

## PENENTUAN SIFAT KEKUKUHAN DAN KETEBALAN LAPISAN PERMUKAAN BERASFALT MENGGUNAKAN KAEDAH PENCARIAN RESONAN TAMBAHAN (ERS)

Nur Mustakiza Zakaria, Muhammad Fakhry Md. Jaffary, Muhammad Kamal Hassan, Asmah Hamim, Nur Izzati Md. Yusoff\*, Khairul Anuar Mohd Nayan

Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

### Article history

Received

12 February 2015

Received in revised form

30 March 2015

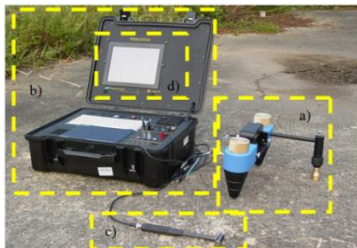
Accepted

1 August 2015

\*Corresponding author

izzi@eng.ukm.my

### Graphical abstract



### Abstract

This study was conducted to investigate the stiffness and thicknesses of asphalt surface layer using the Enhance Resonance Search (ERS) technique. A total of fifteen locations in the Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) Campus have been identified to carry out this experiment. The results were then compared with standards provided by the Malaysian Public Works Department (PWD), Jabatan Pembangunan dan Penyelenggaraan (JPP) UKM and Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd. The computation found that the range of elastic moduli values of asphalt layer is between 3928.877 and 17726.012 MPa. A comparison between the experiment results and JPP UKM standard on pavement thickness showed that the different is between 20% to 60%, with the average thickness of 44.13 mm. However, the average value of thickness is still in good agreement with the JKR and JPP UKM standards. Some stiffness values obtained are higher than the standard, probably due to the quality of materials used, the influence of the traffic load and the age of the pavement construction.

**Keywords:** Enhanced Resonance Search (ERS) method, pavement, thickness, stiffness

### Abstrak

Kajian ini telah dijalankan untuk menentukan kekukuhan dan ketebalan lapisan permukaan berasfalt menggunakan kaedah Pencarian Resonan Tambahan (ERS). Sebanyak lima belas lokasi di dalam kampus Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) telah dikenal pasti bagi menjalankan ujikaji. Hasil ujikaji kemudiannya dibandingkan dengan piawaian yang telah ditetapkan oleh Jabatan Kerja Raya (JKR) Malaysia, Jabatan Pembangunan dan Penyelenggaraan (JPP) UKM dan Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd. Pengiraan mendapati bahawa julat nilai modulus elastik turapan berasfalt adalah di antara 3928.877 sehingga 17726.012 MPa. Manakala perbandingan ketebalan reka bentuk turapan ujikaji dengan JPP UKM menunjukkan julat nisbah perbezaan di antara 20% hingga 60%, dengan purata ketebalan sebanyak 44.13 mm. Walau bagaimanapun, purata ketebalan yang diperolehi boleh dikatakan masih mengikut piawaian JKR dan juga JPP UKM. Sebahagian nilai kekukuhan yang diperolehi adalah lebih tinggi daripada nilai piawaian, berkemungkinan disebabkan oleh kualiti bahan yang digunakan, pengaruh beban trafik dan umur pembinaan turapan.

**Kata kunci:** Kaedah Pencarian Resonan Tambahan (ERS), turapan, ketebalan, kekukuhan

© 2015 Penerbit UTM Press. All rights reserved

## 1.0 PENGENALAN

Turapan boleh lentur (TBL) atau turapan konkrit berasfalt adalah terdiri daripada campuran pasir, agregat, bitumen dan bahan pengisi yang menyediakan satu permukaan jalan yang mempunyai rintangan kelincir yang mencukupi serta berfungsi bagi menyebarkan beban kenderaan pada asas jalan raya (subgred), dan pada masa yang sama mempunyai jangka hayat yang lama tanpa memerlukan kerja pembaikan jalan yang kerap. Turapan direka bentuk dengan mengambil kira empat aspek utama iaitu; (i) ketebalan turapan, (ii) kekuatan turapan, (iii) sifat turapan yang kalis terhadap air larian permukaan dan (iv) tekstur permukaan turapan yang baik.

Terdapat tiga kaedah dalam reka bentuk TBL iaitu secara empirik, secara mekanik dan gabungan kedua-dua kaedah. Kaedah-kaedah ini membolehkan reka bentuk struktur lapisan turapan dapat mengekalkan had kerosakan yang telah ditetapkan yang berpunca daripada beban trafik dan keadaan alam sekitar sepanjang hayat perkhidmatannya [1]. Reka bentuk TBL melalui kaedah empirik melibatkan penggunaan persamaan, jadual dan rajah bagi mengira keadaan TBL manakala kaedah mekanik melibatkan pengiraan keadaan TBL yang dibantu dengan komputer. Kaedah mekanik-empirik adalah gabungan kedua-dua kaedah ini di mana ia banyak digunakan untuk penyelenggaraan, pemuliharaan dan pembaikan TBL [2-3]. Menurut Ullidtz [2], bahan TBL mempunyai sifat tidak isotropi, zarah terpisah dan tak homogen. Keadaan ini membuatkan TBL adalah struktur yang tidak mudah dianalisis dan mengandungi parameter modulus, tegasan, terikan dan pengaruh persekitaran yang rumit.

Secara amnya, objektif reka bentuk turapan adalah melibatkan pemilihan bahan binaan dan penentuan ketebalan bagi setiap lapisan yang betul bagi memastikan lapisan TBL mampu melindungi subgred daripada kesan beban trafik [4]. Akan tetapi, mutu TBL menurun dengan peredaran masa dan ia bergantung pada mutu bahan yang digunakan, keadaan alam sekitar dan beban trafik yang dikenakan. Peningkatan muatan trafik dan infrastruktur jalan yang lama akan menyebabkan ketebalan TBL semakin berkurangan dan memendekkan jangka hayatnya [5]. Oleh yang demikian, ketebalan yang betul bagi setiap lapisan juga perlu ditekankan bagi mengelakkan kerosakan terhadap turapan akibat daripada beban trafik dan persekitaran.

Tindak balas turapan yang terhasil akibat daripada beban trafik yang dikenakan pada TBL melibatkan mampatan tegasan pada arah menegak dan tegangan terikan pada arah mendatar. Prestasi turapan juga melibatkan fungsi kebolehhidmatan dan keadaan struktur TBL [6]. Pengetahuan mengenai kelakuan pergerakan trafik, sentuhan tayar, modulus, nisbah Poisson, tegasan, terikan, redaman (damping), suhu dan keadaan persekitaran diperlukan untuk mengira tindak balas dan prestasi TBL [7]. Selain itu,

dalam sistem pengurusan turapan jalan raya, penilaian terhadap kekukuhan turapan masa kini dan meramal kekukuhannya pada masa hadapan merupakan salah satu aspek utama yang perlu dititikberatkan [8]. Kekukuhan TBL dapat ditentukan melalui parameter elastik modulus di mana parameter ini memainkan peranan yang penting dalam meramal dan menilai prestasi sistem TBL apabila dikenakan beban trafik yang statik dan berulang-ulang [9].

Oleh yang demikian, penentuan ketebalan dan ciri mekanikalnya iaitu sifat kekukuhan bahan TBL adalah penting dalam merangka strategi pengurusan turapan yang optimum [10]. Bagi menentukan sifat kekukuhan bahan dan ketebalan lapisan TBL, kaedah seismos menggunakan kaedah analisis spektrum gelombang permukaan (Spectral Analysis of Surface Wave, SASW) telah diperkenalkan [11]. Gucunski *et al.* [12] menyatakan kaedah ini menyediakan penilaian yang sangat tepat berbanding kaedah seismos yang lain tetapi masalah yang timbul pada media dengan struktur turapan yang mempunyai lapisan yang tidak teratur akan menyukarkan mod gelombang Rayleigh (gelombang R) yang sebenar dianalisis.

Selain itu, ia juga menyebabkan kelompok gelombang yang terhasil daripada pembiasan dan pantulan gelombang jasad sukar untuk dibezakan dan pelbagai pantulan yang terhasil daripada sempadan atas dan bawah turapan akan mengganggu gelombang permukaan yang mengakibatkan halaju fasa sepadan dan jarak gelombang yang terhasil adalah lebih besar daripada ketebalan turapan yang sebenar [13]. Masalah-masalah yang timbul ini mengakibatkan profil turapan yang diperolehi melalui kaedah SASW tidak menunjukkan profil turapan yang sebenar. Bagi mengatasi permasalahan yang timbul, Cho *et al.* [13] telah menggunakan satu kaedah baru iaitu kaedah Carian Resonan (Resonance Search, RS) terhadap turapan konkrit.

Dalam kajian ini, kaedah ERS telah digunakan untuk menentukan nilai ketebalan dan kekuatan bahan dengan menggunakan Pengimbas Integriti Turapan (PiScanner) yang telah dicipta oleh Joh *et al.* [14]. Walaupun penggunaan PiScanner berdasarkan kaedah ERS telah diuji untuk struktur turapan tegar (STT), namun alat ini masih belum diuji keberkesannya untuk struktur TBL. Oleh itu, objektif utama kajian ini adalah mengenal pasti keberkesanan penggunaan PiScanner terhadap TBL dalam menentukan ketebalan sistem turapan yang sedia ada dan sifat kekukuhannya berdasarkan teori elastik juga diberi perhatian. Kajian ini hanya melibatkan penilaian bahagian struktur TBL pada bahagian lapisan permukaan berasfalt sahaja iaitu gabungan di antara lapisan haus dan lapisan pengikat.

## 2.0 KAEDAH ERS

Dalam kajian ini, ketebalan lapisan turapan ditentukan dengan menggunakan kaedah ERS. Kaedah ini

adalah gabungan di antara kaedah SASW dan kaedah resonan bagi menentukan profil modulus lapisan turapan [13]. Cho *et al.* [13] dan Joh *et al.* [14] menjelaskan bahawa kaedah SASW bertanggungjawab dalam menentukan profil halaju gelombang ricih manakala ketebalan lapisan turapan akan ditentukan dengan menggunakan carian resonan. Disebabkan penentuan ketebalan lapisan turapan tidak cukup tepat melalui kaedah SASW, carian resonan iaitu resonan daripada lapisan turapan digunakan bagi memastikan ketebalan lapisan turapan dapat ditentukan dengan tepat.

Kaedah SASW merupakan satu kaedah yang digunakan untuk menilai profil kekukuhan, sistem turapan dan struktur konkrit dengan menggunakan halaju gelombang permukaan bagi mendapatkan sifat kenyal sesuatu bahan. Kaedah ini juga dapat menentukan modulus elastik dan ketebalan sesuatu sistem yang berlapis dengan menggunakan sepenuhnya kelebihan gelombang permukaan [12]. Penggunaan domain frekuensi berbanding domain masa dan nombor gelombang bagi analisis jelmaan gelombang R mempunyai beberapa kelebihan antaranya ialah menyelesaikan kes persamaan perambatan gelombang dalam domain frekuensi sedia ada dan lebih mudah penggunaannya yang melibatkan analisis parameter frekuensi dan nombor gelombang. Hal ini kerana analisis dalam domain masa yang menggunakan kamiran berangka adalah lebih rumit [15].

Maklumat lengkap mengenai perambatan gelombang diperolehi melalui analisis frekuensi dan nombor gelombang [16]. Melalui penyelesaian analisis frekuensi dan nombor gelombang, Nolet dan Panza [17] mendapati bahawa penghasilan spektrum adalah lebih menyakinkan. Selain itu, jelmaan Fourier telah dikembangkan penggunaannya dalam menganalisis spektrum iaitu melalui kaedah berangka yang berkemampuan menghitung secara digital yang dikenali sebagai Jelmaan Fourier Pantas (Fast Fourier Transform, FFT). FFT berupaya mengukur dan menganalisis sistem dinamik dalam domain frekuensi.

Pengukuran gelombang jasad adalah pengukuran dalam kaedah resonan yang berasaskan daripada pantulan yang pelbagai dalam media yang disempadani. Kaedah ini stabil dalam menentukan frekuensi dominan daripada pelbagai pantulan gelombang. Salah satu kaedah resonan ialah kaedah gema hentaman (impact echo method, IE). Kaedah IE melibatkan hentaman yang dikenakan ke atas permukaan struktur pada tempoh yang singkat bagi menghasilkan gelombang pada frekuensi rendah. Gelombang yang dihasilkan akan merambat ke dalam struktur dan kemudian dipantulkan apabila terdapat kecacatan pada struktur atau sempadan luar [18].

### 3.0 PENENTUAN NILAI KEKUKUHAN

Mengikut teori perambatan gelombang, nilai kekukuhan atau modulus ricih maksimum bahan bagi terikan di bawah 0.0003% boleh ditentukan daripada halaju perambatan gelombang S atau gelombang ricih dengan :

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

Berdasarkan teori elastik yang dikemukakan oleh Yoder dan Wiczkak [19], modulus elastik sesuatu bahan boleh dijelmakan sebagai:

$$E = 2G(1 + \mu) = 2\rho V_s^2(1 + \mu) \quad (2)$$

di mana,  $G$  = modulus ricih,  $E$  = modulus elastik,  $\rho$  = ketumpatan,  $V_s$  = halaju gelombang S,  $\mu$  = nisbah Poisson.

### 4.0 KAEDAH UJIKAJI

#### 4.1 PiScan PROBE

PiScan Probe (Rajah 1a) terdiri daripada unit pengesan yang menggunakan meter pecutan sebagai pengesan perambatan gelombang manakala gelombang ini diwujudkan hasil daripada ketukan tukul (Rajah 1c) yang berfungsi sebagai penjana impuls. PiScan Probe ini dilengkapi dengan dua meter pecutan di mana jarak di antara dua meter pecutan ini boleh dilaraskan kepada 0.15 m dan 0.30 m serta terdapat pemberat di atas setiap meter pecutan itu. Fungsi pemberat ini adalah untuk memastikan sentuhan yang sempurna di antara meter pecutan dengan permukaan turapan [14]. Oleh sebab itu, sebarang gangguan dan sela masa daripada pengesan dapat dihapuskan. Joh *et al.* [14] menjelaskan bahawa walaupun meter pecutan yang terdapat pada PiScan Probe ini mempunyai kerangka khas, isyarat yang diukur hampir menyamai isyarat yang diukur oleh meter pecutan tanpa kerangka khas.

#### 4.2 POLCCA

POLCCA (Rajah 1b) berfungsi sebagai penganalisis spektrum yang menerima isyarat gelombang daripada PiScan Probe. Isyarat gelombang dalam bentuk amplitud dan masa perambatan gelombang yang dikesan oleh meter pecutan akan dirakam untuk operasi spektrum seterusnya. POLCCA terdiri daripada PiScan Analyzer (Rajah 1d) yang berfungsi sebagai penganalisis data yang dilengkapi dengan analisis isyarat dinamik (dynamic signal analyzer, DSA) atau analisis FFT. Penganalisis ini berupaya melaksanakan pengukuran ERS dan menganalisis data yang diukur secara automatik [14]. Selain itu, POLCCA juga dilengkapi dengan gandingan AC/DC, 4 saluran

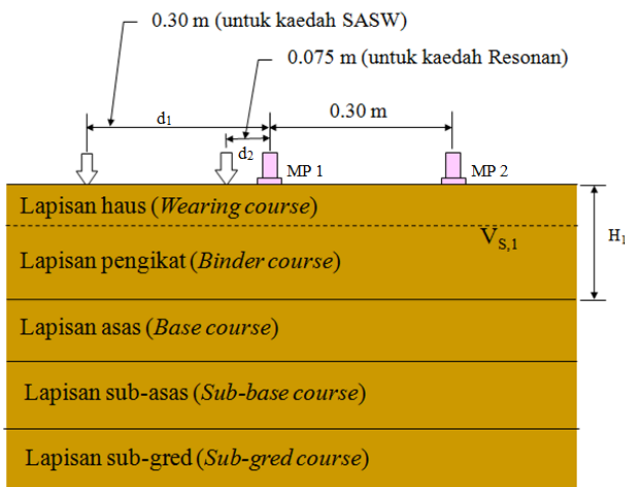
analog input, penapis anti-penyamaran dan pencetus analog.



Rajah 1 Sistem PiScanner. a) PiScanner Probe, b) POLCCA, c) Penukul, d) PiScan Analyzer

### 4.3 Konfigurasi Peralatan Kaedah ERS

Kaedah ERS adalah kombinasi di antara dua keadah iaitu kaedah SASW dan kaedah resonan. Oleh itu, terdapat dua kaedah atau cara susunan (Rajah 2) di antara meter pecutan (MP) dan penjana impuls. Bagi kaedah SASW, pengukuran isyarat gelombang melibatkan satu tukul dan dua meter pecutan. Jarak di antara MP 1 ke MP 2 adalah 0.3 m manakala jarak tukul dari MP 1 adalah bersamaan dengan jarak MP 1 ke MP 2 iaitu 0.3 m. Jarak di antara tukul dan MP 1 adalah mewakili kedalaman maksimum yang diandaikan. Kemudian, kaedah resonan pula melibatkan satu tukul dan satu meter pecutan di mana jarak di antara tukul ke MP 1 adalah 0.075m.



Rajah 2 Kaedah pengukuran ERS

### 4.4 Prosedur Penganalisan Menggunakan Kaedah ERS

Dalam menganalisis data lapangan, kaedah ERS melibatkan gabungan antara dua kaedah iaitu kaedah SASW dan kaedah resonan. Oleh yang demikian, kaedah ini mengandungi dua fasa utama dalam penganalisan data. Fasa pertama adalah fasa menentukan profil halaju gelombang ricih dengan menggunakan kaedah SASW dan fasa kedua yang melibatkan kaedah resonan bagi menentukan ketebalan lapisan permukaan berasfalt. Analisis gelombang permukaan akan dilakukan terlebih dahulu bagi mewujudkan graf halaju gelombang ricih melawan kedalaman dan kemudian ketebalan permukaan berasfalt yang lebih tepat akan diperoleh daripada analisis gelombang jasad. Perincian lebih lanjut mengenai prosedur dalam fasa-fasa terlibat ditunjukkan dalam Rajah 3.

#### Fasa Pertama: Penentuan Profil Halaju Gelombang

Menentukan nilai  $f_R$ : Frekuensi resonan bagi spektrum pecutan/anjakan pada penerima pertama

Menentukan nilai  $\theta_R$ : Sudut fasa bagi frekuensi resonan

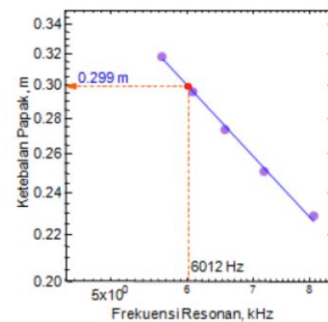
Menentukan nilai  $\lambda_R$ : Panjang gelombang frekuensi resonan adalah  $\lambda_R = 360^\circ/d/\theta_R$

Menentukan nilai  $V_s$ : Halaju gelombang S bagi papak konkrit oleh \*analisis penyongsangan dengan menganggap tebal papak,  $h = \lambda_R$

\*analisis penyongsangan bersama di antara  $V_s$  dan  $h$  adalah berdasarkan algoritma penyongsangan pelbagai

#### Fasa Kedua: Pencarian Resonan bagi Menentukan Ketebalan

Menentukan nilai  $h$ : Ketebalan papak konkrit dengan teknik **carian resonan** berdasarkan model perambatan gelombang untuk papak dengan ketebalan berbeza



Rajah 3 Prosedur kaedah ERS (diubahsuai daripada [14])



4.5 Lokasi Kajian

Lokasi kajian tertumpu pada struktur TBL di dalam kawasan Kampus Bangi Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Selangor yang dibahagikan kepada dua kawasan iaitu lingkungan pertama dan lingkungan kedua (Rajah 4). Di lingkungan pertama, sebanyak lapan lokasi dan di lingkungan kedua, sebanyak tujuh lokasi telah dikenalpasti bagi menjalankan pengukuran ini.



Rajah 4 Lokasi kajian di dalam lingkungan pertama (1-8) dan lingkungan kedua (9-15) kampus UKM

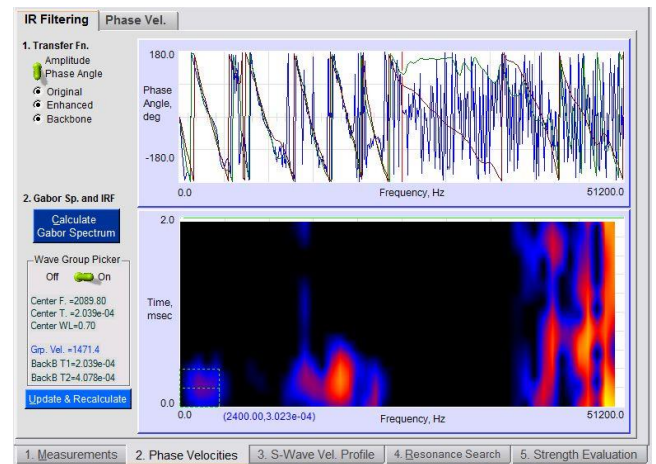
5.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

5.1 Analisis Data

Analisis yang terlibat dalam kaedah ini terbahagi kepada dua peringkat iaitu peringkat pertama yang melibatkan pencarian halaju fasa dan peringkat kedua adalah pencarian frekuensi resonan bagi mengetahui ketebalan lapisan permukaan berasfalt.

Dalam pencarian halaju fasa, analisis ini dimulai dengan penghasilan Spektrum Gabor (Rajah 5) daripada tindak balas impuls Spektrum Gabor terdiri daripada kelompok gelombang utama yang terhasil

akan digunakan dan frekuensi kelompok gelombang ini digunakan dalam proses penurasan sambutan denyutan (IR Filtering, IRF) bagi menghasilkan fasa spektrum tulang belakang (backbone) dan tertingkat (enhanced). Spektrum Gabor adalah spektrum yang memaparkan penumpuan tenaga yang dapat dihasilkan daripada perambatan kelompok-kelompok gelombang dan spektrum ini digunakan untuk memisahkan dengan jelas julat frekuensi perambatan kelompok-kelompok gelombang dalam mod tinggi dan rendah. Oleh itu, ketibaan kelompok gelombang pada lapisan turapan dan jenis komponen frekuensi yang dimiliki oleh kelompok gelombang dapat ditentukan.



Rajah 5 Spektrum Gabor

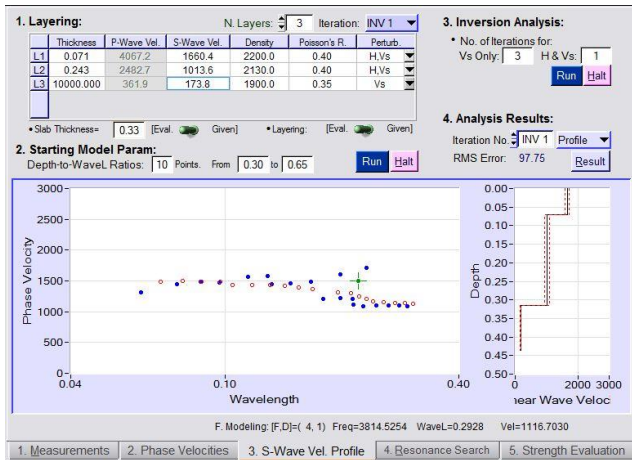
Kemudian, lengkung serakan (dispersion) bagi halaju fasa dihasilkan daripada spektrum tertingkat seperti dalam Rajah 6. Daripada lengkung serakan halaju fasa ini, halaju gelombang ricih dapat ditentukan selepas melalui analisis songsangan. Nilai parameter-parameter yang digunakan dalam analisis ini adalah seperti dalam Jadual 1.

Jadual 1 Nilai parameter yang digunakan dalam analisis

Lapisan	Ketumpatan	Nisbah Poisson
1	2200	0.40
2	2130	0.35
3	1900	0.33

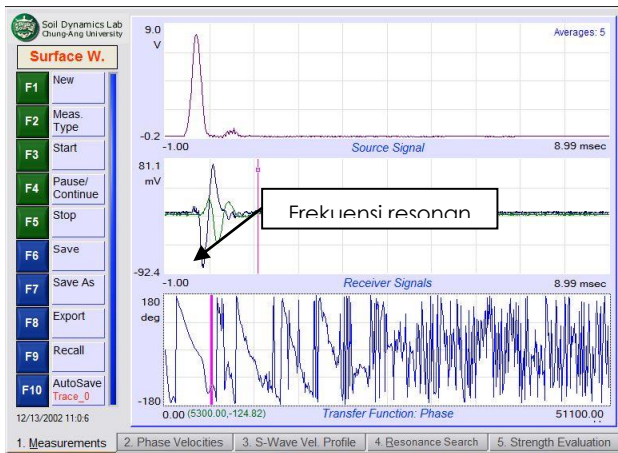
Selepas proses lapisan (layering), analisis songsangan dilakukan sekali lagi bagi menentukan ketebalan setiap lapisan turapan berdasarkan halaju gelombang ricih (gelombang S) dengan menganggap nilai ketebalan struktur laspisan turapan adalah bersamaan dengan panjang gelombang resonan. Analisis ini menggunakan lengkung serakan fasa halaju yang mempunyai nilai RMS paling rendah yang terhasil

daripada proses lapisan. Daripada Rajah 6, lengkung serakan secara teori dan ujikaji dapat dihasilkan.

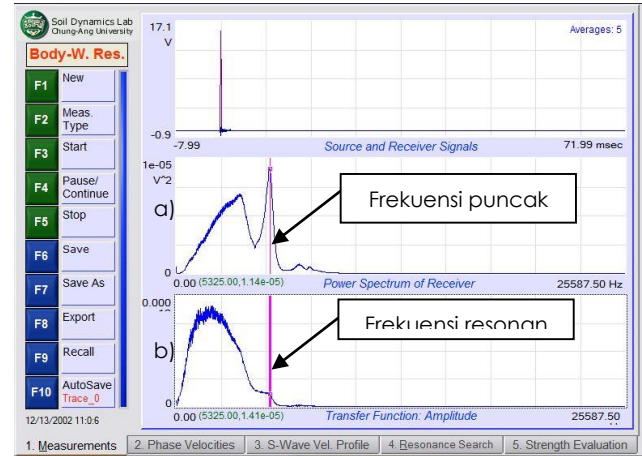


Rajah 6 Analisis songsangan

Bagi menentukan ketebalan turapan dengan lebih tepat, analisis kedua yang melibatkan pencarian resonan frekuensi dilakukan. Secara asasnya, teknik pencarian ini adalah bertujuan menentukan ketebalan struktur lapisan turapan jalan di mana frekuensi resonan pada ketebalan ini adalah sama dengan frekuensi resonan yang diukur. Analisis ini melibatkan pencarian frekuensi resonan daripada spektrum fasa pada fungsi pindahan (transfer function) yang dihasilkan oleh gelombang permukaan (Rajah 7). Frekuensi ini akan digunakan sebagai rujukan bagi pencarian frekuensi puncak daripada kuasa spektrum pada penerima pertama seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8a yang kemudian diguna pakai bagi menentukan frekuensi resonan yang dihasilkan oleh gelombang jasad (Rajah 8b).

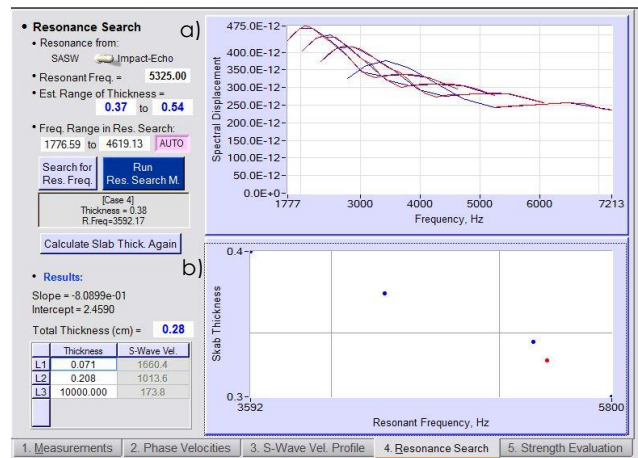


Rajah 7 Frekuensi resonan daripada spektrum fasa pada fungsi pindahan (transfer function)



Rajah 8 Frekuensi yang dihasilkan pada: a) Spektrum kuasa penerima, b) Fungsi pindahan

Seperti yang telah dijelaskan oleh Joh et al. [14], lengkung respon frekuensi terdiri daripada lebih 400 nilai frekuensi bagi mengenal pasti frekuensi resonan dan mengambil masa kira-kira 15 minit untuk penganalisisan. Algoritma khas telah diwujudkan bagi menganalisis frekuensi di mana ia terbahagi kepada dua analisis iaitu analisis sapuan kasar dan sapuan halus. Hasil analisis ini akan mewujudkan graf anjakan spektral bagi ketebalan andaian di mana garisan biru mewakili frekuensi pada sapuan kasar dan garisan merah mewakili frekuensi pada sapuan halus (Rajah 9a). Kemudian, graf ketebalan dan frekuensi yang sepadan diplot pada skala logaritma dan hubungan ini akan menghasilkan graf yang linear (Rajah 9b). Dengan menggunakan resonan frekuensi diwakili sebagai titik merah yang telah dikenal pasti di awal analisis ini, ketebalan struktur lapisan turapan dapat ditentukan.



Rajah 9 Analisis pencarian resonan frekuensi. a) Graf anjakan spektral spektrum bagi ketebalan andaian, b) Hubungan di antara ketebalan struktur lapisan dengan frekuensi resonan

## 5.2 Modulus Elastik Bahan

Daripada data isyarat yang diperoleh, lengkung serakan fasa halaju dapat diterbitkan di mana lengkung serakan ini akan melalui analisis songsangan bagi menghasilkan profil halaju gelombang ricih. Nilai modulus elastik bahan lapisan permukaan berasfalt dapat ditentukan dengan menggunakan nilai halaju gelombang ricih ini dengan menggunakan Persamaan 2. Jadual 2 menunjukkan nilai purata halaju gelombang ricih yang digunakan serta nilai purata modulus elastik bahan yang diperoleh dalam kajian ini. Penganggaran telah dilakukan terhadap nilai nisbah Poisson dan ketumpatan jisim di mana nisbah Poisson yang digunakan bagi bahan campuran berasfalt dan agregat adalah 0.40 [20], dengan berat unit bahan adalah 2200 kg/m<sup>3</sup> [21]. Padanan di antara lengkung serakan teori dan lengkung serakan ujikaji yang menghasilkan nilai ralat punca min kuasa dua (root-mean square, RMS) yang paling rendah digunakan ketika pemrosesan dan penganalisan data bagi mendapatkan nilai halaju gelombang ricih.

Dengan menggunakan data purata halaju gelombang ricih, nilai modulus elastik bahan permukaan berasfalt bagi kaedah ERS dapat ditentukan. Hasil pengiraan mendapati bahawa julat purata nilai modulus elastik bahan adalah 3928.877 hingga 17726.012 MPa dan dibandingkan dengan modulus elastik bahan mengikut piawaian. Didapati bahawa purata modulus elastik yang diperoleh melebihi daripada piawaian yang telah ditetapkan oleh Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd iaitu 2500-3200 MPa [22]. Hal ini berlaku kerana kualiti bahan yang digunakan pada setiap lokasi kajian boleh dianggap berbeza kerana perbezaan tahun pembinaannya.

Daripada pengamatan yang dilakukan, lokasi-lokasi kajian yang mencatatkan purata nilai modulus elastik yang tinggi disebabkan oleh pengaruh beban trafik dan umur pembinaan turapan [4]. Hal ini berlaku kerana beban trafik yang rendah bagi Jalan Bunga Raya, Jalan Wira (Kolej Keris Mas), Jalan Wira (Unit Pengangkutan UKM), Jalan Nik Ahmed Kamil dan Bangunan Lama FKAB manakala bagi Jalan Bangunan Baru FKAB pula adalah disebabkan oleh struktur turapan jalan ini baru dibina. Rosyidi [21] dan Rosyidi et al. [23] telah membuat kajian kekukuhan bagi struktur turapan yang baru dibina dan mendapati bahawa purata nilai modulus elastik pada jalan baru adalah tinggi. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa nilai modulus elastik bagi struktur turapan yang baru adalah lebih tinggi berbanding daripada struktur turapan lama di mana nilai modulus elastik yang tinggi mewakili nilai kekukuhan lapisan struktur turapan yang tinggi. Akan tetapi, mutu struktur turapan semakin menurun dengan peredaran masa dan kadar penurunannya bergantung kepada beban trafik, mutu bahan dan pengaruh alam sekitar.

**Jadual 2** Purata halaju gelombang ricih dan modulus elastik bahan

No.	Lokasi Kajian	Purata Halaju Gelombang Ricih, Vs (m/s)	Purata Modulus Elastik, E (MPa)
1	Jalan Gelanggang	1099.071	7705.032
2	Lebuhr Ilmu	767.788	3928.877
3	Jalan Bunga Raya	1394.263	12263.678
4	Jalan Syed Nasir	1224.650	9634.834
5	Lingkungan Johan	1065.338	8020.023
6	Jalan Wira (Kolej Keris Mas)	1615.607	16999.285
7	Jalan Wira (Unit Pengangkutan UKM)	1643.212	17726.012
8	Jalan Nik Ahmed Kamil	1460.126	13341.513
9	Jalan Temuan	897.858	5867.526
10	Dewan Tun Abdullah Mohd Salleh	1173.139	8927.070
11	Jalan Tun Ismail Ali (Pintu 3)	1567.664	15641.718
12	Jalan Tun Ismail Ali (FUU*)	846.050	4863.557
13	Bangunan baru FKAB**	1266.959	14719.172
14	Bangunan lama FKAB	1263.280	13435.592
15	Bangunan baru FST***	1160.235	8643.595

\*FUU = Fakulti Undang-Undang, \*\*FKAB = Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, \*\*\*FST = Fakulti Sains dan Teknologi

## 5.3 Ketebalan Lapisan Permukaan Berasfalt

Bagi ketebalan lapisan permukaan berasfalt yang sebenar, ia ditentukan melalui analisis permodelan perambatan gelombang yang memerlukan pencarian frekuensi resonan. Hasil ketebalan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan reka bentuk ketebalan yang telah ditetapkan oleh Jabatan Pembangunan dan Penyelenggaraan Universiti Kebangsaan Malaysia (JPP UKM) iaitu 0.100 m dan piawaian Jabatan Kerja Raya (JKR) Malaysia [24]. Jadual 3 menunjukkan perbandingan ketebalan lapisan permukaan berasfalt di antara purata ketebalan yang diperoleh dalam kajian ini dengan reka bentuk ketebalan JPP UKM.



**Jadual 3** Purata ketebalan lapisan permukaan berasfalt dan reka bentuk ketebalan JPP UKM

No	Lokasi Kajian	Lapisan Berasfalt (m)	Perbezaan (%)*
1	Jalan Gelanggang	0.05638	43.62
2	Lebuah Ilmu	0.04413	55.87
3	Jalan Bunga Raya	0.05681	43.19
4	Jalan Syed Nasir	0.05557	44.43
5	Lingkungan Johan	0.05020	49.80
6	Jalan Wira (Kolej Keris Mas)	0.04556	54.44
7	Jalan Wira (Unit Pengangkutan UKM)	0.07400	26.00
8	Jalan Nik Ahmed Kamil	0.06409	35.91
9	Jalan Temuan	0.04480	55.20
10	Dewan Tun Abdullah Mohd Salleh	0.05046	49.54
11	Jalan Tun Ismail Ali (Pintu 3)	0.06062	39.38
12	Jalan Tun Ismail Ali (FUU)	0.05786	42.14
13	Bangunan baru FKAB	0.04940	50.60
14	Bangunan lama FKAB	0.05467	45.33
15	Bangunan baru FST	0.04700	53.00

\*Perbezaan berbanding dengan reka bentuk JPP UKM iaitu 0.100 m.

Hasil ujikaji mendapati purata ketebalan lapisan permukaan berasfalt mempunyai julat ketebalan di antara 0.04 hingga 0.08 m. Sementara itu, ketebalan lapisan permukaan berasfalt yang ditetapkan oleh piawaian JKR terbahagi kepada dua lapisan iaitu lapisan haus dengan julat 0.04 hingga 0.05 m dan lapisan pengikat dengan julat ketebalannya adalah 0.04 hingga 0.10 m. Dengan mengambil kira dua lapisan (lapisan penghaus dan lapisan pengikat) ini sebagai satu lapisan permukaan berasfalt, julat yang diperoleh adalah di antara 0.04 hingga 0.15 m [23].

Selain itu, perbandingan di antara purata ketebalan ujikaji dengan reka bentuk ketebalan JPP UKM menunjukkan julat nisbah perbezaan pada 20 hingga 60 % di mana nilai nisbah perbezaan paling rendah dicatatkan oleh Jalan Wira (Unit Pengangkutan UKM) dengan 26 % manakala nilai nisbah paling tinggi adalah Jalan Ilmu adalah 55.87 % dengan purata ketebalan lapisan permukaan berasfalt 0.04413 m. Kajian SASW dan lubang gerudi telah dilakukan oleh Rosyidi [21] pada Jalan Ilmu ini dan mendapati bahawa nilai purata ketebalan lapisan permukaan berasfalt adalah 0.059 m bagi ujikaji SASW manakala 0.0666 m bagi ujikaji lubang gerudi. Perbezaan ketebalan lapisan permukaan ini adalah mungkin disebabkan oleh faktor penuaan dan perbezaan kelompok gelombang yang dapat dikesan pada

spektrum gabor ketika penurasan IR dijalankan [21]. Hal ini kerana, pengalaman dalam menganalisis spektrum data gelombang diperlukan bagi membantu proses penurasan untuk memperolehi nilai ketebalan yang lebih tepat [14]. Juga, berdasarkan kajian oleh Rosyidi [21], dapatlah diandaikan bahawa jalan-jalan yang ada di dalam kawasan kampus ini mungkin tidak dibina mengikut spesifikasi yang telah ditetapkan. Lapisan turapan permukaan berasfalt yang dibina mungkin hanya melibatkan satu lapisan sahaja, iaitu sama ada lapisan penghaus atau lapisan pengikat. Namun, daripada kajian ini dapat dirumuskan bahawa purata ketebalan lapisan berasfalt masih di dalam julat piawaian JKR Malaysia yang dibenarkan serta menghampiri reka bentuk ketebalan JPP UKM.

Melalui kajian yang telah dilaksanakan, didapati bahawa sentuhan di antara pengesan dengan permukaan turapan jalan mempengaruhi pengesanan isyarat yang dapat dirakam oleh penganalisis spektrum. Lapisan permukaan berasfalt mempunyai julat ketebalan yang nipis dan punca yang berfrekuensi tinggi digunakan bagi mengesan lapisan ini. Oleh itu, tetapan rentang frekuensi yang betul penting bagi memastikan punca fana dapat dirakam. Selain itu, pemilihan kelompok gelombang mempengaruhi bentuk lengkung serakan halaju fasa, meskipun demikian kesukaran dalam menentukan kelompok gelombang yang betul menyukarkan penganalisisan dilakukan. Hasil kajian membuktikan keberkesanan teknik ERS dalam menentukan ketebalan lapisan permukaan jalan dan mengukur halaju gelombang ricih bagi menentukan nilai modulus elastik bahan pada lapisan ini.

## 5.0 KESIMPULAN

Julat nilai modulus elastik bahan turapan permukaan berasfalt yang dihasilkan dalam kajian ini ialah 3928.877 hingga 17726.012 MPa adalah lebih besar berbanding julat modulus elastik yang ditetapkan oleh Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd. Purata ketebalan lapisan permukaan berasfalt yang diukur melalui kaedah ERS memberikan julat ketebalan 0.04 hingga 0.08 m dan julat ini masih berada dalam zon julat piawaian JKR iaitu 0.04 hingga 0.15 m. Selain itu, nisbah perbezaan ketebalan lapisan permukaan ujikaji dengan reka bentuk ketebalan yang telah ditetapkan oleh JPP UKM tidak melebihi 60 %. Hasil kajian yang dijalankan mendapati bahawa kaedah ERS ini dapat mengukur nilai kekukuhan bahan serta ketebalan lapisan permukaan berasfalt berpandukan piawaian yang telah ditetapkan. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahawa kaedah ERS dengan menggunakan PiScanner berupaya menentukan kekukuhan dan ketebalan bagi TBL.



## Penghargaan

Penulis merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM). Penyelidikan ini dibiayai oleh geran-geran penyelidikan GGPM-2012-079 dan GUP-2013-014.

## Rujukan

- [1] El-Badawy, S. M. 2012. Recommended Changes to Designs Not Meeting Criteria Using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 5(1): 54-61.
- [2] Ullidtz, P. 1987. *Pavement Analysis*. Amsterdam: Elsevier Science.
- [3] Huang, Y. H. 1993. *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [4] Hamzah, M. O., Hasan, A. & Karim, M. R. 1992. *Reka Bentuk Jalan Raya Untuk Jurutera*. Kuala Lumpur: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- [5] Giannopoulos, A., & Diamanti, N. 2004. A Numerical Investigation into the Accuracy of Determining Dielectric Properties and Thicknesses of Pavement Layers Using Reflection Amplitude GPR Data. In *Ground Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proceedings of the Tenth International Conference on IEEE*. 655-658.
- [6] Nilsson, R. N. 1999. A Viscoelastic Approach to Flexible Pavement Design. Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [7] Bianchini, A. 2007. Prediction of Pavement Performance Through Neuro-fuzzy Reasoning. New Mexico State University.
- [8] Shanin, M. Y. 1994. *Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots*. New York: Chapman & Hall.
- [9] Aouad, M. F., Stokoe, K. H. II., & Röesset, J. M. 1993. Evaluation of Flexible Pavements and Subgrades Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) method. Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin.
- [10] Burak Goktepe, A., Agar, E., & Hilmi Lav, A. 2006. Advances in Backcalculating the Mechanical Properties of Flexible Pavements. *Advances in Engineering Software*. 37(7): 421-431.
- [11] Nazarian, S., Abdallah, I. N., & Yuan, D. 2004). Neural Networks for Rapid Reduction Interpretation of Spectral Analysis of Surface Waves Results. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1868(-1): 150-155.
- [12] Gucunski, N. & Woods, R. D. 1992. Numerical Simulation of the SASW Test. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. 11: 213-227.
- [13] Cho, N. J., Joh, S. H., & Kwon, S. A. 2007. Nondestructive in-Place Strength Profiling of Concrete Pavements by Research Search Technique. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D. C.
- [14] Joh, S. H., Kang, T. H., Cho, M. R., Kwon, S. A. & Nam, J. H. 2008. Pavement-integrity Scanner for Characterization of Modulus Contrast Between Near-Surface Material and Deeper Material of Concrete Layer in Pavement Systems. 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D. C.
- [15] Ganji, V., Gucunski, N., & Nazarian, S. 1998. Automated Inversion Procedure for Spectral Analysis of Surface waves. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental*. 124(8): 757-770.
- [16] Bath, M. 1974. *Spectral Analysis In Geophysics*. Amsterdam: Elsevier Science.
- [17] Nolet, G. & Panza, G. F. 1976. Array Analysis of Seismic Surface Waves: Limits and Possibilities. *Pure and Applied Geophysics*. 114(5): 775-790
- [18] Sansalone, M. 1997. Impact-echo: The Complete Story. *ACI Structural Journal*. (94): 777-786.
- [19] Yoder, E. J. & Witczak, M. W. 1975. *Principles of Pavement Design*. New York: John Wiley & Son, Inc.
- [20] Abdullah, M. A. & Azmi, A. no date. Introduction to Pavement Evaluation and Design. Slide. Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd.
- [21] Rosyidi, S.A. 2004. Penilaian Kekukuhan Dinamik Bahan Lapisan Turapan Menggunakan Kaedah SASW. Tesis Sarjana Sains. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- [22] Abdullah, M. N. & Azmi, A. t.t. Introduction to Pavement Evaluation and Design. Kumpulan IKRAM Sdn. Bhd.
- [23] Rosyidi, S. A., Nayan, K. A. M., Taha, M. R. & Mustafa, M. M. 2002. Pengukurab Sifat Dinamik Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (SASW). *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi V*, hlm 1-12.
- [24] Jabatan Kerja Raya. 1985. *Manual on Pavement Design*. Arahan Teknik (Jalan) 5/85. Cawangan Jalan, Ibu Pejabat JKR, Kuala Lumpur.