

## ***S-SPEED STRUCTURE : SEISMOGRAM ANALYSIS AND FITTING OF EARTHQUAKE C122297A ON RAR OBSERVATION STATION***

Oleh :

**Bagns Jaya Santosa**  
Jurusan Fisika, FMIPA, ITS,

### **ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan menemukan struktur kecepatan S antara Pulau New Britain, PNG dan stasiun observasi RAR di Kepulauan Cook, Pacific Barat Daya.

Analisis dilakukan dengan seismogram observasi akibat gempa C122297A, dalam domain waktu dan ketiga komponen Cartesian seara simultan. Seismogram sintetik dihitung dengan program GEMINI. Kedua ragam seismogram dikenakan filter low-pass order tujuh dengan frekuensi corner pada 20 mHz.

Hasil analisis menunjukkan bahwa penyimpangan yang kuat dan tidak sistematis terjadi pada waktu tiba gelombang S, SS, ScS, ScS-ScS dan gelombang permukaan Love dan Rayleigh. Dengan metode ini terlihat bagaimana pekanya *waveform* terhadap struktur perlapisan bumi, dibandingkan dengan metode lain dalam analisis seismogram. Untuk menyelesaikan diskrepansi yang dijumpai diperlukan koreksi atas struktur bumi, meliputi ketebalan kulit bumi, gradient kecepatan  $\square_h$ , dan besar koefisien-koefisien untuk  $\square_h$  dan  $\square_v$  di *upper mantle*, dan sedikit perubahan pada struktur kecepatan S di lapisan-lapisan bumi di bawah *upper mantle* hingga CMB. *Fitting* seismogram diperoleh dengan baik pada *waveform* fase-fase gelombang, baik waktu tempuhnya maupun *waveformnya*. Struktur kecepatan pada model bumi PREMAN dan Ocean memiliki transversal isotrop dari kedalaman 25 hingga 220 km, setelah penelitian ini ternyata model transversal isotrop tersebut dapat dijumpai pada lapisan-lapisan yang lebih dalam, hingga CMB. Ini diperlukan untuk memperoleh *fitting* pada tiga jenis gelombang sekunder, yaitu S, SS dan ScS-ScS, dimana ketiganya merambat hingga kedalaman yang berbeda-beda. Sifat anisotropi di lapisan dangkal dapat dideskripsikan dengan lebih baik melalui *fitting* pada gelombang permukaan Love dan Rayleigh.

Kata-kata kunci : Seismogram, model kecepatan S dari *upper mantle* - CMB, dan lautan

### **ABSTRACT**

*This study investigates the S speed structure beneath South West Pacific, by means of waveform analysis due to the C122297A earthquake and the RAR observation station. The waveform analysis is conducted in time domain and three Cartesian components simultaneously. The synthetic seismogram is calculated by GEMINI program. Both seismograms are subjected to the seven pole low-pass filter of 20 mHz. The waveform comparison shows big discrepancies and unsystematic errors in travel times of S, SS, ScS, Love, Rayleigh and ScS-ScS waves. Using the waveform method, we can see, how sensitive the waveform to the earth structure is. To accomplish the discrepancies, a correction to the earth structure is essential. The corrections account for the thickness of the crust, speed gradient of  $\square_h$ , the coefficient for the  $\square_h$  and  $\square_v$  in the upper mantle for surface wave fitting, a small variation of the S speed structure at a layer under the upper mantle above 771 km for S wave fitting, and a small variation at the base the mantle layers for ScS-ScS wave fitting. The obtained seismogram fitting is excellent, either on travel time or the waveform. The velocity structure in the earth model of PREMAN or Ocean contains a transversal anisotropy layers between depth of 25 and 220 km. After this research the transversal anisotropy is also met at deeper layers, till the CMB. It is needed to obtain the fitting on three kind of shear waves, namely S, SS and ScS-ScS, where these waves propagate until differently reflection depths. The vertical anisotropy in shallow earth layers can be described through the waveform fitting on surface wave of Love and Rayleigh.*

Key words : Seismogram, S speed structure from upper mantle till CMB, and ocean

## PENDAHULUAN

Riset ini akan mengevaluasi seismogram yang dibangkitkan oleh gempa di PNG dan ditangkap di stasiun RAR, Pasific. Penelitian ini bertujuan membuktikan kembali, apakah model-model bumi yang dibentuk dari data waktu tempuh dan analisa dispersi, dimana telah banyak diajukan sebagai model bumi referensi dalam riset mereka selanjutnya, memberikan kembali seismogram sintetik yang menyerupai seismogram terukur? Oleh karena itu struktur bumi diantara kedua titik tersebut akan diinvestigasi ulang dengan menganalisa seismogram dalam domain waktu dan ketiga komponen Kartesian secara simultan.

Gempa C122297A adalah gempa dalam yang kuat, terjadi pada tanggal 22 Desember 1997 di Pulau New Britain, PNG dengan skala Richter 6.7 di kedalaman 196 km. Akibat gempa ini seluruh isi bumi akan terguncang, sehingga semua tempat di permukaan bumi dapat merasakan getaran tanah akibat gempa tersebut. Getaran tanah akibat gempa tersebut direkam oleh stasiun observasi RAR di Kepulauan Cook di Pacific Barat Daya, diubah dari dimensi kecepatan [mm/dt] menjadi deret waktu dengan dimensi tegangan listrik [mV].

Ada berbagai metoda untuk menganalisa seismogram. Dua metoda utama adalah dengan mencatat waktu tempuh beberapa fase gelombang ruang dan mengukur analisa dispersi pada gelombang permukaan. Catatan waktu tempuh di berbagai stasiun atas sebuah gempa dikumpulkan di Katalog ISC (International Seismological Center, <http://www.isc.ac.uk>). Metoda analisa dengan waktu tempuh memanfaatkan sedikit informasi tertentu dalam deret waktu seismogram, sedangkan metoda dispersi adalah metoda indirek, karena data yang diukur adalah hubungan antara kecepatan dengan frekuensi.

Catatan atas waktu-waktu tempuh fase gelombang dari sebuah gempa dengan ratusan stasiun observasi, ribuan gempa bumi dalam rentang waktu puluhan tahun dapat mencapai jumlah data hingga berjuta-juta. Dari catatan waktu tempuh ini diturunkan deskripsi tentang model-model bumi, seperti SPREM (Dziewonski & Anderson, 1981) dan IASPEI91 (Kennett, 1991), AK135 (Kennett dkk., 1995), baik model bumi global ataupun regional, dan deskripsi mengenai sumber gempa, baik lokasi hiposenter, waktu terjadinya gempa dan mekanisme gempa (Gubbins, 1990).

Riset seismologi yang telah dilakukan pada daerah ini (Pilleta dkk., 1999), telah menggunakan data sebanyak 1100 seismogram data berkualitas tinggi, dari gempa-gempa di sekitar kawasan ini dengan kekuatan gempa di atas 5,5 skala Richter. Data dianalisa pada rentang perioda 8 -- 100 detik,

dengan menggunakan analisa dispersi pada gelombang permukaan. Kedalaman air laut diduga dengan memperbandingkan kurva dispersi sintetik dan observasinya dan kedalaman air laut ini disertakan dalam model kecepatan bumi. Tetapi ketebalan kulit bumi di bawah dasar laut tak dapat diperkirakan dengan metoda dispersi (Gubbins, 1990). Metoda dispersi juga dapat diterapkan untuk mendapatkan gambaran struktur bumi melalui fitting pada kurva dispersi, diperoleh melalui analisa Monte Carlo (Aki & Richards, 1980), dimana hasilnya adalah model kecepatan S yang bersifat 2-D atau 3-D. Model kecepatan ini dimanfaatkan lebih jauh untuk menginterpretasikan struktur geologi di daerah Barat Daya Pacific ini (Pilleta dkk., 1999). Tomografi struktur kecepatan P & S di daerah yang sama yang didasarkan pada analisa waktu tiba gelombang P & S telah juga dilaksanakan (Kennett, Gudmundsson & Tong, 1994), dan juga dengan analisa dispersi, dimana hanya dilakukan pada ke tiga komponen pergerakan secara terpisah, yaitu gelombang Rayleigh pada komponen vertikal

(Okabe dkk., 2003, Simons, Zielhuis & van der Hilst, 1999) dan Love wave (Debayle & Kennett, 2000). Kedua metoda untuk menganalisa sedikit informasi dalam seismogram, sedangkan data terukur dalam metoda analisa dispersi bersifat tidak langsung.

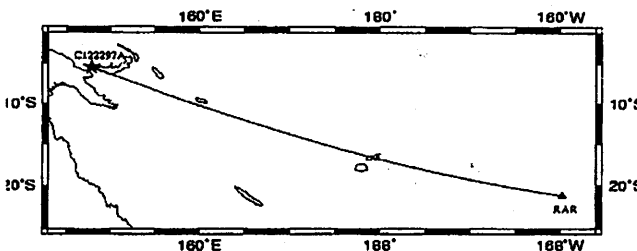
Metoda penelitian dalam riset ini memperbandingkan seismogram dalam domain waktu dan ketiga komponen pergerakan ruang secara simultan. Dengan metoda ini keseluruhan waveform akan dimanfaatkan dalam analisa seismogram. Dengan memperbandingkan waveform observasi dengan sintetiknya yang dibangun dari model bumi dari data waktu tiba dan analisa dispersi diajukan pertanyaan, apakah model-model bumi standard yang didapat dengan mengolah sedikit informasi dalam seismogram dapat memberikan kembali seismogram sintetik yang menyerupai seismogram observasi dalam ketiga komponen? walaupun analisa seismogram dilaksanakan dengan frekuensi corner pada 20 mHz.

Dalam riset ini seismogram dianalisa dalam domain waktu dan ketiga komponen secara simultan, metoda ini adalah yang terbaik (Gubbins, 1990), karena semua fase gelombang dalam seismogram akan dimanfaatkan, tidak semata waktu tiba gelombang ruang dan dispersi pada gelombang permukaan saja, namun waveform semua ragam gelombang akan diteliti. Seismogram sintetik dihitung dengan program GEMINI (Dalkolmo, 1993, Friederich & Dalkolmo, 1995), dimana inputnya adalah model bumi elastik yang lengkap, keterangan CMT dari gempa C122297A dan kedudukan stasiun observasi RAR. Agar seismogram riil dan sintetik diperbandingkan dalam satuan yang sama, file response yang berisi tentang tanggap frekuensi dari sistim perekaman di stasiun

observasi tersebut dikenakan pada seismogram sintetik, dimana kedua ragam seismogram mempunyai satuan yang sama, yaitu satuan tegangan listrik. Data seismogram adalah milik The Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS, <http://www.iris.edu>), dan didownload via HTTP.

## METODOLOGI PENELITIAN

Data seismogram dapat diperoleh dari Databank Center IRIS dan diakses per WWW. Setiap gempa menghasilkan data deret waktu pergerakan tanah yang bersifat ruang 3-D, yang oleh sebuah stasiun akan direkam dalam arah ketiga komponen Kartesian (N-S, E-W and vertical Z, lokal pada kedudukan stasiun penerima, dikenal sebagai kanal dengan akhiran --E --N \&-- Z). Kedudukan sumber gempa adalah di Pulau New Britain, PNG, dengan koordinat  $5.56^{\circ}$  Lintang Selatan dan  $148.05^{\circ}$  Bujur Timur. Untuk memisahkan komponen pergerakan tanah dalam arah toroidal dan radial, bidang horisontal yang dibentuk oleh garis N-S dan E-W lokal di stasiun observasi harus diputar, sedemikian hingga arah 'Utara' lokal diarahkan pada arah busur kecil dari stasiun observasi ke arah episenter gempa (*back-azimuth*), lihat Gambar 1. Perubahan arah diperlukan untuk memisahkan komponen-komponen penjalaran gelombang menjadi mode penjalaran gelombang dalam arah P-SV (dalam arah  $r$  dan  $z$ ) dan SH (dalam arah  $t$ ), lihat Gambar 2.



Gambar 1. Jalan Gelombang dari Episenter hingga stasiun observasi RAR

Pertama dalam penelitian ini harus dijalankan program komputer untuk melaksanakan perhitungan atas waktu tempuh sintetik fase-fase gelombang ruang utama, yaitu program **TTIMES** yang dibuat berdasarkan makalah dari Bulland & Chapman (1983), didapat dari <http://orfeus.knmi.nl>. Sedangkan untuk memproduksi seismogram sintetik dari gempa tersebut di stasiun observasi digunakan program yang berbasis metoda GEMINI (Green's function of the Earth by MINor Integration). Program GEMINI (Green's function of the Earth by MINor Integration) adalah menghitung minor dari fungsi-fungsi Green's atas suatu model bumi dan untuk suatu kedalaman sumber gempa tertentu. di mana fungsi-fungsi Green's diekspansikan untuk memenuhi kondisi syarat batas

di titik terdalam gelombang, titik kedalaman sumber dan permukaan bumi. Ekspansi dituliskan dalam frekuensi kompleks, dengan memasukkan *trick damping* untuk menghindari time aliasing. Program DISPEC (termasuk paket GEMINI) membaca posisi stasiun-stasiun penerima dan parameter-parameter moment tensor, yang tertera dalam solusi CMT baris ketiga. Posisi geographi episenter dan stasiun penerima ditransformasikan ke dalam koordinat pusat episenter (jarak episentral dan azimuth) dan dihitung harmonik spherical untuk semua stasiun penerima. Program DISPEC membaca solusi basis Green's dari GEMINI, dan membentuk sumasi atas harmonik sferis dan mengadakan transformasi balik ke koordinat geografis. Hasilnya adalah seismogram sintetik dalam kawasan frekuensi kompleks. Program MONPR, mentransform seismogram sintetik frekuensi kompleks ke time domain, dimana sebelumnya dikenakan filter lolos rendah Butterworth dan RESPONSE file dari sistim peralatan seismometer di stasiun penerima, sehingga seismogram sintetik dan seismogram riil dibandingkan dalam dimensi yang sama.

Karena jalan gelombang berupa lautan, model bumi yang dijadikan input untuk program GEMINI adalah model bumi Oean dan versi anisotropi dari PREM, disebut sebagai PREMAN (Dziewonski & Anderson, 1981). Sebagai model bumi masukan, data harus mengandung parameter elastik secara lengkap, yaitu meliputi kecepatan penjalaran gelombang kompresi dan shear dari batuan penyusun struktur bumi.

Jumlah data dalam komparasi seismogram pada tiga komponen adalah ribuan, sehingga perubahan ketebalan kulit bumi, gradient kecepatan, dan besar koefisien awal fungsi polinomial kecepatan di tiap lapisan bumi dilakukan melalui metoda trial and error.

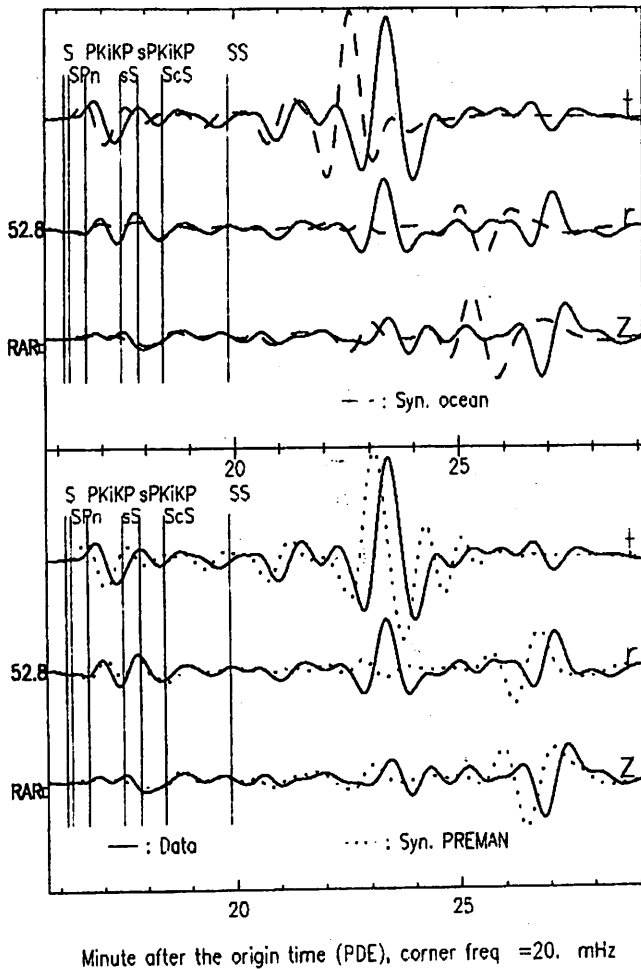
## ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ditampilkan analisa seismogram dari sebuah gempa di Pulau New Britain West, 22 Desember 1997, yang gelombangnya ditangkap oleh stasiun observasi seismologi RAR, Rarotonga di Kepulauan Cook, Pacific Barat Daya.

Gambar 2 memperlihatkan seismogram dalam tiga komponen dan perbandingan seismogram observasi dengan sintetiknya yang dihitung dari model bumi Ocean dan PREMAN. Gambar ini mempunyai 2 sub gambar. Gambar bawah menunjukkan perbandingan seismogram observasi dan sintetiknya yang dihitung dari model bumi PREMAN, dan gambar atas dari Oean. Untuk identifikasi fase gelombang yang saling bertumpuk-tumpang dalam seismogram digunakan program perhitungan waktu-waktu tempuh gelombang utama **TTIMES** dari model

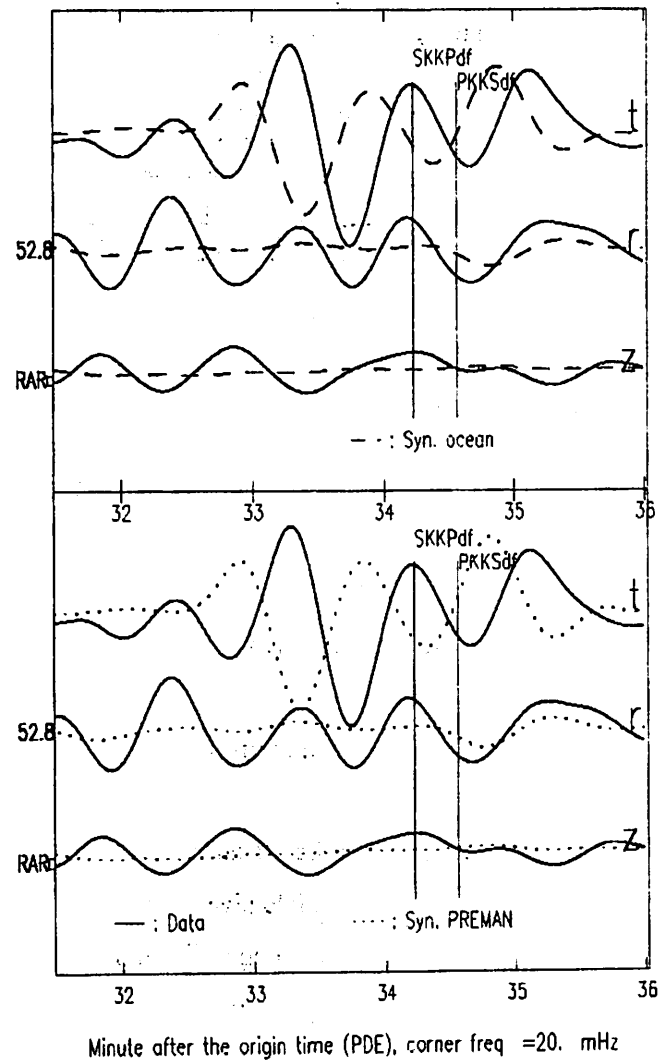
bumi IASPEI91 (dinyatakan sebagai garis vertikal dalam gambar dengan label nama fase gelombang tersebut). Satu gambar tersusun atas 3 trace, trace paling bawah adalah komponen gerakan vertikal  $z$ , kedua adalah komponen radial  $r$  dan paling atas adalah komponen toroidal  $t$ . Sumbu datar menyatakan sumbu waktu dalam menit setelah terjadinya gempa bumi (*Origin Time*, menurut keterangan PDE), sedangkan sumbu tegak menyatakan perbandingan amplitudo.

971222 EAST PAPUA NEW GUINEA RE(6.3)



Gambar 2a

971222 EAST PAPUA NEW GUINEA RE(6.3)



Gambar 2b

Gambar 2. Perbandingan seismogram observasi dan sintetik dan travel time dalam

kawasan waktu dengan corner frequency 20 mHz di stasiun observasi RAR, dimana seismogram sintetik dibangun dari model bumi Ocean dan PREMAN.

- a. Segmen waktu S, ScS, SS, gelombang permukaan Rayleigh dan Love dan
- b. Segmen waktu ScS—ScS

Jalan, gelombang antara episenter gempa C122297A dan stasiun observasi RAR, seperti diilustrasikan dalam Gambar 1 menunjukkan bahwa hampir semuanya melalui lautan. Untuk itu digunakan model bumi Ocean dari Dziewonski & Anderson (1981) untuk mensimulasikan seismogram sintetik, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.

Analisa seismogram dilaksanakan pada frekuensi corner yang dipasang pada 20 mHz. Pertama akan ditunjukkan perbandingan seismogram

riil dan sintetik-sintetiknya dalam segmen waktu gelombang-gelombang S dan repetitivnya, seperti diilustrasikan dalam Gambar 2a. Kita dapat melihat, bahwa kedua waveform S dan SS sintetik, baik dari PREMAN ataupun Ocean mempunyai waktu tiba gelombang yang lebih awal hingga 13 detik dibanding riilnya. Pengamatan lebih lanjut pada gelombang permukaan ragam Love, kita dapat melihat bahwa gelombang Love sintetik dari model Ocean mempunyai waktu tiba yang lebih awal hingga 50 detik, sementara Love sintetik dari PREMAN juga masih datang lebih awal 20 detik daripada waktu tiba gelombang Love observasi. Juga dapat kita amati, bahwa gelombang Love observasi yang seharusnya hanya dapat diamati di komponen  $t$ , ternyata juga mempunyai komponen di  $r$  dan  $z$ , dan ketiga komponen tersebut bergayut secara selaras. Ini mengindikasikan bahwa terdekomposisinya gelombang permukaan menjadi gelombang Rayleigh di bidang P -- SV dan Love di komponen  $t$  pada medium penjalaran gelombang yang bersifat isotrop dan vertikal anisotrop tidak dapat menjelaskan fenomena ini secara memadai. Sementara pengamatan pada gelombang Rayleigh dalam Gambar 2a menunjukkan bahwa Rayleigh sintetik dari model bumi Ocean tiba jauh lebih awal terhadap Rayleigh observasi, dibandingkan dengan Rayleigh sintetik dari PREMAN, yang tiba 24 detik lebih awal dari waveform Rayleigh riil.

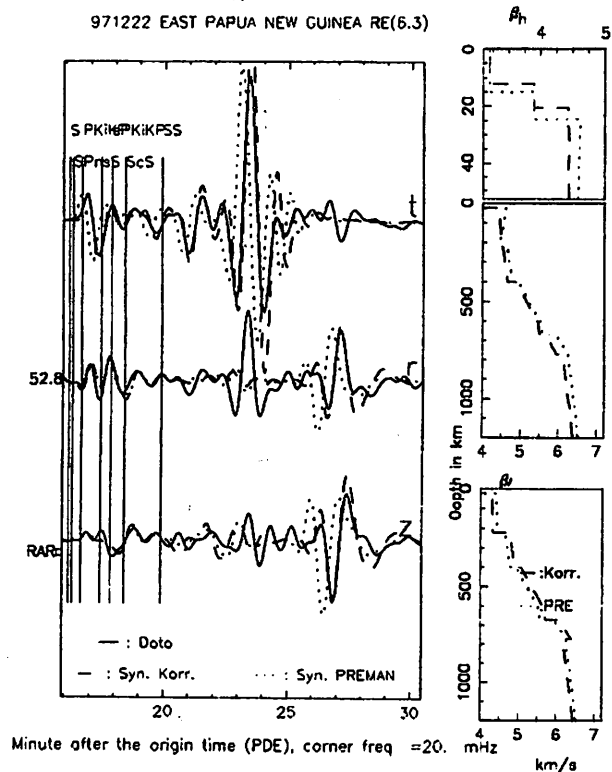
Sebenarnya model bumi Ocean dan PREMAN hanya berbeda di ketebalan kulit bumi. Menurut hipotesa isostasi dalam gravity, lautan memiliki kedalaman negatif dan kulit bumi dengan tebalnya sekitar 11 km dengan batuan yang lebih besar rapat jenisnya (jenis basaltik). Bandingkan dengan benua yang memiliki ketinggian yang positif, dimana kulit bumi menjadi lebih tebal, yaitu 35 km dengan rapat jenis batuan yang lebih ringan (jenis granitik).

Gambar 2b menyajikan perbandingan seismogram pada fase gelombang ScS-SeS. Fase ini pada bagian akhir ditandai dengan label SKKPdf. Label ini, karena merupakan konversi dari S ke P dan sebaliknya, sehingga hanya dapat diamati pada komponen  $r$  dan  $z$ , tetapi kita dapat mengamati bahwa amplitudonya sangat lemah. Sementara di komponen  $t$  ada gelombang dengan amplitudo yang kuat, oleh karena itu fase gelombang ini sebenarnya adalah ScS-SeS, yaitu gelombang yang merambat dari hiposenter secara hampir vertikal ke bawah hingga CMB (*Core Mantle Boundary*) dan dipantulkan kembali ke atas hingga permukaan bumi, dan dipantulkan balik hingga merambat kembali ke bawah dan sekali lagi dipantulkan oleh CMB hingga akhirnya ditangkap oleh stasiun pengamat RAR. Terlihat bahwa kedua model bumi yang memiliki perbedaan pada ketebalan kulit bumi tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada waktu tempuh fase gelombang ScS-

ScS ini, karena memang porsi lintasan perambatan gelombang tersebut dalam batuan kulit bumi kecil saja.

Masalah yang diselesaikan dalam riset ini adalah mendapatkan fitting pada gelombang ruang S beserta repetitivnya dan gelombang permukaan, meliputi waktu tiba gelombang ruang dan jumlah osilasi pada gelombang Love dan waktu tiba gelombang Rayleigh. Gelombang permukaan merambat sepanjang permukaan dari sumber gempa hingga stasiun pengamatan, dengan penetrasi hingga suatu kedalaman yang ekuivalen dengan panjang gelombang permukaan (Friederich, 1997). Oleh karena itu struktur kecepatan di upper mantle akan diubah sedemikian hingga dicapai fitting antara seismogram observasi dan sintetiknya, pertama pada gelombang permukaan.

Model bumi PREMAN dan Ocean dibentuk utama dari data waktu tempuh dan analisa dispersi atas gelombang permukaan, sehingga parameter elastis yang dihasilkan semata kecepatan penjalaran gelombang kompresi dan shear, sementara struktur parameter elastik yang lain, bahkan hingga model 2, 3 -- D, diperoleh dari metoda normal mode (van Heijst & Woodhouse, 1999) atau metoda gelombang permukaan (Resovsky & Ritzwoller, 1999), dikenal sebagai analisa dispersi. Karena diskrepansi dari seismogram sintetik yang dibangun dari model bumi Ocean lebih besar, selanjutnya perbandingan seismogram didasarkan pada seismogram sintetik yang dihasilkan dari model bumi PREMAN dan model bumi dikoreksi.



Gambar 3a