

Meneroka Gelombang di dalam Bumi dan Aplikasinya dalam Penyiasatan Tanah

Norfarah Nadia Ismail dan Nur Izzi Md Yusoff



Gelombang sering kali dikaitkan dengan aktiviti pemindahan tenaga. Dalam kajian fizik, terdapat pelbagai jenis gelombang yang telah dikaji dan dicirikan. Terdapat gelombang yang memerlukan bahan media untuk merambat, manakala sebahagiannya tidak memerlukan perantara untuk aktiviti yang sama.

Gelombang menghantar maklumat ataupun tenaga dari satu titik ke titik yang lain dalam bentuk isyarat. Frekuensi gelombang ini boleh diperolehi setelah mengambil kira faktor masa. Manusia amat bergantung pada gelombang, terutamanya bagi perhubungan komunikasi tanpa wayar. Sebagai contohnya, sekiranya panggilan dibuat kepada seseorang yang berada di daerah lain, komunikasi yang berlaku adalah melalui audio. Namun begitu, keseluruhan proses transmisi atau penghantaran isyarat daripada pemanggil kepada penerima berlaku dalam bentuk gelombang. Telefon menukarkan suara pemanggil kepada isyarat elektrik yang kemudiannya merambat, sama ada melalui wayar tembaga atau antena dalam komunikasi tanpa wayar.

Gelombang dalam Fizik

Gelombang ialah pergerakan atau pemindahan tenaga dalam bentuk ayunan melalui media, sama ada ruang atau jisim. Gelombang lautan atau ombak, segala bunyi yang didengar sehari-hari, pergerakan foton cahaya, dan debunga tumbuhan yang berterbangan ditiup angin adalah antara contoh gelombang yang berbeza-beza.

Gelombang wujud dalam pelbagai bentuk. Walaupun semua gelombang berkongsi ciri asas dan kelakuan yang sama, terdapat gelombang yang boleh dibezakan antara satu sama lain berdasarkan ciri khusus yang boleh diperhatikan. Gelombang boleh dikategorikan berdasarkan beberapa cara, antaranya termasuklah orientasi pergerakan zarah dan arah tenaga.

Gelombang Membujur dan Gelombang Melintang

Satu daripada cara mengkategorikan gelombang adalah berdasarkan arah pergerakan zarah individu sesuatu media relatif kepada arah pergerakan gelombang itu bergerak. Melalui asas ini, gelombang boleh dikategorikan kepada tiga kategori utama, iaitu gelombang melintang, gelombang membujur dan gelombang permukaan.

Gelombang melintang merupakan gelombang yang merujuk pergerakan zarah media dalam arah berserenjang dengan arah gelombang bergerak. Gelombang membujur pula ialah gelombang yang zarah medianya bergerak dalam arah selari dengan arah gelombang bergerak. Contoh klasik bagi gelombang membujur ialah gelombang bunyi.

Gelombang bunyi yang bergerak daripada bibir pengucap kepada telinga pendengar menyebabkan zarah udara bergetar ke hadapan dan ke belakang dalam arah yang sama serta bertentangan dengan arah pemindahan tenaga. Setiap zarah individu menolak zarah lain di sekitarnya sewaktu bergerak ke arah hadapan. Pelanggaran zarah pertama dengan zarah sekitarnya akan menyebabkan zarah pertama ini kembali ke posisi asal dan menganjak zarah kedua ke arah hadapan.

Pergerakan zarah ke hadapan dan ke belakang ini menghasilkan beberapa bahagian dalam media, iaitu bahagian yang menyebabkan zarah berkumpul rapat dan bahagian yang zarahnya tersebar jauh antara satu sama lain. Gelombang membujur senang dikenali dengan kewujudan ruang ini. Proses ini berterusan di sepanjang rantaian zarah sehinggalah gelombang bunyi tiba di telinga pendengar.

Gelombang yang bergerak melalui media pejal boleh terdiri daripada

gelombang melintang mahupun gelombang membujur. Namun begitu, gelombang yang bergerak melalui media cecair atau gas biasanya merupakan gelombang membujur. Gelombang melintang memerlukan media yang tegar untuk memindahkan tenaga. Zarah yang bergerak akan menarik zarah di sekitarnya. Jadi, sekiranya sesuatu media itu tidak tegar seperti cecair, zarah ini hanya akan berselisih antara satu sama lain. Keadaan perselisihan zarah ini adalah satu daripada ciri cecair mahupun gas yang akan menghalang zarah daripada menganjak zarah sekitar pada arah berserenjang dengan arah pergerakan gelombang. Oleh sebab itu, hanya gelombang membujur yang akan dijumpai bergerak melalui sejumlah cecair seperti ombak di lautan.

Dalam situasi gempa bumi, bencana alam tersebut mampu menghasilkan kedua-dua gelombang melintang dan gelombang membujur yang melalui struktur pejal di dalam bumi. Ketika ahli seismologi mula mengkaji tentang gelombang gempa bumi, mereka mendapati hanya gelombang membujur sahaja yang mampu bergerak melalui teras bumi. Disebabkan oleh penemuan ini, ahli geologi beranggapan bahawa teras bumi terdiri daripada cecair, iaitu berkemungkinan cecair besi.

Gelombang Permukaan

Walaupun gelombang yang bergerak dalam lautan adalah gelombang membujur, namun begitu gelombang yang bergerak di permukaan lautan dinamakan sebagai gelombang permukaan. Gelombang permukaan ialah gelombang yang zarah medianya bergerak dalam keadaan membulat.

Gelombang permukaan bukanlah gelombang membujur mahupun gelombang melintang. Dalam gelombang permukaan, hanya zarah di permukaan medium sahaja yang akan mengalami atau melalui pergerakan membulat. Pergerakan zarah ini pula cenderung untuk berkurangan apabila menjauhi permukaan.

Setiap gelombang yang bergerak melalui sesuatu media mempunyai puncanya yang tersendiri. Puncu ini dikatakan sebagai terdapat titik permulaan anjakan sesuatu zarah di sepanjang medium itu. Sebagai contohnya, gelombang

bunyi biasanya bermula daripada getaran peti suara ataupun tali gitar yang menyebabkan pergerakan zarah secara getaran di udara. Bagi lokasi gelombang yang bermula di medium, zarah yang teranjak daripada posisi keseimbangan selalunya akan bergerak dengan arah yang sama dengan punca getaran.

Gelombang Elektromagnetik dan Gelombang Mekanikal

Antara cara bagi mengkategorikan gelombang adalah berdasarkan kebolehan untuk memindahkan tenaga melalui ruang vakum. Pengkategorian gelombang berdasarkan kebolehan ini menghasilkan dua kategori gelombang, iaitu gelombang elektromagnetik dan gelombang mekanikal.

Gelombang elektromagnetik ialah gelombang yang berupaya memindahkan tenaga melalui ruang vakum. Gelombang ini dihasilkan oleh getaran zarah yang bercas. Gelombang elektromagnetik yang terhasil oleh matahari akan bergerak ke bumi melalui ruang vakum di angkasa lepas. Jika tidak disebabkan oleh kebolehan gelombang elektromagnetik yang boleh bergerak merentasi ruang vakum ini, maka tiadalah kehidupan di muka bumi ini. Semua gelombang cahaya juga adalah contoh gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik bergerak melalui vakum pada kelajuan yang sama, iaitu $299792458 \text{ ms}^{-1}$. Selain gelombang cahaya, gelombang mikro dan sinar-X, gelombang ultraviolet adalah antara contoh gelombang elektromagnetik.

Gelombang mekanikal pula ialah gelombang yang tidak berupaya memindahkan tenaganya melalui ruang vakum. Gelombang mekanikal memerlukan sebarang jenis medium bagi memindahkan tenaganya dari suatu tempat ke suatu tempat yang lain. Gelombang bunyi adalah satu daripada contoh gelombang mekanikal.

Bagi gelombang mekanikal ini, jarak rambatan gelombang dihadkan oleh medium pemindahannya. Sekiranya ayunan bahan bergerak hanya di sekitar titik punca, maka pergerakan yang terhasil adalah sedikit. Gelombang mekanikal diukur dengan nilai anjakan dibahagikan dengan panjang gelombang. Jika faktor

tidak berdimensi ini adalah satu, maka efek harmoni akan terhasil. Sebagai contohnya, gelombang ombak yang menghempas pantai, jika faktor tidak berdimensi ini melebihi satu, maka gelombang yang lebih kuat, iaitu gelora, akan terhasil.

Asas Rambatan Gelombang Seismik

Gelombang seismik ialah gelombang tenaga yang terhasil daripada perpecahan atau pelanggaran batuan di dalam bumi. Gelombang seismik juga boleh terhasil daripada letupan. Gelombang ini ialah tenaga yang merambat di dalam bumi dan direkodkan menggunakan seismograf.

Gelombang seismik boleh didefinisikan sebagai getaran yang dihasilkan oleh gempa bumi, letupan ataupun sumber tenaga yang menyerupainya dan merambat di dalam bumi atau di sepanjang permukaan bumi. Seismologi mengambil manfaat daripada rambatan gelombang melalui subpermukaan. Secara prinsipnya, gempa bumi menghasilkan gelombang seismik. Terdapat dua gelombang elastik utama, iaitu gelombang jasad dan gelombang permukaan.

Gelombang jasad terdiri daripada gelombang P dan gelombang S serta merambat melalui bumi. Gelombang P bergerak dengan kelajuan yang paling tinggi dan menjadi gelombang pertama yang akan tiba selepas berlakunya gempa bumi. Dalam gelombang S pula, batuan berayun (*oscillates*) dengan arah yang berserenjang dengan arah rambatan gelombang. Kedua-dua gelombang P dan S bergerak keluar daripada punca gempa di dalam bumi. Laluan sinar gelombang jasad ini boleh menembusi dan merambat di dalam bumi sebagai gelombang biasan, pantulan mahupun secara terus.

Gelombang permukaan pula terdiri daripada gelombang Rayleigh dan gelombang Love serta merambat di sepanjang permukaan bumi. Gelombang ini lebih perlahan dan tiba lebih lambat berbanding dengan gelombang jasad. Situasi ini menerangkan mengapa ketika gempa bumi berlaku, gelombang P dan S akan memberikan impak kemusnahan minimum hingga sederhana, manakala gelombang permukaan memberikan impak kemusnahan yang lebih ketara, seperti kehilangan atau kerosakan struktur binaan

buatan manusia di samping menyebabkan ubah bentuk muka bumi.

Kelakuan gelombang ini telah ditemukan dan dikaji oleh penyelidik terdahulu seperti Terzaghi dan Hvorslev yang juga antara penyelidik pertama memperkenalkan penggunaan gelombang seismik dalam kejuruteraan geoteknik. Bertitik tolak daripada penemuan ini, teori rambatan gelombang telah berkembang dan didapati bahawa pergerakan rambatan gangguan yang dimulakan dalam ujian gelombang seismik ini dipanggil sebagai gelombang tekanan.

Gelombang permukaan bergerak di sepanjang ketidakselajaran di antara bahan. Ketidakselajaran yang paling ketara yang dapat dilihat pada permukaan bebas adalah antara bahan batuan dengan air. Gelombang yang bergerak pada permukaan bebas ini juga boleh dibahagikan kepada dua jenis. Jenis yang pertama menggerakkan zarah di dalam orbit elipsoid. Satu paksi elipsoid adalah normal kepada permukaan, manakala satu paksi lagi berada dalam arah rambatan gelombang permukaan. Gelombang ini dinamakan sebagai gelombang Rayleigh, bersempena dengan nama seorang ahli fizik British, Lord Rayleigh yang menemukan dan menghuraikan gelombang ini pada tahun 1887.

Jenis gelombang permukaan yang kedua menggerakkan zarah dalam satah yang sama dengan permukaan bebas dan normal kepada arah rambatan seperti kelakuan gelombang S. Gelombang permukaan ini juga boleh dianggap sebagai gelombang S biasa yang terperangkap dalam lapisan permukaan bumi yang berhajaju rendah. Gelombang ini dipanggil sebagai gelombang Love, bersempena dengan nama seorang ahli matematik British, A.E.H Love yang menemukan dan menghuraikan mengenai gelombang ini. Sekiranya ruang-separa dilapisi oleh satu lapisan bahan yang mempunyai halaju gelombang jasad yang lebih rendah, maka gelombang Love akan terbentuk.

Halaju Gelombang Tekanan

Teori rambatan gelombang menyatakan bahawa pergerakan rambatan gangguan yang dimulakan dalam ujian gelombang seismik dipanggil sebagai gelombang

tekanan. Halaju gelombang P dan gelombang S bergantung pada kekakuan sesuatu bahan pejal dengan mengambil kira ubah bentuk yang disebabkan oleh setiap gelombang. Kajian mendapati bahawa halaju tapak jauh bagi gelombang tekanan adalah bergantung pada kekakuan dan ketumpatan jisim bahan. Dengan mencari halaju gelombang ini, sifat mekanik sesuatu medium yang berkaitan dengan rambatan gelombang boleh ditentukan. Dengan kata lain, halaju gelombang adalah penting untuk menentukan arah aliran tenaga yang berkaitan dengan rambatan gelombang.

Halaju gelombang Love bergantung pada panjang gelombang itu sendiri. Gelombang berserta dengan fenomenanya ini dipanggil sebagai serakan. Halaju bagi serakan ini pula adalah antara halaju gelombang S terendah dengan yang tertinggi dalam lapisan yang berbeza. Oleh itu, halaju bagi gelombang Love ialah bermula dari halaju gelombang S dalam media separa (di frekuensi yang sangat rendah) hingga halaju gelombang S di lapisan cetek (di frekuensi sangat tinggi). Kebergantungan terhadap frekuensi ini menunjukkan bahawa gelombang Love adalah bersifat terserak.

Kajian juga menunjukkan bahawa terdapat perkaitan antara gelombang Rayleigh dan gelombang P dengan gelombang S. Pengiraan nilai relatif bagi halaju gelombang P, gelombang S dan gelombang Rayleigh sebagai satu fungsi nisbah Poisson juga boleh dilakukan. Halaju gelombang Rayleigh merambat ini adalah satu daripada tumpuan utama dalam kejuruteraan geoteknik. Hal ini disebabkan oleh gelombang Rayleigh boleh dihasilkan secara mekanikal dan halaju serakannya diukur di tapak bagi mengkaji kekerasan tanah.

Prinsip Kaedah Gelombang Permukaan

Gelombang Rayleigh bergulung di sepanjang permukaan dengan pergerakan yang lebih kompleks berbanding dengan gelombang Love. Walaupun gelombang Rayleigh tampak bergulung seperti gelombang di lautan, pergerakan zarahnya adalah berlawanan dengan gelombang di lautan. Oleh sebab gelombang ini bergulung, hal ini menggerakkan bumi ke atas dan ke bawah, serta ke hadapan

dan ke belakang mengikut arah pergerakan gelombang tersebut. Kebanyakan gegaran yang dirasakan dari gempa bumi adalah disebabkan oleh gelombang Rayleigh. Seperti juga sifat gelombang Love, amplitud gelombang Rayleigh akan berkurangan secara drastik dengan kedalaman.

Aplikasi Kaedah Gelombang Permukaan

Terdapat beberapa kaedah gelombang permukaan yang boleh digunakan bagi penyiataan struktur geologi subpermukaan. Kaedah geofizik dalam eksplorasi tanah atau batuan bukan sahaja berkos rendah, malah melibatkan masa pengukuran di lapangan yang biasanya juga tidak lama. Kaedah geofizik ini boleh dilaksanakan dengan lebih cepat dan murah serta boleh meliputi keluasan yang lebih luas. Selain itu, kaedah ini juga boleh digunakan bagi pencirian sifat fizikal bahan subpermukaan berskala besar dalam keadaan yang terkawal dan tidak terganggu.

Satu daripada kaedah yang boleh digunakan ialah kaedah biasan seismik. Kaedah biasan seismik ini digunakan bagi penentuan ciri tanah runtuh seperti kedalaman dan dip permukaan gelinciran atau planar ricih. Kaedah ini bukan sahaja terhad kepada pencarian kedalaman batuan dasar dan halaju seismik setiap lapisan, tetapi telah digunakan juga bagi tujuan penyiataan ubah bentuk cerun graviti.

Kaedah biasan seismik memerlukan sedikit sentuhan kepada tanah dan mengakibatkan beberapa kerosakan kecil. Kaedah biasan seismik ini menggunakan pembiasan gelombang P untuk menguji bahan. Bagi membolehkan kaedah ini diguna pakai, bahan mestilah dalam keadaan tidak homogen dengan halaju gelombang meningkat daripada permukaan. Hasil kaedah ini ialah profil atau peta dalaman sesuatu bahan. Penjana yang digunakan pula biasanya adalah satu letupan ataupun penggetar yang besar.

Kaedah lain bagi penyiataan struktur geologi subpermukaan ialah kaedah pantulan seismik. Kaedah ini adalah antara kaedah yang tertua dan biasa digunakan bagi pengujian seismik. Kaedah ini menggunakan pantulan gelombang dari pemantul di dalam tanah yang boleh terdiri daripada permukaan ketidakselanjaran atau kecacatan yang tertumpu. Jika dalam

kaedah biasan, transduser diletakkan dalam satu baris daripada penjana ke arah luar, bagi kaedah pantulan pula, transduser diletakkan di sekitar titik penguja.

Penjana akan menghasilkan janaan atau impuls yang seterusnya menghasilkan gelombang tekanan yang terpancar menjauhi punca dalam semua arah dengan bentuk gelombang hemisfera. Separuh daripada tenaga gelombang akan menuruti laluan terus dari lokasi punca ke lokasi pengesan. Masa ketibaan ini diukur berdasarkan jarak perjalanan dan halaju gelombang.

Dengan mengukur jarak serta masa, halaju gelombang P bagi lapisan tanah dapat ditentukan dengan mudah. Ketebalan lapisan boleh dikira daripada halaju gelombang bagi lapisan yang berbeza ini. Namun begitu, antara kesukaran bagi kaedah ini ialah gelombang P akan memantulkan kedua-dua gelombang P dan S, serta sebaliknya. Selepas beberapa pantulan, gambar gelombang P dan S akan menjadi sangat kompleks.

Jika terdapat beberapa lapisan tanah, maka pantulan yang terhasil dalam media juga menjadi semakin banyak. Maka itu, sesi pemrosesan isyarat yang direkodkan adalah sangat penting bagi kaedah pantulan seismik. Keterbatasan kaedah ini ialah paksi menegak dalam rajah masa-perjalanan itu sendiri, iaitu paksi masa. Untuk mengubahnya kepada paksi panjang, misalnya mengubahnya kepada bunyi sebenar tanah, halaju gelombang P bagi setiap lapisan berlainan itu mestilah diketahui.

Kaedah pantulan seismik ini diiktiraf dalam bidang geofizik, terutamanya dalam industri petroleum. Dengan berkembangnya teknologi dalam penyelidikan kaedah gelombang permukaan yang lebih canggih, kedua-dua kaedah pantulan seismik dan kaedah biasan seismik tidak lagi menjadi kaedah yang diminati pada masa ini.

Kaedah spektrum frekuensi-nombor gelombang (f-k) adalah kaedah yang telah digunakan secara meluas dalam arena geofizik serta diguna pakai bagi aplikasi kejuruteraan geoteknik. Kajian mengenai kaedah f-k ini dimulakan seawal lewat tahun 1980-an, namun begitu mula popular dan mendapat tempat dalam penyelidikan subtapak selepas diberikan perhatian dan

ditambah baik pada akhir tahun 1990-an. Dalam kaedah f-k, gelombang permukaan yang merambat diukur dalam beberapa lokasi yang sebaris dengan punca penjana. Pengukuran gelombang permukaan yang merambat itu di lokasi yang bersiri dalam satu barisan boleh mendedahkan panjang gelombang kepada gelombang permukaan yang pada dasarnya merupakan fungsi kepada nombor gelombang.

Maklumat nombor gelombang ini, bersama-sama maklumat frekuensi yang diperoleh daripada bentuk gelombang domain masa akan digunakan bagi menentukan halaju fasa. Keterbatasan kaedah ini ialah mempunyai masalah alias dalam domain nombor gelombang yang menghalang halaju daripada dihasilkan di julat frekuensi yang lebih tinggi.

Oleh sebab itu, sejumlah punca yang lebih besar diperlukan bagi mendapatkan resolusi yang baik dalam domain nombor gelombang ini. Jika berlaku kes resolusi adalah rendah, maka hasil pemisahan mod kelak akan menjadi kurang tepat. Selain memerlukan masa pengukuran yang agak lama, kaedah ini juga terbatas kerana kekangan topografi dan kebolehan alat instrumentasi.

Selain itu, kaedah Analisis Gelombang Permukaan Berbilang Saluran (MASW) merupakan perkembangan penting dalam dunia kaedah gelombang permukaan. Kaedah ini diperkenalkan oleh para penyelidik pada akhir tahun 1990-an dan pada awal tahun 2000. Dalam kaedah ini, satu jajaran kesan masa yang banyak diukur menggunakan punca getaran sapuan-sin atau penukul impulsif.

Kaedah MASW berkebolehan digunakan sebagai satu daripada aplikasi kaedah geofizik bagi pengukuran tapak dekat. Namun begitu, kaedah ini mempunyai ketidakseragaman mod dalam pengiraan analisis songsangannya. Kajian lanjut diperlukan bagi menggunakan kaedah MASW dalam eksplorasi geoteknik secara umumnya dan pengujian di atas tapak turapan jalan secara khususnya.

Satu daripada kaedah terkini yang tidak asing digunakan dalam aplikasi kaedah geofizik dan kejuruteraan ialah kaedah Analisis Spektrum Gelombang Permukaan (SASW). Penggunaan kaedah SASW telah menarik minat dan perhatian

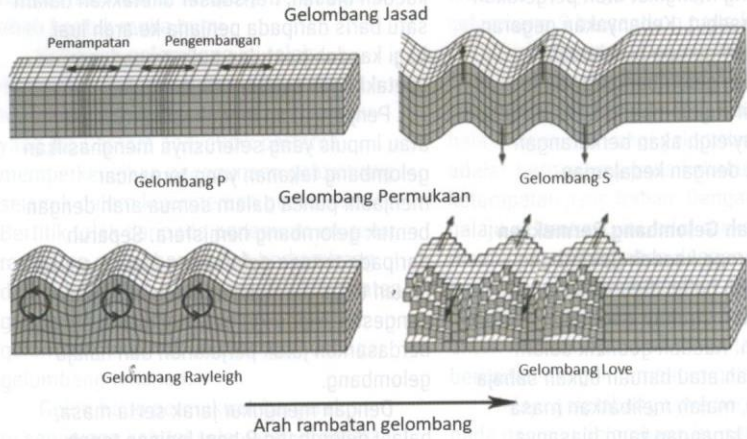
penyelidik dari serata dunia dan rekod mengenainya dijumpai di Amerika Syarikat, Jepun, Sweden, Norway, Korea Selatan, dan Malaysia. Para penyelidik telah mendalami aspek teori dan menambah baik prosedur pengukuran di lapangan serta mempelbagaikan teknik analisis data menggunakan pelbagai teori permodelan yang dikira bersesuaian.

Selain digunakan dalam kejuruteraan jalan raya, kaedah SASW ini juga digunakan dalam penyiataan empangan konkrit dan keberkesanan teknik penambah baik tanah. Antara kelebihan kaedah SASW termasuklah halaju gelombang bagi setiap lapisan individu boleh dirakam berbeza-beza secara arbitari. Satu hentakan dari punca penjana boleh menghasilkan gabungan gelombang permukaan Rayleigh dan boleh mewakili satu julat frekuensi yang besar.

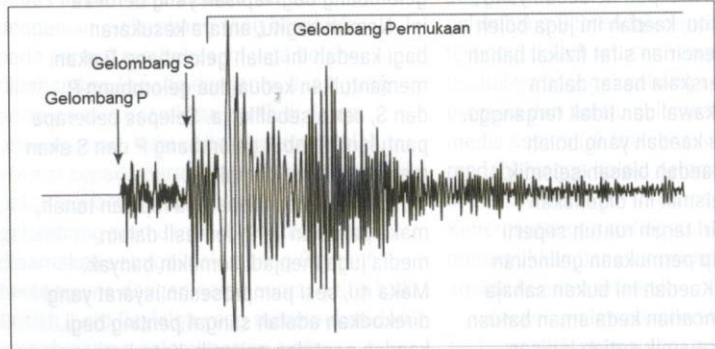
Dengan bantuan peranti rakam seperti penganalisis isyarat dinamik serta komputer berkuasa tinggi, kesemua maklumat dalam julat frekuensi tersebut dapat dirakamkan pada satu-satu masa. Sebagai hasilnya, kerja pengukuran di lapangan boleh dilakukan dengan lebih cepat dan tepat kerana julat frekuensi direkodkan adalah besar dan berterusan.

Kaedah ini mengguna pakai gelombang permukaan mekanikal, gelombang Rayleigh bagi menyiasat media. Gelombang permukaan ini menyusuki media dari permukaan hinggalah ke kedalaman satu panjang gelombang. Hal ini bermakna, dengan menggunakan panjang gelombang yang berbeza, media boleh disiasat dengan kedalaman yang berbeza. Oleh sebab panjang gelombang Rayleigh adalah berkadar songsang dengan frekuensi, frekuensi yang rendah akan menyusuk jauh lebih dalam berbanding dengan frekuensi yang lebih tinggi.

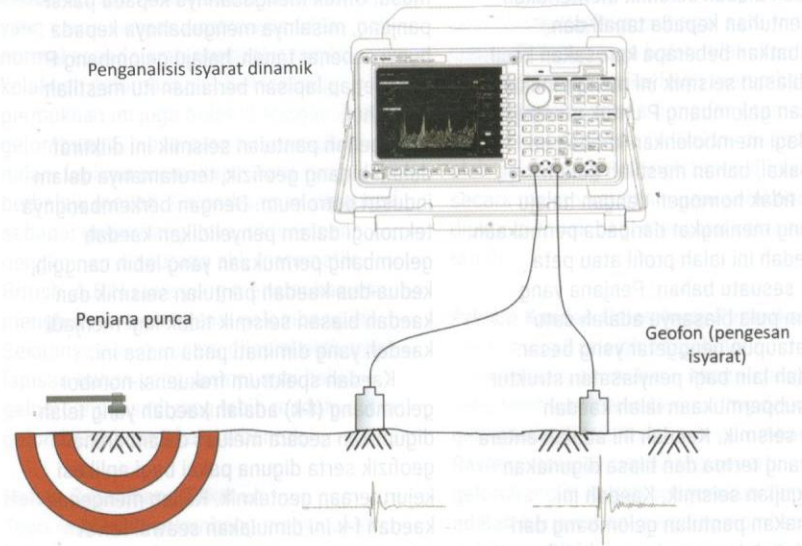
Secara keseluruhannya, terdapat perkembangan yang berlaku dalam pengaplikasian teknologi gelombang ini, terutamanya gelombang seismik secara umumnya dan gelombang permukaan secara khususnya dalam pengukuran tapak bagi penyiataan tanah serta subtapak. Selain menggunakan kaedah biasa yang menjadi amalan jurutera, kaedah gelombang permukaan ini menjadi pilihan alternatif yang lebih cepat, cekap dan kos efektif. ©



Gelombang jasad dan gelombang permukaan.



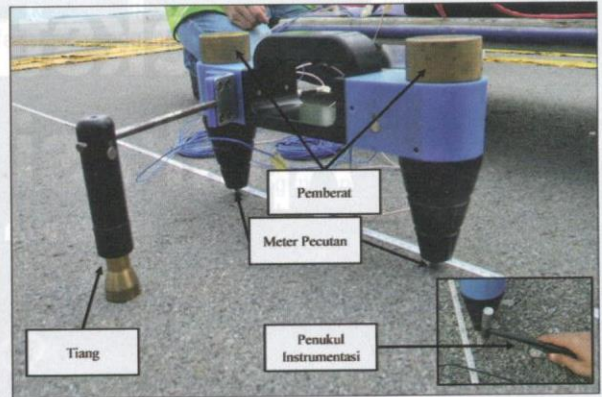
Contoh sejarah masa isyarat dirakam daripada gelombang seismik.



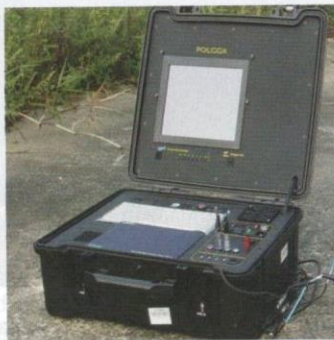
Tatacara penyusunan bagi pengukuran kaedah SASW.



Proses pengukuran di lapangan menggunakan kaedah SASW.



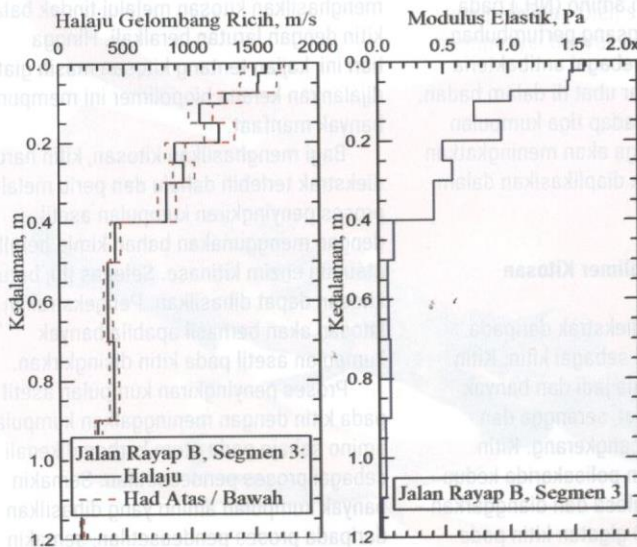
Proba PiScan, alat pengukur bagi evaluasi lapangan jalan raya.



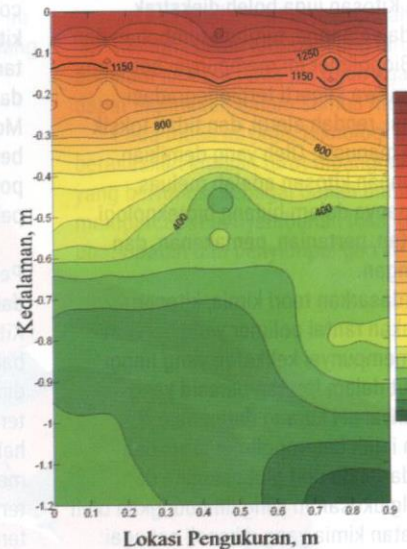
Peranti perakam isyarat gelombang mekanikal yang dijana.



Proses pengukuran lapangan di tapak menggunakan kaedah SASW.



Profil halaju gelombang yang direkodkan bagi setiap sela kedalaman.



Profil plot kontur 2-D bagi halaju gelombang.