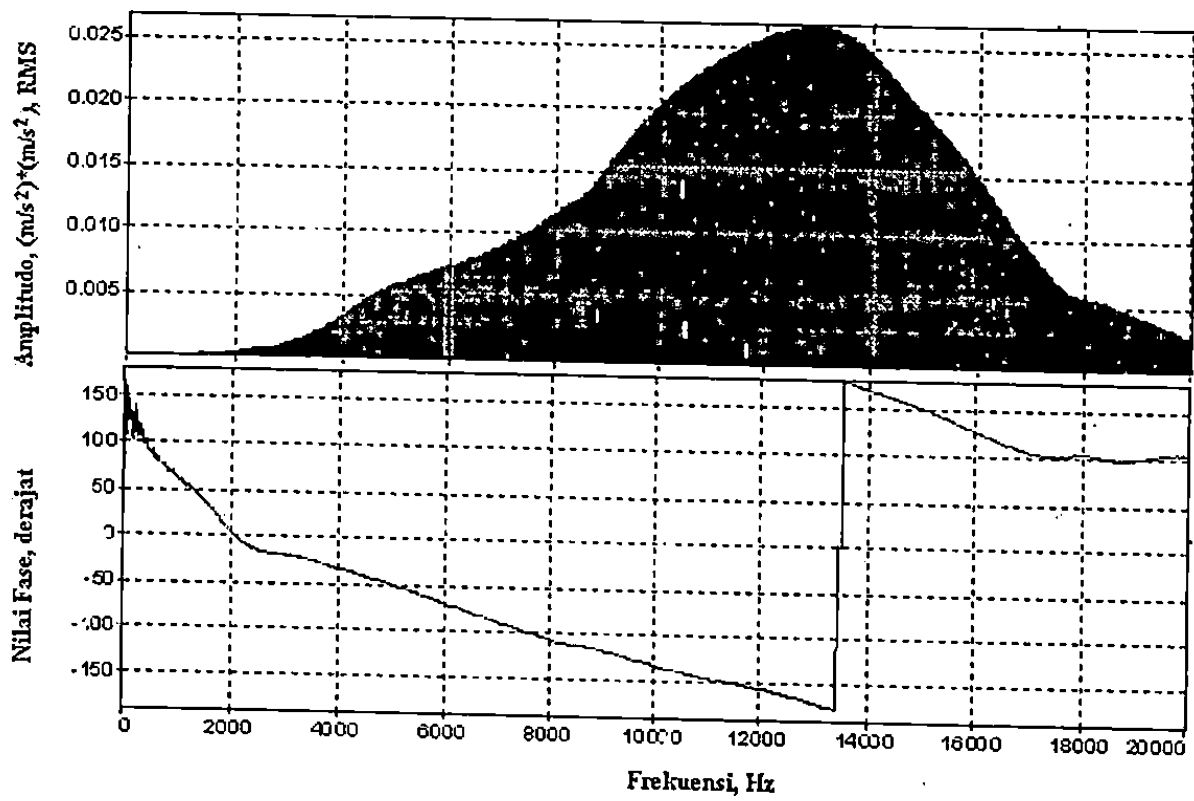
Gambar 5.12 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 4 cm



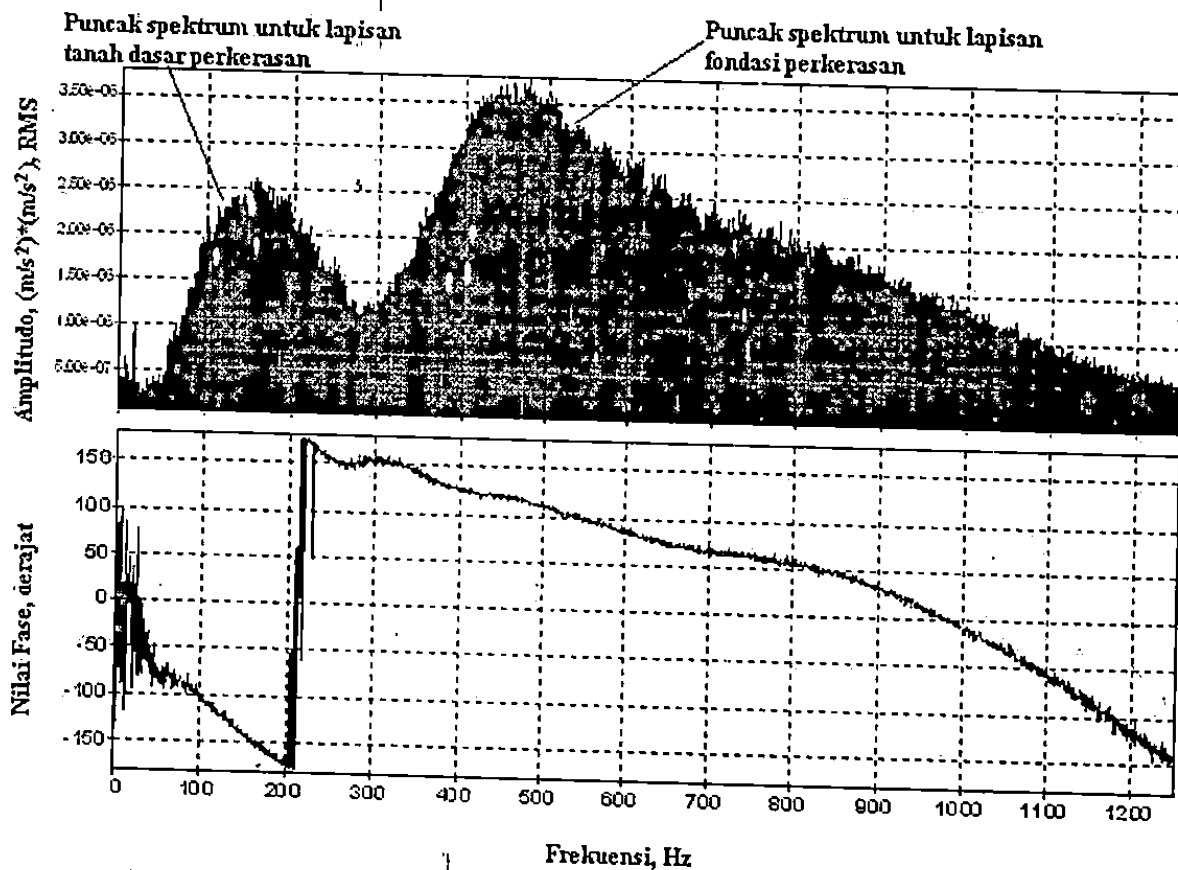
Gambar 5.13



Gambar 5.13 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 200 cm



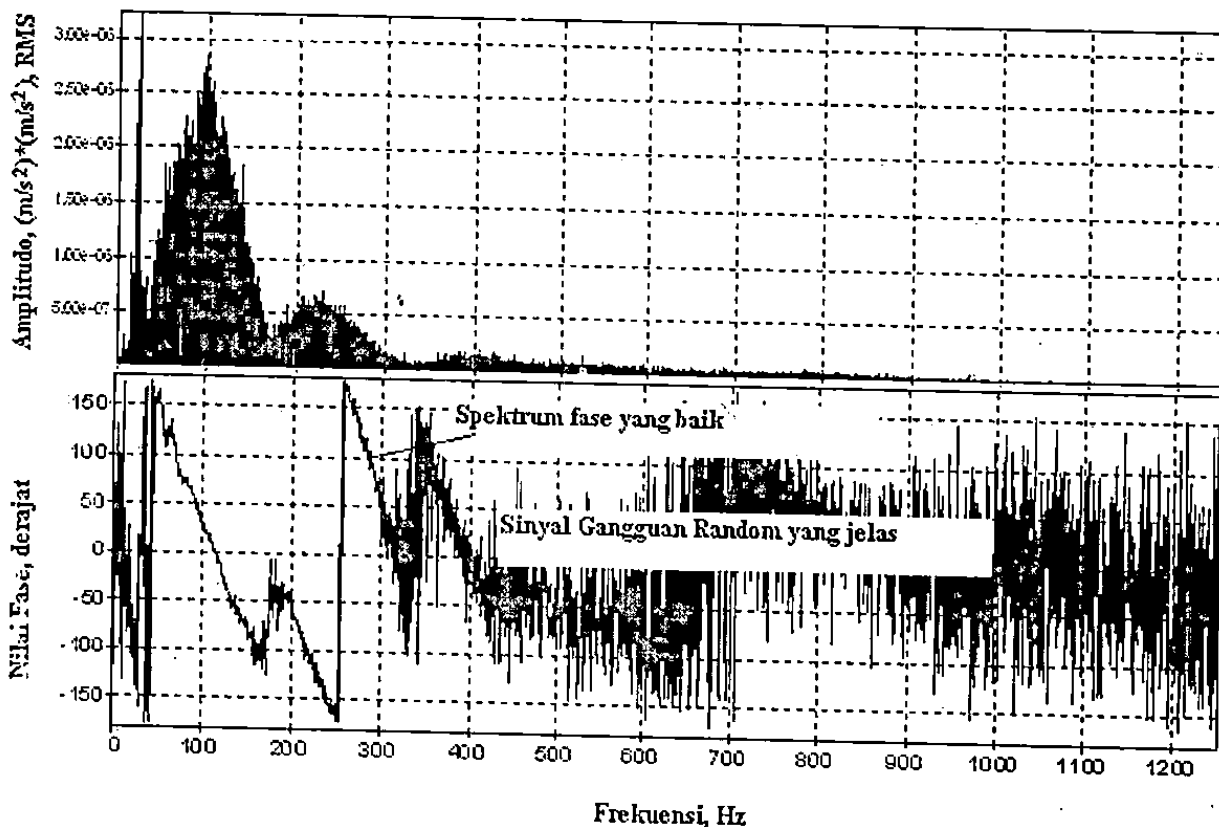
Gambar 5.14 menunjukkan hasil akhir spektrum tenaga silang dan fungsi transfer dari data seismik pengukuran 4 cm. Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa kejelasan corak gelombang dalam data pengukuran 4 cm (dilihat dari bentuk spektrum Nichols/Nyquist) akan menghasilkan spektrum tenaga silang yang baik yang menunjukkan kejelasan, kesamaan dan keterkaitan sinyal antara sensor pertama dan kedua. Spektrum fungsi transfer yang dihasilkannya pun menunjukkan satu corak yang baik dan jelas yang ditunjukkan dalam data beda fase sebagai fungsi beda waktu terhadap nilai frekuensinya.



Gambar 5.15 Spektrum fase dari pengukuran 64 cm

Spektrum gelombang untuk pengukuran 64 cm diberikan dalam Gambar 5.15. Dari gambar spektrum didapati bahwa puncak spektrum silang dideteksi memiliki dua puncak, puncak pertama diindikasikan sebagai wilayah frekuensi untuk lapisan tanah dasar dan wilayah kedua untuk lapisan fondasi. Spektrum fase yang dihasilkan (fungsi transfer)

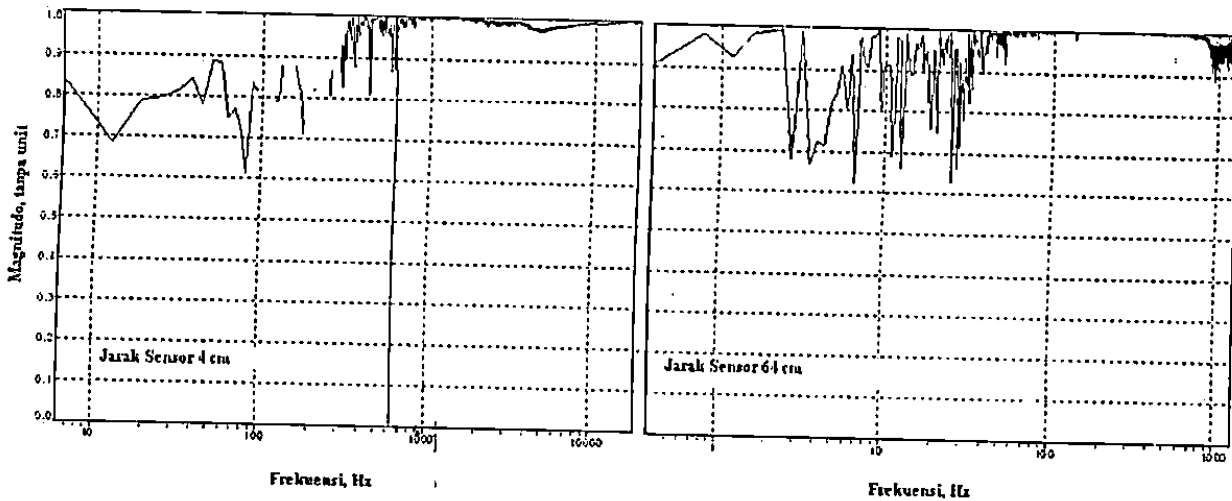
menunjukkan adanya gangguan sinyal random yang tidak signifikan. Untuk menunjukkan parameter seismik beda fase gelombang untuk lapisan tanah dasar, Gambar 5.16 menjelaskan spektrum fungsi transfer untuk pengukuran 200 cm. Dari gambar diperoleh bahwa corak yang ditunjukkan memiliki gangguan sinyal random sepanjang frekuensi tangkapan, meskipun demikian plot spektrum fase masih terlihat dengan jelas. Teknik penyaringan *low-band* bisa digunakan untuk meminimalisasi gangguan ini.



Gambar 5.16 Spektrum fase dari pengukuran 200 cm

Dari plot spektrum fase terlihat bahwa spektrum dari kedua jarak sensor memiliki wilayah frekuensi yang berbeda. Untuk jarak pengukuran 4 cm, memiliki wilayah frekuensi hingga 20 kHz. Berdasarkan nilai frekuensinya, spektrum fase menunjukkan nilai kecepatan gelombang pada lapisan permukaan aspal. Nilai ini didasarkan bahwa pada frekuensi tinggi dengan panjang gelombang pendek akan dihasilkan nilai kecepatan gelombang fase yang tinggi pula. Untuk jarak sensor 64 cm, terlihat wilayah frekuensi yang dihasilkan hingga 1200 Hz, data beda fase ini menunjukkan bahwa gelombang

lapisan fondasi atau sebagian lapisan tanah dasar. Sedangkan untuk spektrum fase 200 cm, nilai frekuensi antara 32 hingga 300 Hz menunjukkan eksistensi parameter seismik yang merepresentasikan lapisan tanah dasar yang akan menjadi tumpuan perhatian dalam penelitian ini mendapatkan daya dukung tanah.

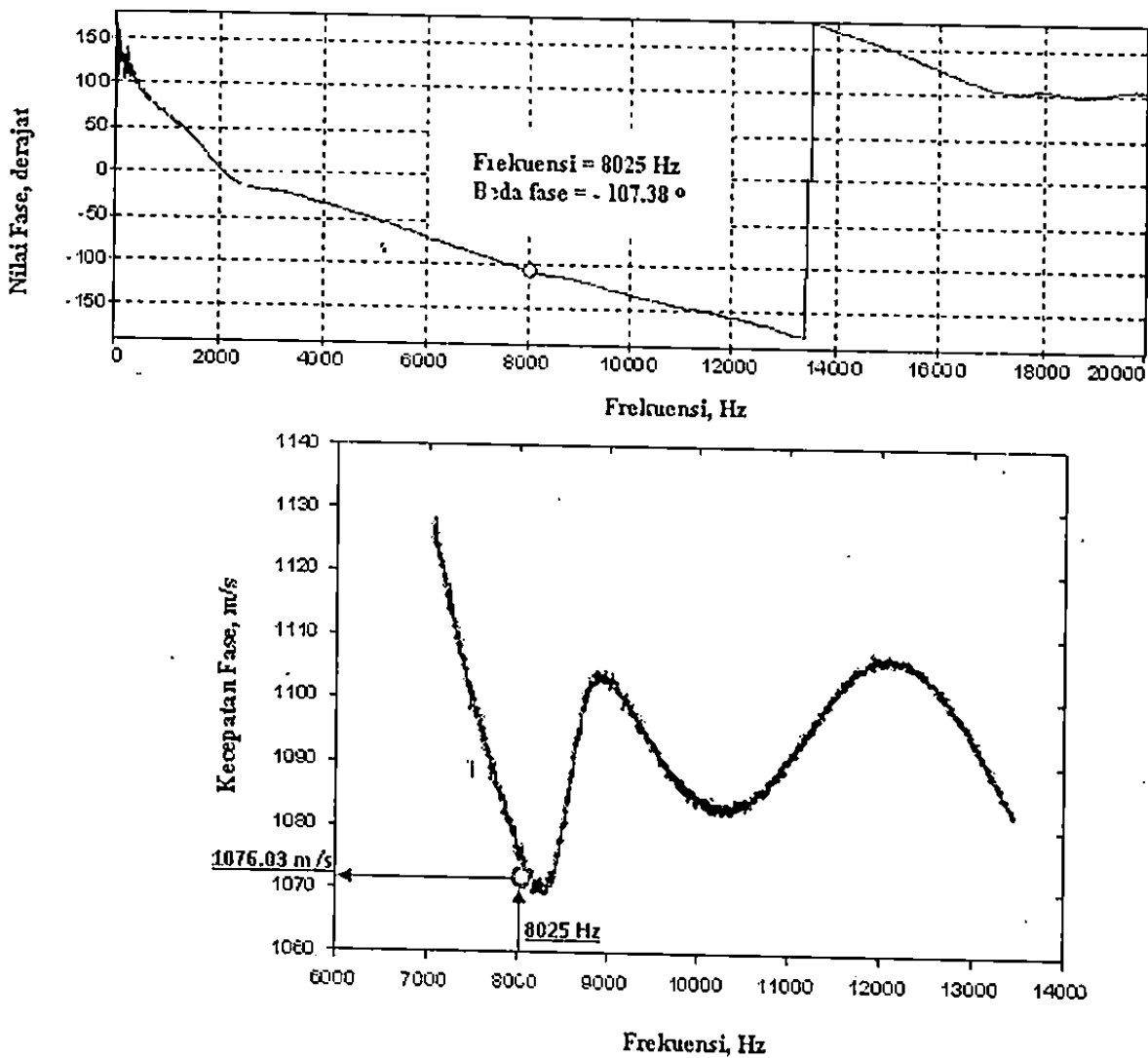


Gambar 5.17 Spektrum koheren hasil analisis untuk jarak sensor 4 dan 64 cm

Untuk menilai kelayakan wilayah frekuensi dari kedua spektrum fase dapat dilihat dari spektrum fungsi koheren. Spektrum ini memperlihatkan keterkaitan sinyal yang diterima oleh sensor pertama dan kedua. Nilai koheren dinyatakan dalam nilai rasio output +1 untuk keterkaitan terbaik dan nilai 0 apabila sinyal di kedua sensor yang diterima tidak berasal dari satu kelompok perambatan gelombang. Gambar 5.17 memperlihatkan hasil spektrum fungsi koheren dari kedua spektrum fase untuk jarak sensor 4 cm dan 64 cm. Pada spektrum koheren jarak sensor 4 cm, nilai wilayah frekuensi yang baik untuk sinyal yang merambat di kedua sensor adalah 656 Hz – 18,9k Hz dengan nilai koheren minimum 0,983 dan untuk spektrum koheren pengukuran 64 cm diperoleh wilayah frekuensi 85 – 853 Hz dengan nilai 0,984. Kelayakan batas nilai koheren ini minimum sebagai 0,98.

5.3. Analisis Kecepatan Fase Gelombang pada Perkerasan

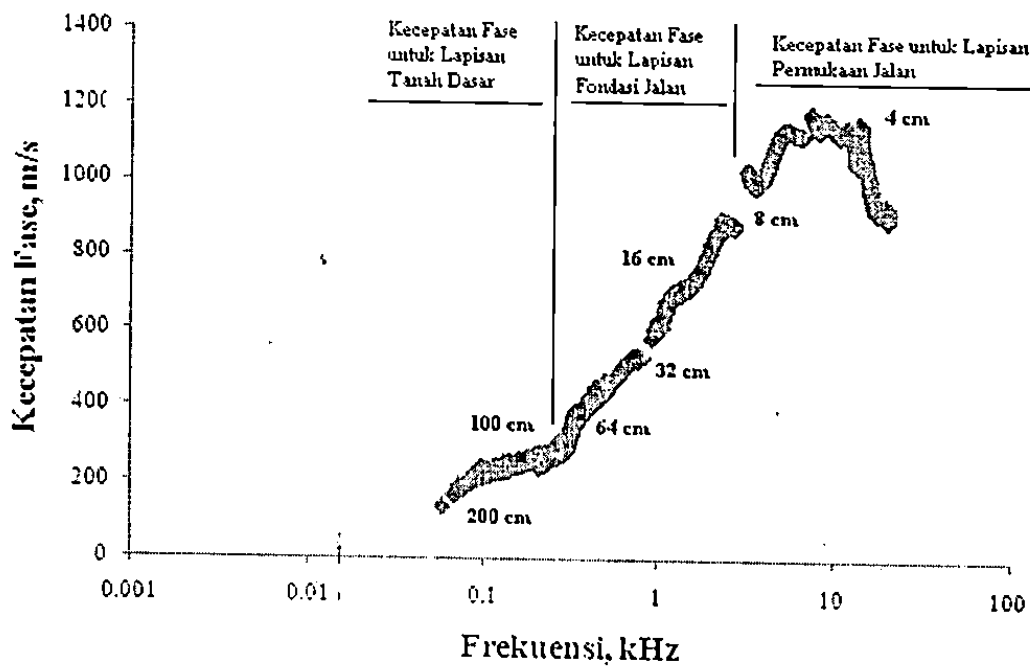
Melalui data beda fase pada setiap frekuensi gelombang dalam spektrum fase dan konfigurasi pengukuran dalam parameter jarak antar sensor diperoleh nilai kecepatan gelombang fase dengan menggunakan Persamaan (2.28) hingga (2.30). Contoh analisis kecepatan gelombang fase diberikan dalam Gambar 5.18 untuk spektrum fase hasil pengukuran 4 cm (Gambar 5.14).



Gambar 5.18 Analisis kecepatan fase untuk jarak sensor 4 cm

Dari Gambar 5.18, ditunjukkan bahwa, salah satu titik data fase diperoleh untuk frekuensi 8025 Hz yaitu 107.38°. Menggunakan Persamaan (2.28) hingga (2.30), diperoleh nilai

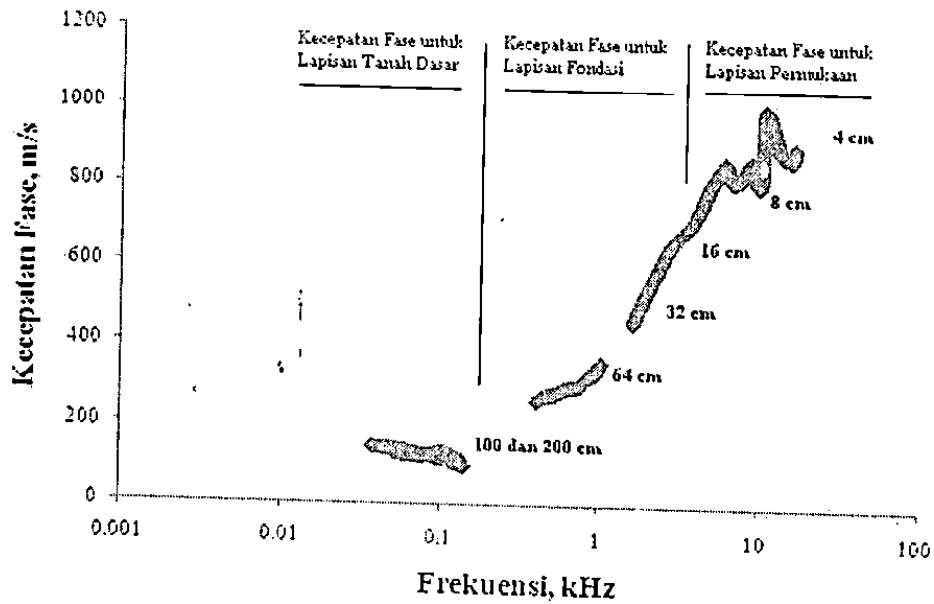
sebesar 1076.03 m/s. Dengan cara yang sama, dilakukan perhitungan untuk titik-titik frekuensi lainnya dan demikian juga untuk jarak sensor 16, 32, 64, 100 dan 200 cm. Kumpulan data kecepatan fase gelombang melawan frekuensi sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.18 menunjukkan corak sebaran kecepatan fase gelombang yang selanjutnya dikenali sebagai kurva sebaran eksperimen individu (*individual experimental dispersion curve*), sedangkan gabung dari kurva-kurva individu disebut sebagai kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit (*composite experimental dispersion curve*).



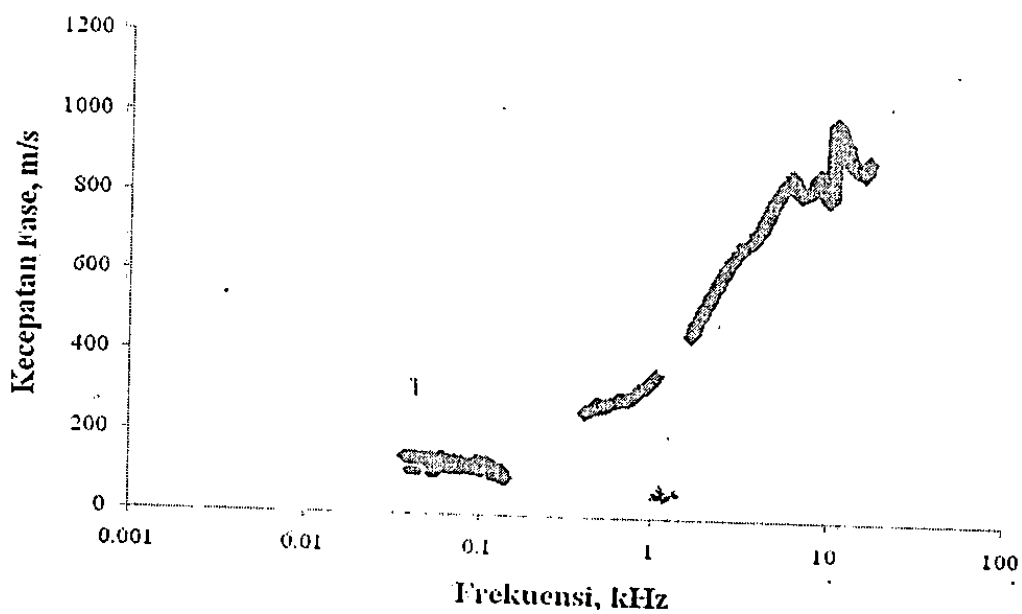
Gambar 5.19 Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk Jalan Wonosari

Seluruh konfigurasi dalam satu titik pengukuran tersebut digunakan untuk merangkai data penyebaran kecepatan fase (kelompok gelombang R) pada perkerasan jalan yang dimasudkan dapat mendeteksi lapisan perkerasan dari lapisan permukaan hingga ke tanah dasar (Gambar 5.19 untuk Jalan Nasional Wonosari/Piyungan-Ganding dan Gambar 5.20 untuk Jalan Provinsi Prambanan-Pakem). Data untuk lapisan permukaan diperoleh dari pengukuran pada jarak 4 hingga 8 cm; sedangkan untuk lapisan fondasi dari data pengukuran 8 hingga 32 cm, dan lapisan tanah dasar menggunakan data dari pengukuran 64 hingga 200 cm. Dari Gambar 5.19 terlihat bahwa lapisan permukaan aspal memiliki nilai kecepatan fase yang tinggi (1000 – 1200 m/s), hal ini mengindikasikan bahwa

dengan penurunan kekakuan lapisan maka nilai kecepatan fasenya akan semakin mengecil sebagaimana model profil perkerasan yang tersusun dari lapisan aspal sebagai lapisan kaku selanjutnya diikuti lapisan fondasi dan tanah dasar yang memiliki nilai kekakuan yang lebih rendah. Lapisan fondasi perkerasan jalan dalam batas 300 – 800 m/s dan lapisan tanah dasar pada 180 – 280 m/s.



Gambar 5.20 Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk Jalan Prambanan



Gambar 5.21 D

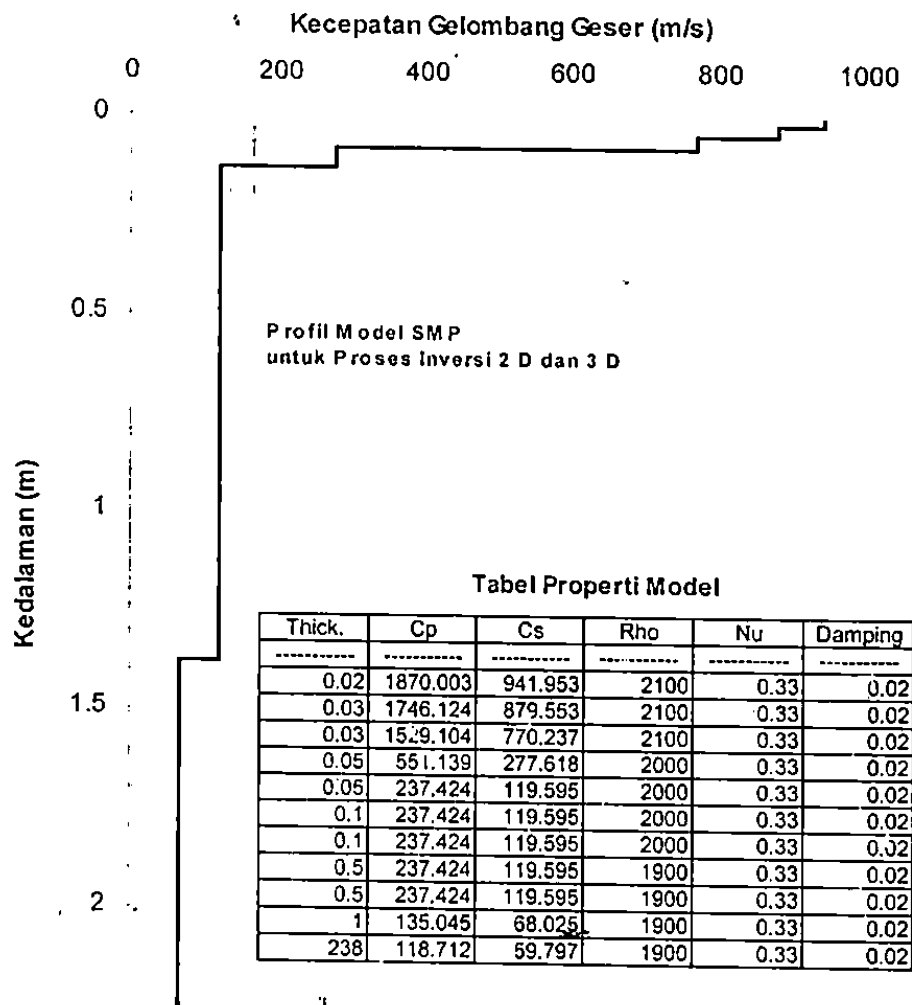
Gambar 5.21 menunjukkan hasil analisis perata-rataan global untuk memilih segmen data kurva menjadi 40 hingga 50 data. Data rata-rata global dari kurva penyebaran fase ini selanjutnya dapat dianalisis untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser dan kedalaman menggunakan metode matrik kekakuan 3 D

5.4. Hasil Inversi Profil Perkerasan Jalan Menggunakan Matrik Kekakuan 3 D

Analisis hasil inversi terhadap kurva sebaran eksperimen dilakukan pada semua titik pengamatan di Jalan Nasional Wonosari/Piyungan-Gading dan Jalan Provinsi Prambanan-Pakem. Untuk contoh analisis inversi yang menghasilkan profil perkerasan jalan ini digunakan salah satu titik pengamatan pada Jalan Propinsi Prambanan – Pakem di stationing KM 19 + 000. Dalam observasi dilakukan set pengukuran untuk mengambil data perambatan gelombang seismik pada profil perkerasan lentur jalan dari lapisan permukaan aspal, lapisan fondasi (atas dan bawah) dan lapisan subgrade (lapisan tanah dasar).

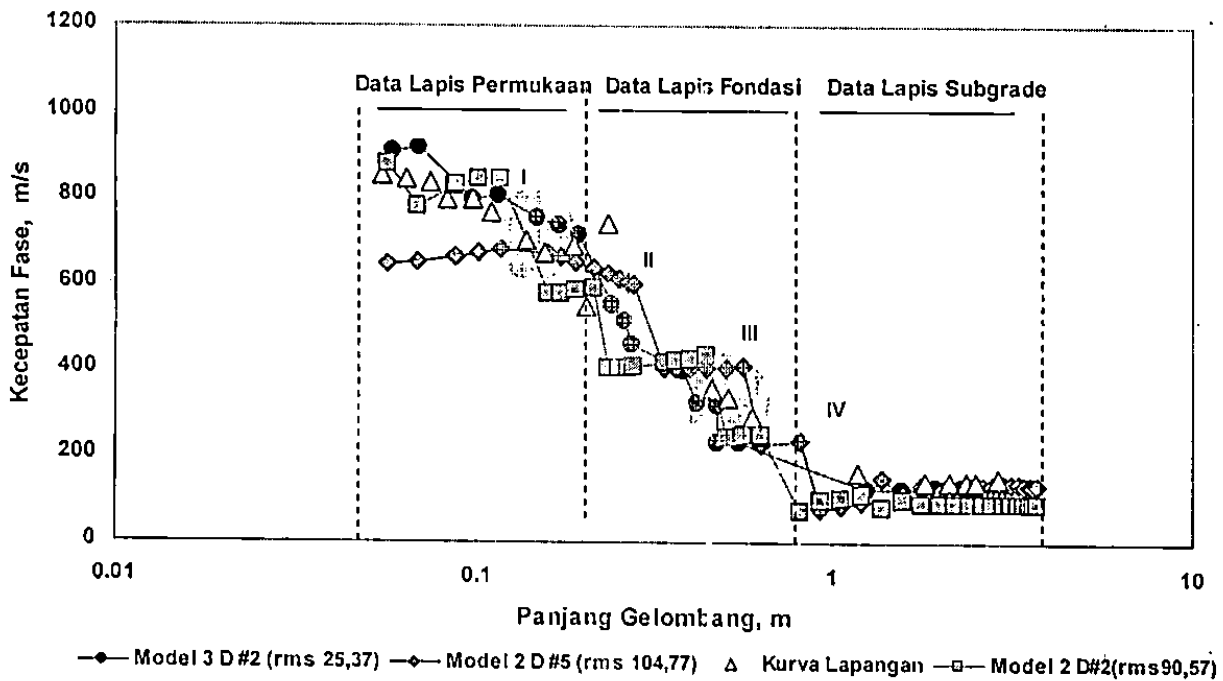
Algoritma 3 D matrik kekakuan dinamik dibangun berdasarkan sistem profil model perkerasan jalan dengan banyak lapisan (*multi-layers*) yang terbagi dalam 3 lapisan utama yaitu lapisan permukaan yang disusun atas 3 lapisan, lapisan fondasi atas dan bawah yang masing-masing tersusun dalam 3 lapisan, serta lapisan tanah dasar yang tersusun atas 2 lapisan. Profil SMP yang digunakan dalam analisis ini dijelaskan secara rinci beserta properti dinamik kecepatan gelombang geser dalam Gambar 5.22. Hasil simulasi model diberikan dalam Gambar 5.23. Dari Gambar 5.23 ditunjukkan bahwa proses inversi menggunakan model perambatan gelombang 3 D matrik kekakuan dinamik terhadap kurva eksperimen menghasilkan kurva teori dengan nilai ralat RMS sebesar 25,37 m/s dengan proses iterasi sebanyak 2 kali. Secara umum, kurva model 3 D mampu membentuk trend kurva yang sesuai dengan kurva eksperimen. Walaupun masih terdapat beberapa segmen data model 3 D yang terlihat tidak sesuai terutama pada 0,5 – 1 m. Hal ini dapat diselesaikan dengan proses penyesuaian kurva yang lebih detail yaitu merubah parameter model matrik kekakuan dinamik.

terhadap keberhasilan model 3 D untuk proses inverse ini digunakan teori 2 D matrik kekakuan dinamik (Kausel & Rössset 1981). Kurva teori 2 D yang dihasilkan (Gambar 5.23) menunjukkan adanya deviasi besar terhadap kurva eksperimen terutama pada sampling untuk lapisan permukaan jalan. Garis kurva kecepatan fase teori 2 D terlihat pada wilayah 630 – 680 m/s sedangkan garis kurva kecepatan fase eksperimen pada 670 – 850 m/s. Kurva 2 D yang dihasilkan juga terlihat terputus-putus pada segmen data lapisan fondasi jalan dan terdapat pengelompokan beberapa segmen kurva data yang seragam misalnya pada panjang gelombang 0,3 hingga 0,6 m. Ini dikarenakan algoritma model 2 D tidak mampu secara sempurna mendistribusikan data perambatan gelombang fase pada perpindahan wilayah antar lapisan keras (lapisan permukaan aspal) dan lapisan fondasi.



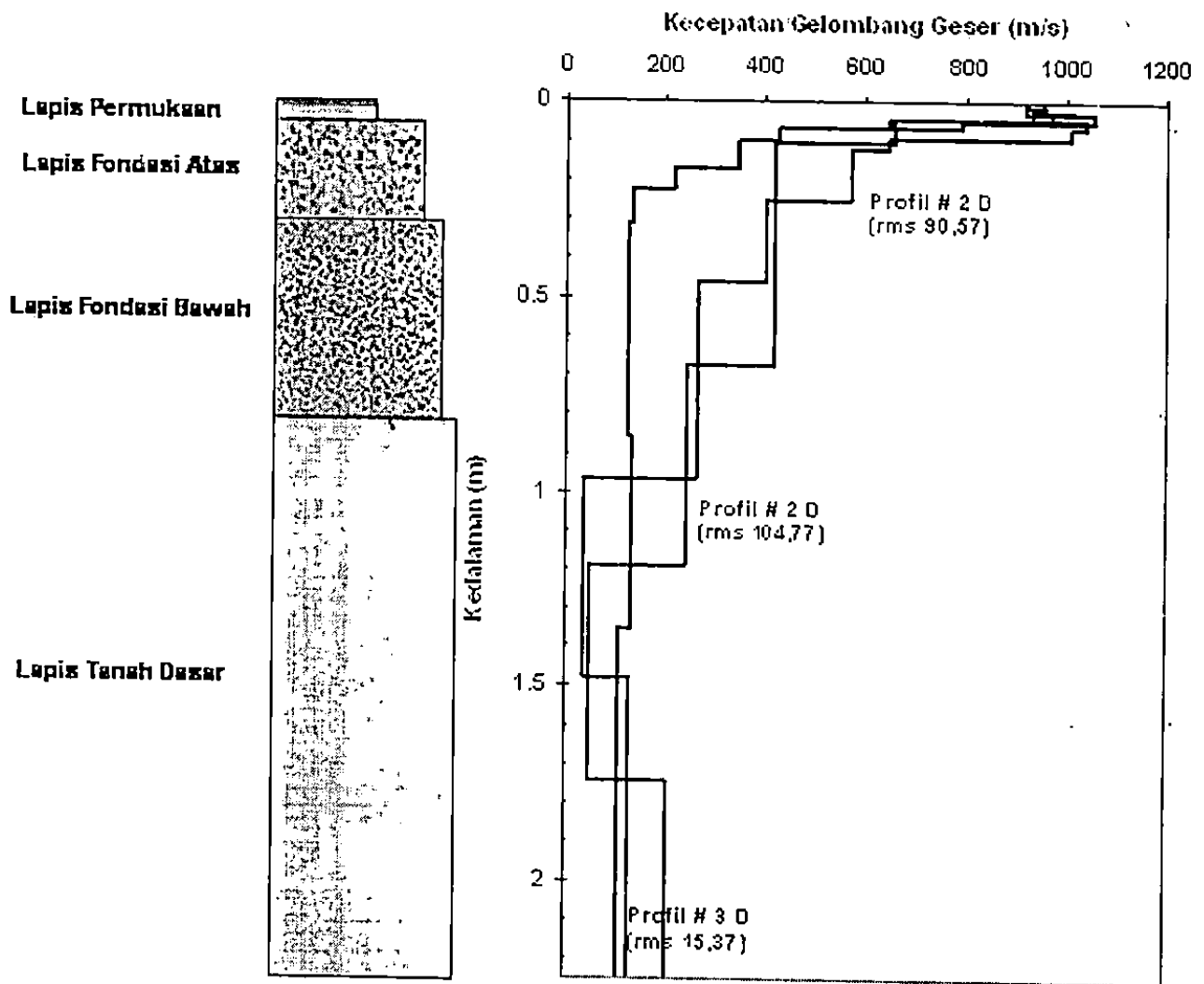
Secara umum, deviasi kurva 2 D terhadap kurva eksperimen terlihat sangat lebar dengan tingkat kesalahan rms yang dihasilkan oleh 5 kali proses iterasi menunjukkan angka ralat RMS 104,77 m/s. Demikian juga dengan kurva kedua hasil pemodelan 2 D dengan nilai ralat RMS sebesar 90,57 m/s. Walaupun secara umum model 2 D telah mendekati kurva eksperimen, namun Meskipun demikian, kurva dispersi teori kedua model 2 D dan 3 D memperlihatkan kesesuaian yang baik pada data lapisan subgrade perkerasan jalan dengan nilai panjang gelombang lebih dari 2 m.

Kondisi ini memperlihatkan bahwa model 3 D dapat lebih nyata untuk menggambarkan kurva perambatan gelombang Rayleigh pada profil perkerasan jalan dengan multi-lapisan. Perbandingan profil hasil analisis inversi yang menghasilkan profil kecepatan gelombang geser menggunakan model 2 D dan 3 D matrik kekakuan dinamik bahan diberikan pada Gambar 5.24. Keperluan penggunaan metode inversi untuk menentukan kecepatan gelombang geser, karena dalam profil perkerasan jalan, lapisan tidak tersusun secara beratur (regular). Dengan demikian, terdapat kesulitan dalam membedakan kecepatan fase dan kecepatan gelombang kelompok yang dihasilkan dalam kurva sebaran eksperimen. Penggunaan metode inversi sederhana menjadi kurang sesuai terutama untuk menentukan batas antara lapisan perkerasan. Kondisi ini telah dibahas dalam Rosyidi (2004, 2005) dan Rosyidi et al (2005b; 2005c). Kedua profil model 2 D dengan ralat RMS terhadap nilai kecepatan fase adalah masing-masing 90,57 dan 104,77 m/s, menunjukkan ketidaktepatan pada lapisan-lapisan profil yang mewakili lapisan fondasi perkerasan jalan yang diwakili oleh lapisan ke-5 hingga ke-8, dan lapisan ke-9 dan ke-10 yang representasi dari lapisan tanah dasar tampak adanya lapisan pelemahan yang cukup tebal. Ketidaktepatan lapisan di atas dapat dikontrol dengan kewajaran nilai lapisan fondasi yang terlalu tinggi dan perubahan lapisan yang tampak regular, sedangkan kondisi profil sebenarnya perkerasan jalan tersusun dari perubahan kekakuan lapisan yang ekstrem dari lapisan permukaan aspal dan lapisan fondasi. Ketidaktepatan lainnya dilihat dari lapisan pelemahan yang terletak pada lapisan tanah dasar (lapisan ke-9), dengan nilai kecepatan geser 40 m/s menunjukkan hasil yang kurang sesuai (wajar) untuk

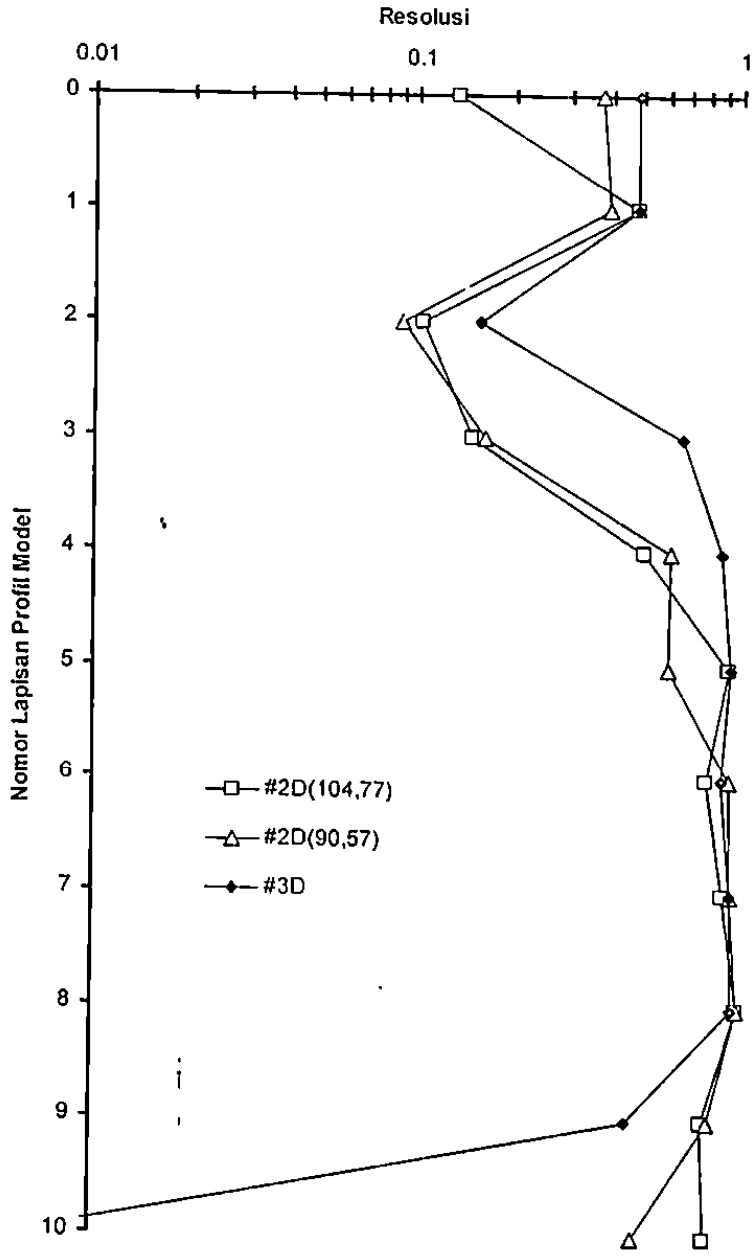


Gambar 5.23 Kurva Dispersi Hasil Simulasi Model 2 D dan 3 D terhadap Kurva Dispersi Eksperimen Jalan Prambanan – Pakem

Profil akhir hasil simulasi inverse 3 D matrik kekakuan bahan dihasilkan dengan nilai RMS kurang dari 20 % (sesuai target penelitian) sebagaimana terlihat dalam Gambar 5.24. Proses inverse dilakukan beriterasi dengan merubah variabel dasar pemodelan pada profil SMP. Untuk menunjukkan kebaikan hasil simulasi ini, analisis resolusi lapisan dilakukan terhadap profil model 2 D dan 3 D. Gambar 5.25 menunjukkan bahwa resolusi untuk model 3 D terlihat lebih baik dibandingkan kedua profil model 2 D, kecuali pada lapisan ke-10 dari profil model 3 D yang mana lapisan terakhir (lapisan tak terhingga) memiliki nilai resolusi sangat kecil (di bawah 0,01) dan lapisan ini dapat dibilangkan atau diabaikan.



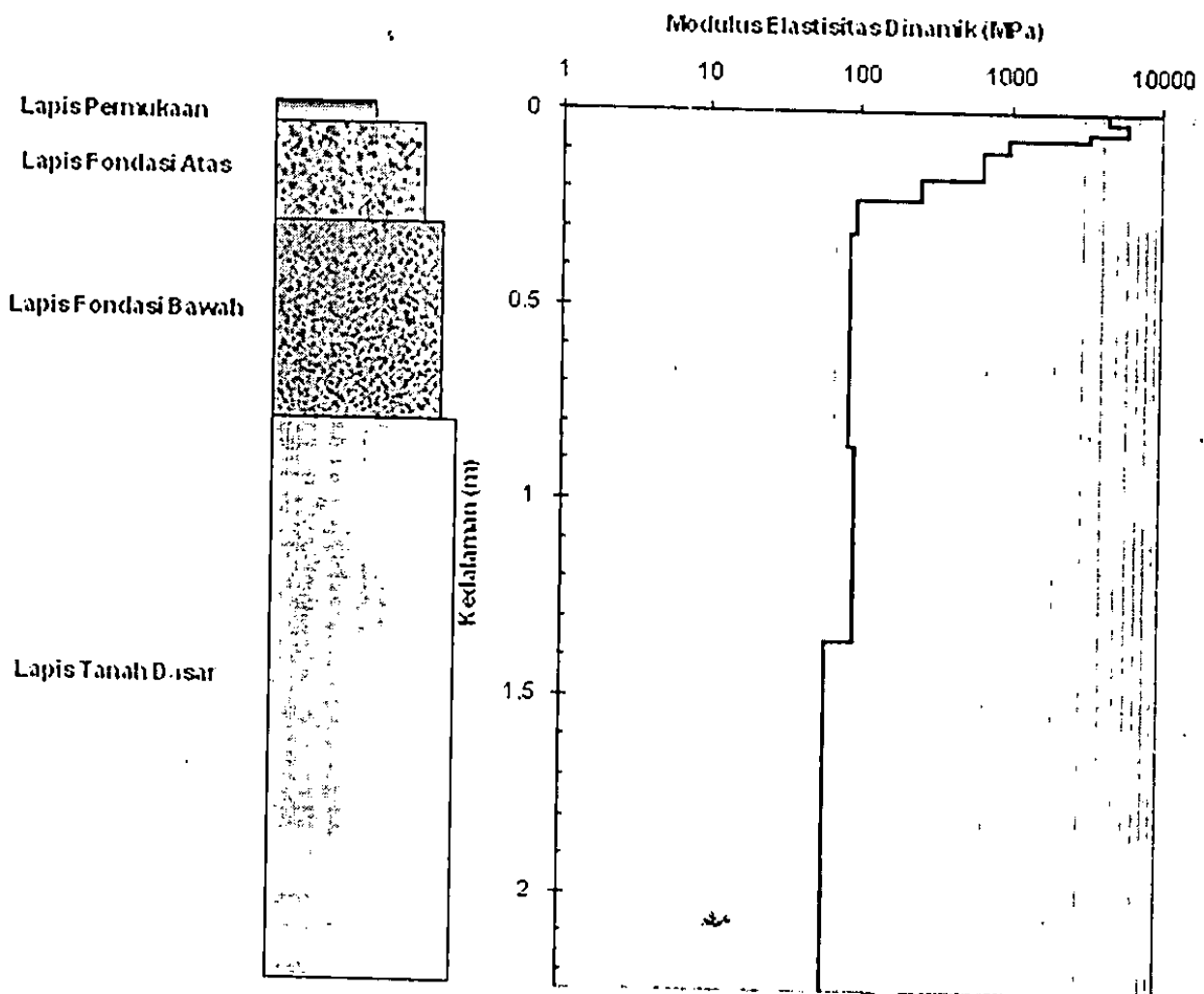
Gambar 5.24. Definisi Profil Kecepatan Gelombang Geser



Gambar 5.25. Hubungan antara resolusi dan jumlah lapisan profil model.

5.5. Analisis Modulus Elastisitas Lapisan Tanah Dasar

Data kecepatan gelombang geser yang diperoleh dari analisis fase gelombang digunakan untuk menentukan nilai modulus elastisitas dinamik bahan perkerasan jalan menggunakan Persamaan 2.33. Profil modulus elastisitas bahan perkerasan jalan yang dianalisis dari profil kecepatan gelombang geser hasil inversi dengan model 3 D matrik kekakuan dinamik (RMS 15,37 m/s) dari Gambar 5.24 diberikan dalam Gambar 5.26. Dari Gambar 5.26 ditunjukkan bahwa teknik SASW mampu menghasilkan hasil pengukuran nilai kekakuan bahan (modulus elastisitas dinamik) untuk setiap lapisan perkerasan.



Tabel 5.1 menunjukkan analisis distribusi nilai modulus elastisitas jalan yang dinyatakan dalam nilai rata-rata, maksimum, minimum, simpangan baku dan koefisien variannya. Hasil analisis menjelaskan bahwa lapisan tanah dasar pada studi ini dideteksi dalam dua lapisan yaitu lapisan tanah dasar yang telah dipadatkan (*compacted treatment*) dan lapisan tanah asli. Untuk lapisan tanah dasar di bawah fondasi jalan diperoleh pada rentang 101,26 – 295,26 MPa (rerata = 180,42 MPa dengan CV = 33 %), sedangkan lapisan tanah asli diperoleh pada rentang 30,76 – 99,76 MPa (rerata = 76,12 MPa dengan CV = 25 %). Tabel 5.1 juga menunjukkan modulus elastisitas Jalan Wonosari.

Tabel 5.1 Nilai modulus elastisitas lapisan tanah dasar perkerasan jalan

Parameter Modulus Elastisitas	Jalan Provinsi Prambanan - Pakem		Jalan Nasional Wonosari/Piyungan-Gading	
	Lapisan Tanah Dasar	Lapisan Tanah Asli	Lapisan Tanah Dasar	Lapisan Tanah Asli
Rerata (MPa)	180,42	76,12	208,46	---
Max (MPa)	295,26	99,76	355,87	---
Min (MPa)	101,26	30,76	111,76	---
SD (MPa)	59,58	18,76	64,55	---
CV (--)	0,33	0,25	0,31	---

5.6. Analisis Daya Dukung Lapisan Tanah Dasar

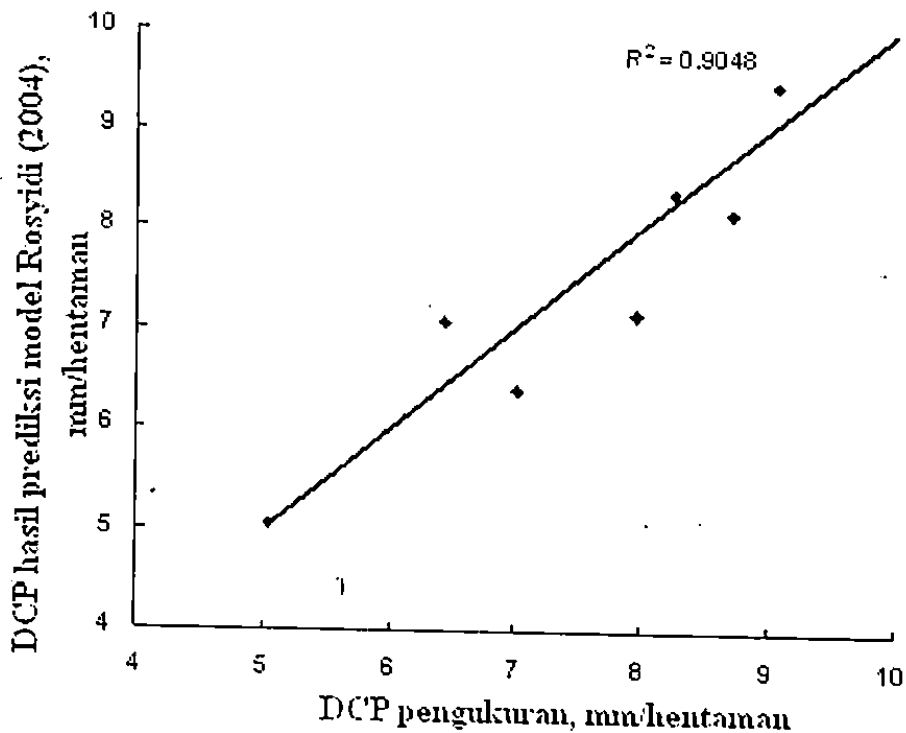
Daya dukung tanah dasar struktur perkerasan jalan ditentukan dari nilai modulus geser tanah (dalam modulus dinamik bahan yang mendekati nilai maksimum) atau menggunakan parameter kecepatan gelombang geser. Model empiris daya dukung tanah melalui penggunaan parameter seismik untuk tanah oleh Rosyidi (2004) adalah digunakan dalam analisis ini. Model ini telah dikaji ulang kesesuaiannya oleh Rosyidi et al (2005).

disini, CBR = nilai California Bearing Ratio lapangan dalam %; dan V_s = kecepatan gelombang geser dalam m/s; atau bisa juga menggunakan parameter modulus dinamik geser tanah (G dalam MPa) sebagai berikut:

$$CBR = 0,266(G)^{1,0027} \tag{5.2}$$

$$DCP = 709,18(E_{SASW})^{-0,79} \tag{5.3}$$

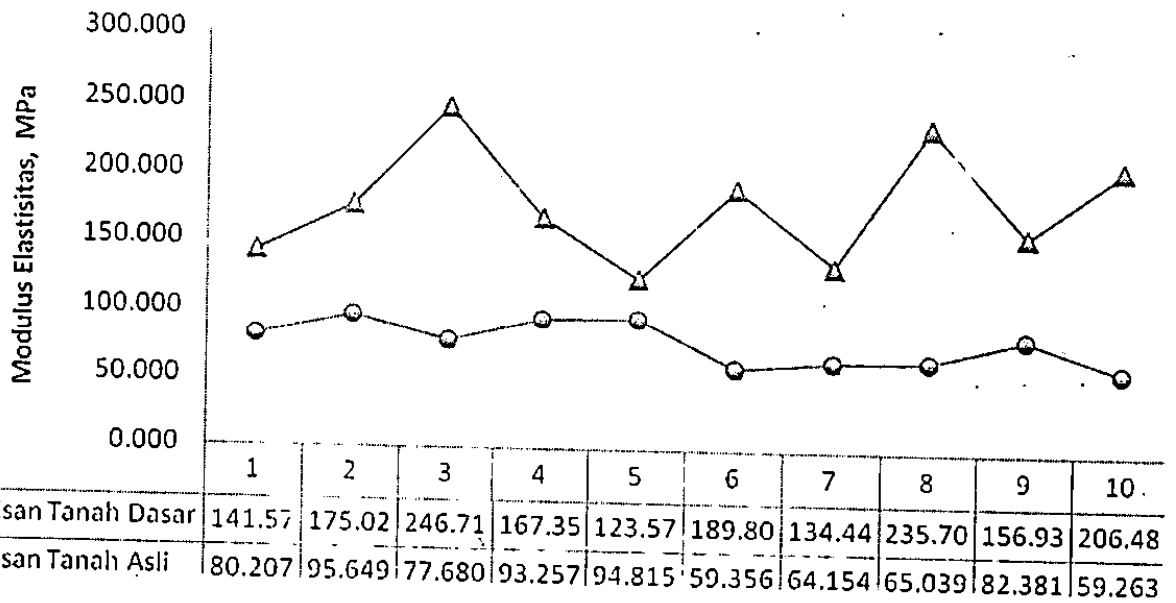
Untuk menguji keabsahan model tersebut, pengujian validasi langsung nilai DCP untuk menentukan nilai CBR lapangan dan model empirik daya dukung tanah Rosyidi (2004) dilakukan di Jalan Provinsi Prambanan-Pakem. Hasil pengujian menunjukkan terdapat korelasi ($R^2 = 0,9048$) yang memuaskan antara model Rosyidi (2004) dengan pengujian langsung di lapangan di Jalan Prambanan-Pakem sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.27.



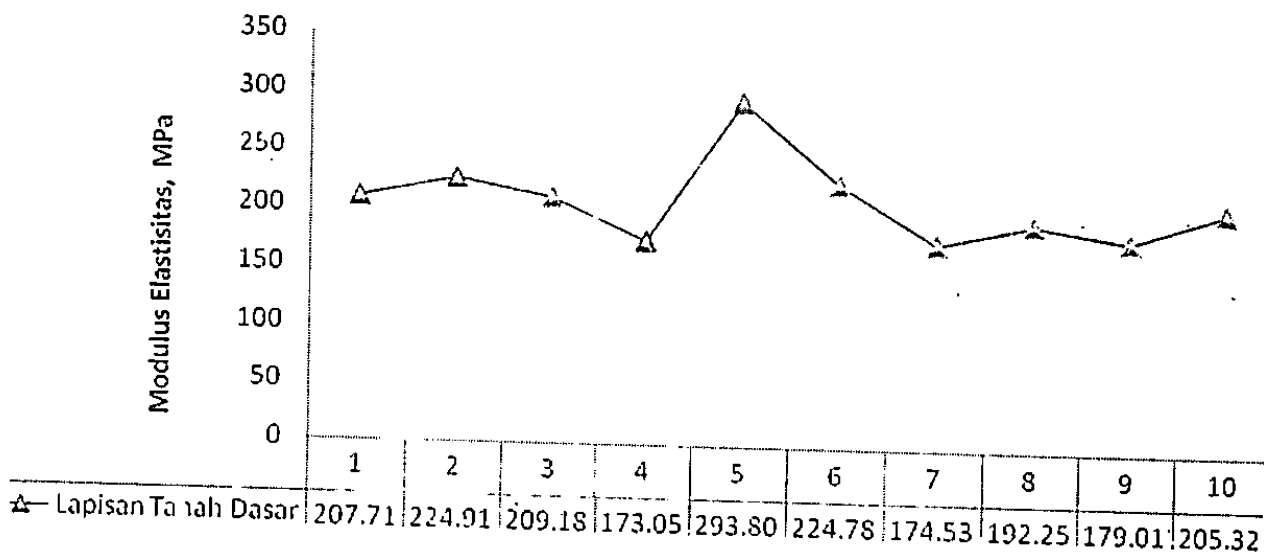
Gambar 5.27. Korelasi antara DCP pengukuran dengan DCP prediksi model Rosyidi (2004).

5.7. Diskusi Modulus Elastisitas dan Daya Dukung Tanah Dasar

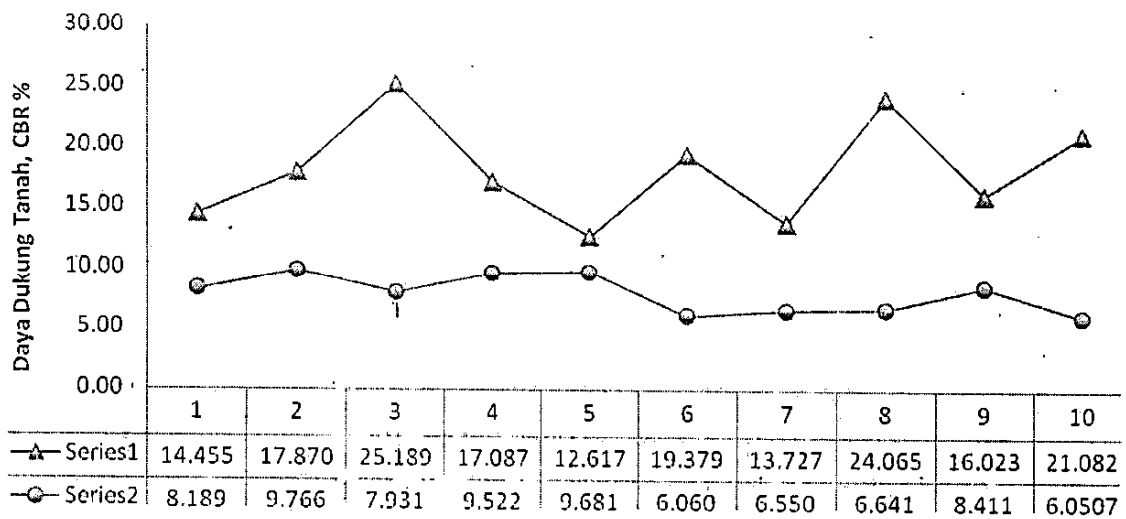
Nilai rata-rata dari hasil pengukuran nilai modulus elastisitas pada lapisan permukaan tanah dasar dan tanah asli hasil pengujian SASW diberikan dalam Gambar 5.28 dan Gambar 5.29, yang dilakukan pada 10 titik stationing di Jalan Provinsi Prambanan-Pakem dan Jalan Nasional Piyungan – Gading. Dari hasil rerata di seluruh titik pengamatan, rata-rata nilai modulus elastisitas yang dihasilkan relatif hampir sama. Untuk Jalan Prambanan – Pakem, pada titik pengamatan 3 dan 8 terlihat lapisan tanah dasar perkerasan jalan memiliki modulu elastisitas yang lebih tinggi. Ini kemungkinan disebabkan oleh adanya perbedaan energi pemadatan dan keragaman material pada tanah dasar ketika pelaksanaan pemadatan tanah dasar. Untuk lapisan tanah asli di lokasi Jalan Prambanan Pakem, terdeteksi baik dan hampir sama. Modulus elastisitas di Jalan Piyungan – Gading memiliki nilai yang lebih tinggi. Hasil modulus ini menunjukkan bahwa kondisi tanah dasar di Jalan Piyungan – Gading sangat baik yang terindikasi kemungkinan merupakan tanah dasar dengan campuran batuan keprus. Nilai modulus yang dihasilkan lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas untuk lapisan tanah dasar dari tanah berpasir yaitu dalam rentang 172,38 – 227,54 MPa (Nazarian & Stokoe, 1986) dan 185 MPa (Rosyidi, 2004). Menggunakan model empirik Rosyidi (2004), daya dukung tanah dasar dalam satuan pengukuran nilai CBR lapangan (%) dapat dihitung. Gambar 5.30 dan 5.31 menunjukkan nilai rerata daya dukung tanah dasar pada setiap titik pengamatan di Jalan Prambanan – Pakem dan Jalan Nasional Piyungan – Gading.



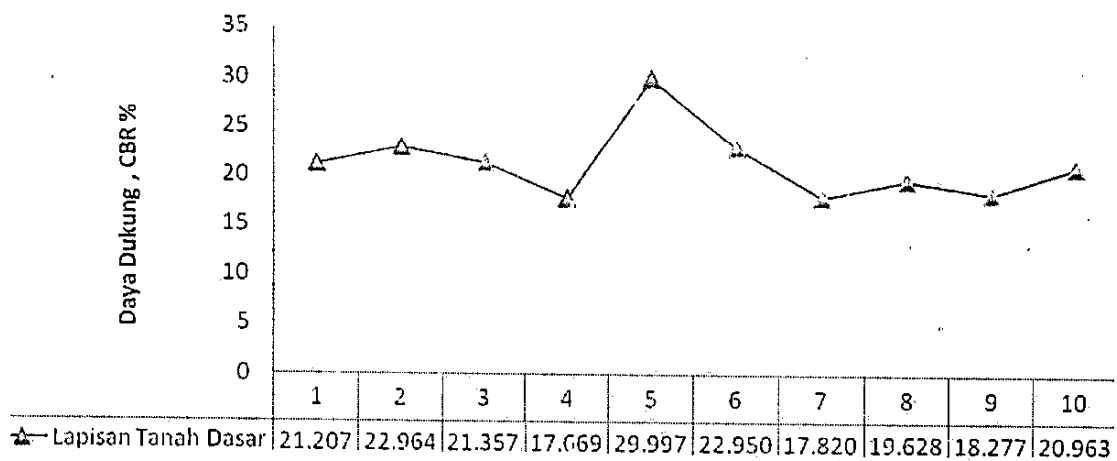
Gambar 5.28 Nilai rerata modulus elastisitas dinamik lapisan tanah dasar perkerasan Jalan Provinsi Prambanan-Pakem



Gambar 5.29 Nilai rerata modulus elastisitas dinamik lapisan tanah dasar perkerasan Jalan Provinsi Prambanan-Pakem



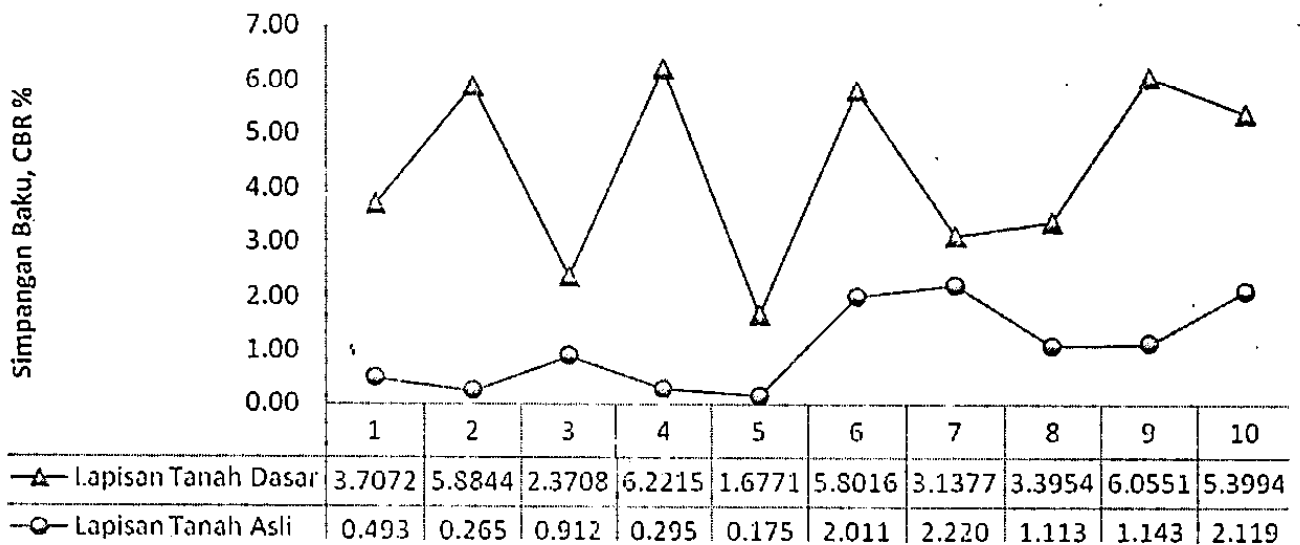
Gambar 5.30 Daya dukung lapisan tanah dasar perkerasan Jalan Prambanan-Pakem



Gambar 5.31 Daya dukung lapisan tanah dasar perkerasan Jalan Piyungan – Gading

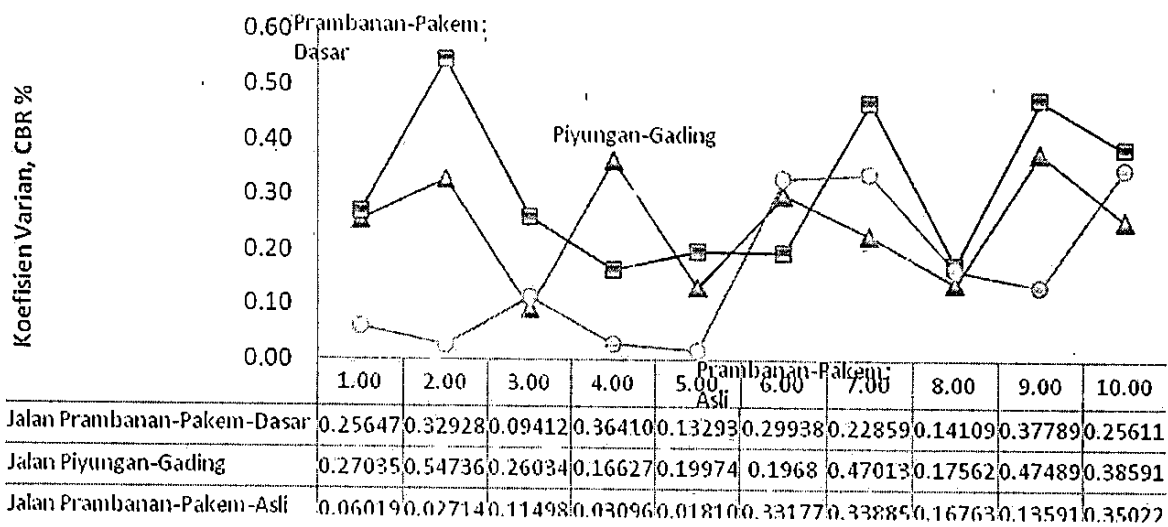
Meskipun demikian penggunaan nilai rerata untuk mewakili sifat umum dari lapisan bahan perkerasan tersebut harus dinilai kembali dengan tingkat kewajaran simpangan baku dan koefisien variannya. Gambar 5.32, Gambar 5.33 dan Gambar 5.34 menjelaskan simpangan baku data (*standard deviations, SD*) dan nilai koefisien varian (*coefficient of variances, CV*) dari data modulus daya dukung tanah hasil pengukuran SASW. Secara umum, nilai SD dan CV untuk Jalan Prambanan-Pakem menjelaskan bahwa trend sebaran data untuk seluruh nilai modulus elastisitas pada lapisan tanah dasar adalah

heterogen dan fluktuatif. Untuk lapisan tanah dasar tersusun atas lapisan tanah dasar dengan penanganan (dipadatkan) dan lapisan tanah dasar asli. Kondisi ini mengindikasikan pengerjaan lapisan tanah dasar yang tidak sama. Meskipun demikian selisih nilai simpangan baku masih bisa diterima yaitu 4,3 % terhadap nilai rata-rata daya dukung tanah 18,15 %. Daya dukung lapisan tanah dasar Jalan Prambanan Pakem masih baik dan layak.

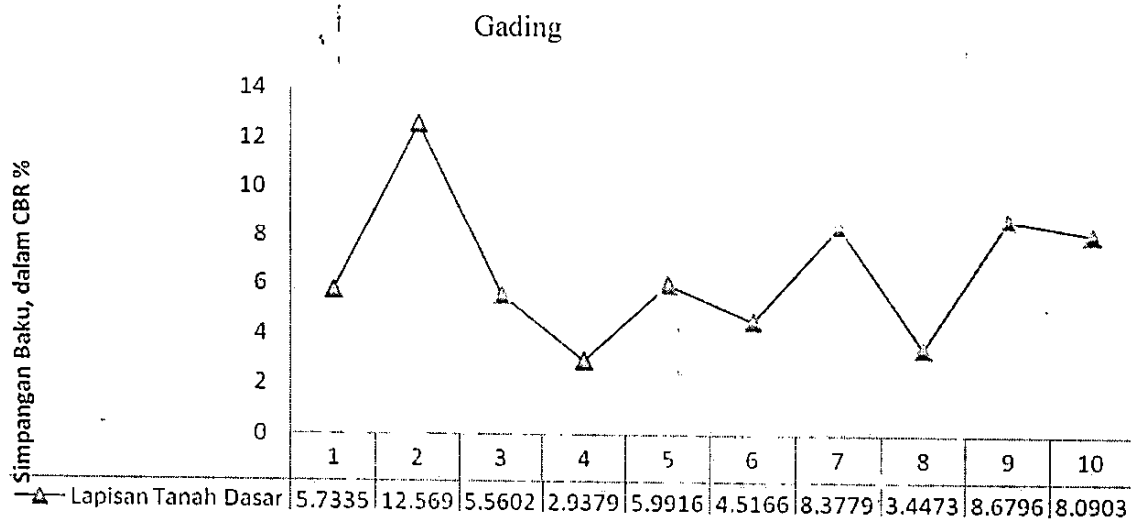


Gambar 5.32 Nilai simpangan baku daya dukung tanah pada Jalan Prambanan Pakem

Berbeda dengan tanah dasar, untuk lapisan tanah asli terlihat homogen. Fluktuasi daya dukung tanah rendah yaitu 1,1 % terhadap nilai rata-rata daya dukung tanah 7,88 %. Kondisi geologi dan jenis tanah berpasir dengan fraksi lempung rendah diprediksi menjadi satu faktor yang menyebabkan nilai daya dukung tanah asli tersebut tinggi. Untuk lapisan tanah dasar Piyungan-Gading, terlihat bahwa simpangan baku memiliki nilai yang rendah yaitu 6,59 % terhadap nilai rerata daya dukung tanah 21,28 %. Trend simpangan baku relatif baik yaitu hampir seragam pada setiap titik pengamatan dan hal ini menunjukkan relatif homogen di setiap lapisan tanah dasar di titik pengamatan. Pada titik pengamatan 2, nampak terlihat fluktuasi trend yang signifikan dibandingkan dengan titik lainnya, hal ini dimungkinkan karena pada titik tersebut berdekatan dengan jembatan di Piyungan sehingga konstruksi lapisan tanah dasar disusun lebih kaku dibandingkan titik lainnya. Nilai daya dukung yang tinggi disebabkan tanah asli di wilayah Piyungan dan Gading merupakan percampuran dengan jenis ketan (Gading) dan (Piyungan).



Gambar 5.33 Nilai koefisien varians pada Jalan Prambanan-Pakem dan Jalan Piyungan-



Gambar 5.34 Nilai simpangan baku pada Jalan Prambanan-Pakem dan Jalan Piyungan-Gading

Dengan demikian, melalui pengujian SASW juga terbukti bahwa metode ini mampu menganalisis kekuatan bahan tanah¹ dasar pada perkerasan jalan. Metode ini juga mampu secara cepat memprediksi kekakuan bahan dalam unit modulus elastisitas yang diperlukan dalam perencanaan ulang. Untuk data perancangan dengan metode AASHTO, perlu ditinjau dalam pengambilan nilai modulus elastisitas tanah dasar dengan baik. Penggunaan data daya dukung tanah dari pengujian CBR saja kurang sesuai,

sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 1.1.1. Karena hanya pengamatan parsial, sehingga kombinasi unit modulus elastisitas dan nilai daya dukung diharapkan dapat mewakili sifat kekakuan bahan perkerasan jalan