

Integrasi Kaedah Geofizik untuk Pengesanan Rongga menggunakan Model Plot Silang 2-D

(Integration of Geophysical Methods for Cavity Detection using 2-D Cross Plot Models)

NURUL ASIKIN MOHD ARAHA¹, MUHAMMAD TAQUIDDIN ZAKARIA^{1*}, NOORZAMZARINA SULAIMAN²,
MUHAMMAD FAWZY ISMULLAH MASSINAI^{1,3} & NUR IRDINA INSYIRAAH MOHD SALWIRA¹

¹*Program Geologi, Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia*

²*Jabatan Geosains, Fakulti Sains Bumi, Universiti Malaysia Kelantan Kampus Jeli, 17600 Jeli, Kelantan, Malaysia*

³*Jabatan Geofizik, Fakulti Matematik dan Sains Semula Jadi, Universiti Hasanuddin, Makassar 90245, Indonesia*

Diserahkan: 9 Disember 2025/Diterima: 30 April 2026

ABSTRAK

Rongga ialah ruang kosong di bawah permukaan yang boleh terbentuk melalui proses semula jadi atau aktiviti manusia. Fenomena ini sering berlaku apabila air bawah tanah melarutkan batuan yang mudah larut, sekali gus menimbulkan risiko terhadap infrastruktur dan harta benda. Rongga lazim ditemui dalam formasi karbonat dan evaporit seperti batu kapur dan gipsum. Untuk meneliti ciri rongga dengan lebih terperinci, kaedah Tomografi Keberintangan Geoelektrik (ERT) dan Tomografi Pembiasan Seismos (SRT) digunakan. Memandangkan setiap kaedah mempunyai kekangan jika ditafsir secara berasingan, teknik plot silang 2-D diterapkan bagi meningkatkan ketepatan interpretasi bawah permukaan. Teknik ini memaparkan hubungan antara keberintangan dan halaju seismos, sekali gus memudahkan pengesanan anomali. Kajian dijalankan di Kompleks Gua, Dabong, Kelantan dengan objektif mengintegrasikan model ERT dan SRT bagi mengesan rongga melalui model plot silang 2-D. Data diperolehi melalui empat garisan tinjauan selari. Model yang dihasilkan menunjukkan korelasi jelas antara keberintangan $\geq 170 \Omega\text{m}$ dan halaju gelombang-P $< 1500 \text{ m/s}$ hingga kedalaman sekitar 2-3 m. Secara keseluruhannya, model plot silang 2-D bersepadu ini berkesan dalam mengesan rongga serta meningkatkan resolusi bawah permukaan, seterusnya membolehkan struktur geologi digariskan dengan lebih tepat. Pendekatan ini turut menyumbang kepada pemahaman bawah permukaan, termasuk pengenalanpastian jenis batuan, zon tepu air, zon kelemahan dan pengisian rongga, selain menyokong usaha mitigasi geobencana.

Kata kunci: Geobencana; model plot silang 2-D; rongga; tomografi keberintangan geoelektrik; tomografi pembiasan seismos

ABSTRACT

A cavity or void is an open subsurface space formed by natural processes or human activities. These features often develop when groundwater dissolves soluble rocks, creating potential risks to infrastructure and property. Cavities are commonly found in carbonate and evaporite formations such as limestone and gypsum. To investigate cavity characteristics, Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Seismic Refraction Tomography (SRT) were used. Since each method has limitations when interpreted separately, a 2-D cross plot technique was introduced to improve subsurface interpretation. This approach visually relates resistivity and seismic velocity, allowing anomalies to be identified more clearly. The study was conducted at Kompleks Gua, Kelantan, with the objective of integrating ERT and SRT for cavity detection using a 2-D cross plot model. Data acquisition was completed along four inline survey lines. The resulting model showed a clear correlation between resistivity and P-wave velocity, enabling cavities to be outlined. Cavities were indicated by resistivity values $\geq 170 \Omega\text{m}$ and P-wave velocities $< 1500 \text{ m/s}$, extending to depths of about 2-3 m. Overall, the integrated 2-D cross plot model effectively detected cavities and enhanced subsurface resolution, allowing more precise delineation of geological structures. This approach also provides useful insights for characterizing subsurface conditions, including identifying rock types, saturated zones, weakness zones and cavity infills, as well as supporting geohazard mitigation efforts.

Keywords: Cavity; electrical resistivity tomography; geohazard; seismic refraction tomography; 2-D cross plot model

PENDAHULUAN

Kewujudan rongga di bawah permukaan boleh berpunca daripada proses geologi semula jadi atau daripada aktiviti

antropogenik (Daniels 1988). Rongga semula jadi seperti gua, lubang benam atau formasi kars biasanya terhasil daripada pelarutan batu kapur oleh air bawah tanah

(Baghzendani, Aghajani & Karami 2024), manakala rongga buatan manusia berlaku akibat aktiviti manusia seperti terowong, perlombongan atau penggalian (Metwaly et al. 2024). Dalam geobencana, rongga boleh menyebabkan masalah seperti keruntuhan permukaan dan bencana alam. Rongga bawah permukaan dianggap sebagai geobencana utama, terutamanya di kawasan yang mempunyai batuan karbonat. Beberapa kajian melaporkan kesan negatif lubang benam termasuk keruntuhan struktur dan penurunan jalan (Abd El Aal 2017; Abdelrahman, Saadon & Qaysi 2024; Al-Adly 2025; Alarifi 2025; Hasan et al. 2024; Onyango et al. 2025). Dalam konteks geofizik, pengesanan rongga bawah permukaan adalah penting kerana mempengaruhi kestabilan tanah serta keselamatan infrastruktur dan bangunan. Pengenalpastian rongga yang tepat amat penting dalam pembinaan, perlombongan dan kejuruteraan alam sekitar untuk mencegah keruntuhan tanah dan penurunan permukaan.

Kaedah geofizik seperti keberintangan geoelektrik dan pembiasan seismos dikatakan berkesan untuk mengenal pasti rongga bawah permukaan. Kaedah keberintangan geoelektrik menggunakan arus elektrik untuk memetakan struktur bawah permukaan dengan mengukur tindak balas elektrik tanah (Abdelrahman et al. 2023; Alzahrani, Abdelrahman & Hazaea 2022), manakala kaedah pembiasan seismos mentafsir data gelombang seismos yang dibias untuk mengenal pasti variasi halaju gelombang-P merentasi lapisan bawah permukaan (Sahoo et al. 2024).

Kajian sebelum ini menunjukkan kaedah geofizik boleh memberikan imej terperinci bawah permukaan tanpa mengganggu atau mencemarkan permukaan tanah (Daud et al. 2025; Ishak et al. 2022; Yu et al. 2025). Oleh itu, kajian ini menggabungkan data keberintangan geoelektrik dan pembiasan seismos untuk membangunkan model plot silang 2-D (Hayashi & Konishi 2012; Zakaria et al. 2024) yang membolehkan pengesanan had kaedah masing-masing dan meningkatkan resolusi imej bawah permukaan. Pendekatan gabungan ini memudahkan pengesanan ciri permukaan seperti formasi batuan dan zon lemah serta meningkatkan pengesanan dan pencirian rongga. Rongga bawah permukaan merupakan penyumbang utama geobencana seperti penurunan tanah dan pembentukan lubang benam yang boleh menjejaskan infrastruktur dan keselamatan manusia (Gutiérrez 2016). Oleh itu, pemetaan struktur bawah permukaan yang tepat dan cekap adalah penting untuk mengenal pasti dan menilai kawasan berisiko. Walau bagaimanapun, pengesanan dan pencirian rongga mencabar kerana sifat geologi bawah permukaan yang kompleks dan pelbagai, menekankan keperluan pendekatan geofizik yang boleh dipercayai dan beresolusi tinggi.

Dalam konteks ini, ERT dan SRT digunakan secara komplementari untuk mengatasi keterbatasan penggunaan satu kaedah sahaja. Integrasi ERT dan SRT memberikan pemahaman lebih menyeluruh mengenai keadaan bawah permukaan dengan menghubungkan

variasi keberintangan dengan anomali halaju seismos, sekali gus meningkatkan ketepatan pengesanan rongga dan tafsiran geologi. Kajian ini juga menumpukan kepada pengesanan zon rongga berpotensi serta menghubungkan hasil keberintangan dengan halaju seismos. Objektif utama adalah menghasilkan imej bawah permukaan beresolusi tinggi melalui integrasi data geofizik dan mengesan rongga berpotensi menggunakan model plot silang 2-D sebagai sebahagian daripada rangka mitigasi geobencana.

Fasa awal kajian melibatkan ulasan kepustakaan dan pembangunan model matematik konsep serta model ujian awal sebelum pemerolehan data lapangan. Selepas pengumpulan data, set data geofizik diproses dan dimodelkan secara menyeluruh, termasuk pengurangan data, penapisan isyarat, penilaian kualitatif dan tafsiran untuk meningkatkan pemahaman tentang keadaan bawah permukaan. Matlamat utama kajian ini ialah mengintegrasikan teknik inversi geofizik bagi persekitaran bawah permukaan yang heterogen menggunakan model plot silang 2-D. Kawasan kajian, Kompleks Gua, Dabong, Kelantan dipilih berdasarkan kehadiran rongga permukaan yang menunjukkan kemungkinan ruang kosong bawah permukaan (Rajah 1(a)). Kompleks Gua, Dabong, Kelantan merupakan kawasan gua batu kapur yang terbentuk terutamanya melalui proses geologi semula jadi. Pembentukan gua di kawasan ini berkait rapat dengan kehadiran batuan karbonat seperti batu kapur yang mudah mengalami pelarutan kimia. Air hujan yang bercampur dengan karbon dioksida di atmosfera akan membentuk asid karbonik lemah.

Apabila air ini meresap melalui rekahan dan liang dalam batu kapur, ia secara beransur-ansur melarutkan mineral kalsium karbonat dan membesarkan rekahan tersebut sehingga membentuk rongga dan laluan gua. Formasi bagi kawasan ini adalah Formasi Gua Musang, yang didominasi batu kapur, litologi yang biasa dikaitkan dengan pembangunan kars. Kawasan ini menunjukkan potensi tinggi bagi pembentukan rongga bawah permukaan berdasarkan pemeriksaan permukaan terdahulu. Kajian ini dijangka menjadi rujukan penting bagi penyelidikan bawah permukaan pada masa hadapan, khususnya dalam mengenal pasti zon berisiko tinggi terhadap pembentukan rongga, sekali gus menyokong perancangan mitigasi awal serta pengurusan penggunaan tanah secara lestari. Walau bagaimanapun, beberapa kajian terdahulu yang menggunakan kaedah keberintangan geoelektrik dan pembiasan seismos secara berasingan menunjukkan beberapa kekangan dalam pengesanan rongga bawah permukaan. Kaedah keberintangan geoelektrik, sebagai contoh, sangat sensitif terhadap variasi kandungan lembapan tanah, heterogeniti litologi serta kehadiran bahan pengisi dalam rongga yang boleh menyebabkan tafsiran anomali menjadi kurang jelas. Sementara itu, kaedah seismos pula dipengaruhi oleh perubahan ketumpatan dan kekompakan bahan bawah permukaan yang kadangkala menyukarkan pembezaan antara rongga kosong dan zon batuan terluluhawa atau sedimen longgar. Oleh itu,

pendekatan integrasi antara kedua-dua kaedah geofizik ini dilihat mampu mengurangkan ketidakpastian interpretasi serta meningkatkan kebolehpercayaan dalam mengenal pasti zon lemah atau kawasan berpotensi mengandungi rongga di bawah permukaan.

KAJIAN TERDAHULU

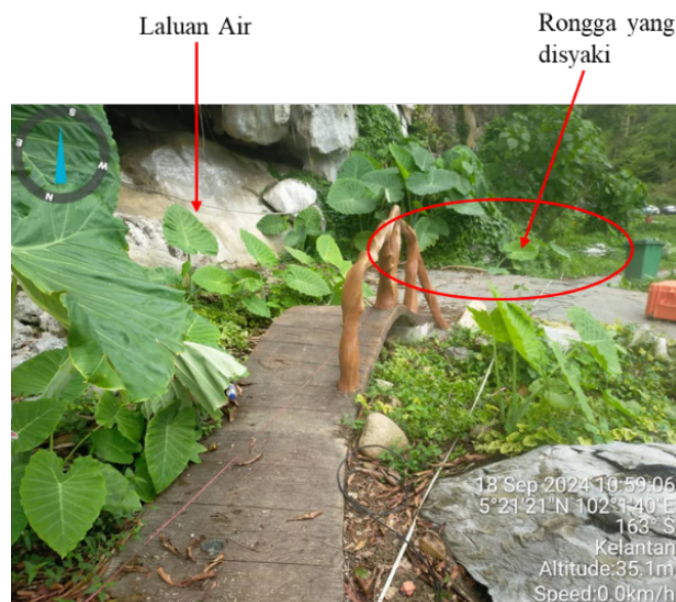
Kajian geofizik bawah permukaan semakin banyak digunakan dengan menggabungkan kaedah keberintangan geoelektrik (ERT) dan pembiasan seismos (SRT) berikutan keupayaannya dalam memberikan maklumat yang tepat dan jelas serta saling melengkapi. Setiap kaedah mempunyai kelebihan tersendiri, namun apabila digabungkan, mampu mengurangkan ketidakpastian tafsiran serta meningkatkan ketepatan imej bawah permukaan. ERT berfungsi mengukur keberintangan bahan berdasarkan pergerakan arus elektrik, manakala SRT menentukan halaju perambatan gelombang seismos untuk menilai kedalaman serta ciri lapisan geologi. Integrasi kedua-dua teknik ini membolehkan interpretasi yang lebih menyeluruh kerana variasi keberintangan dan halaju memberikan petunjuk berbeza terhadap keadaan geologi.

Carollo, Capizzi dan Martorana (2020) membuktikan keberkesanan gabungan ERT dan SRT melalui penggunaan susunan sensor yang sama serta analisis kelompok tidak hierarki. Kajian mereka menunjukkan bahawa integrasi ini menghasilkan imej bawah permukaan yang lebih jelas dan dapat mendedahkan variasi litologi dengan lebih terperinci. Hasil tersebut amat berguna dalam persekitaran kompleks seperti kawasan batu kapur yang mempunyai struktur heterogen. Walau bagaimanapun, kajian ini juga menunjukkan bahawa ERT mempunyai cabaran yang

membezakan rongga daripada jisim kalkarenit, manakala SRT pula terhad dalam menggambarkan geometri struktur dengan tepat. Penemuan oleh Ukorebi Asuquo et al. (2024) turut menyokong keberkesanan integrasi kedua-dua kaedah ini. Mereka mendapati terdapat korelasi yang kuat antara parameter geofizik daripada data ERT dan SRT, sekaligus meningkatkan keyakinan dalam proses interpretasi. Gabungan ini terbukti daripada mengenal pasti rongga dengan lebih tepat berbanding penggunaan satu kaedah sahaja, terutama bagi ciri bawah permukaan yang sukar dikesan.

Akingboye dan Ogunyeye (2019) pula menegaskan bahawa ERT dan SRT menawarkan kelebihan besar berbanding kaedah tradisi melalui pemerolehan data yang lebih pantas, liputan luas dan imej resolusi tinggi. Namun begitu, kualiti data boleh dipengaruhi oleh faktor seperti jarak elektrod dalam ERT dan kadar perambatan tenaga seismos dalam SRT. Cardarelli et al. (2010) juga mengesahkan keberkesanan integrasi ERT-SRT dalam mengesan rongga melalui data sintetik dan sebenar. Walaupun begitu, mereka menjelaskan bahawa rongga berisi udara menyebabkan perbezaan ketara antara kedua-dua kaedah yang mana ERT menunjukkan keberintangan tinggi manakala SRT mencatat halaju rendah tanpa hubungan langsung yang boleh digunakan untuk tujuan pengesanan. Capizzi et al. (2017) pula menekankan kepentingan pendekatan statistik dalam mengurangkan ketidakpastian interpretasi, terutamanya melalui analisis kelompok pelbagai parameter geofizik.

Dalam bidang perlombongan, Bharti et al. (2022) menggunakan ERT untuk mengenal pasti tiang arang batu serta struktur seperti galeri dan goaf. Anomali keberintangan rendah dikenal pasti berkaitan dengan



RAJAH 1. (a) Rongga yang disyaki pada kawasan permukaan Kompleks Gua

kawasan galeri dan goaf, manakala nilai tinggi menunjukkan kewujudan tiang arang batu. Namun, ERT didapati tidak mampu membezakan rongga kering daripada rongga akibat pengeluaran arang batu. Kajian Doyoro, Chang dan Puntu (2021) pula menegaskan bahawa pemilihan susunan elektrod amat penting dalam pencitraan rongga kerana mempengaruhi sensitiviti dan resolusi imej. Secara keseluruhannya, kajian terdahulu menunjukkan bahawa integrasi ERT dan SRT merupakan pendekatan paling berkesan untuk meningkatkan ketepatan interpretasi geofizik bawah permukaan, terutamanya di kawasan kompleks seperti batu kapur dan formasi kars. Walaupun masing-masing mempunyai kekangan tersendiri, gabungan ini memberikan maklumat yang lebih komprehensif, meningkatkan resolusi model dan mengurangkan ketidakpastian udara secara signifikan.

BAHAN DAN KAEDAH KAJIAN

KAWASAN KAJIAN

Kawasan kajian terletak di Kompleks Gua, Dabong, Kelantan pada koordinat 5.3768° U dan 102.0098° T. Kompleks Gua merupakan sebahagian daripada Formasi Gua Musang, iaitu satu unit geologi yang berusia dari zaman Perm hingga Kuartar. Formasi ini terdiri daripada batu kapur yang telah mengalami metamorfisme, syal berlapis dengan kandungan lempungan serta endapan aluvium. Ciri morfologi kars yang ketara di kawasan

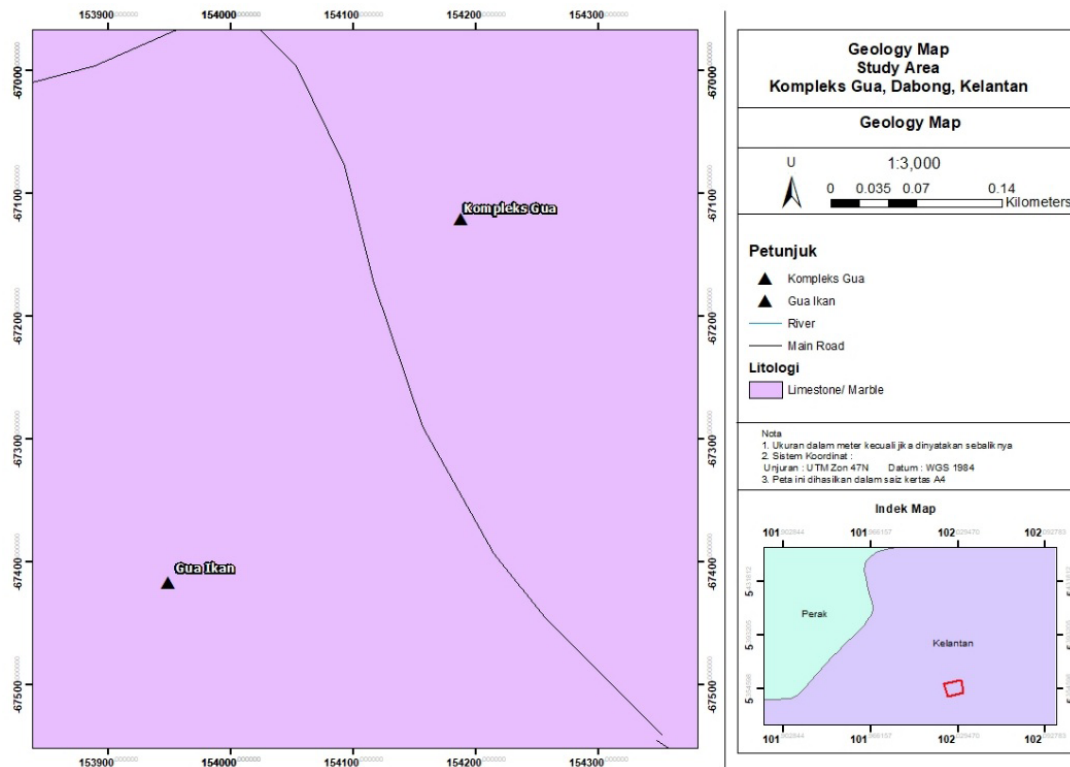
ini termasuk pembentukan stalaktit, stalagmit dan tiang gua (Mansor et al. 2024). Batu kapur di Kompleks Gua lazimnya berwarna kelabu cerah dan mengandungi mineral kalsit, menandakan bahawa kawasan tersebut telah melalui proses metamorfisme.

Kawasan ini dikelilingi gua batu kapur yang menghimpunkan Gua Pagar, Gua Gelap dan Gua Keris. Saluran air yang keluar dari Gua Gelap (Rajah 1(a)) boleh menyebabkan kemungkinan mengandungi rongga di kawasan Kompleks Gua. Selain kepentingan geologinya, Kompleks Gua turut berkembang sebagai destinasi pelancongan berikutan usaha pembangunan dan pengurusan kawasan sekitarnya untuk aktiviti rekreasi dan pelancongan. Memandangkan kewujudan rongga bawah tanah boleh menimbulkan risiko dari sudut keselamatan dan kestabilan tanah, kajian geofizik telah dijalankan bagi menilai keadaan bawah permukaan kawasan tersebut (Rajah 1(b)). Dalam kajian ini, kaedah ERT dan SRT telah dilaksanakan sepanjang garis tinjauan yang ditetapkan di Kompleks Gua (Rajah 1(c)) untuk tujuan pengesanan dan pencirian potensi rongga.

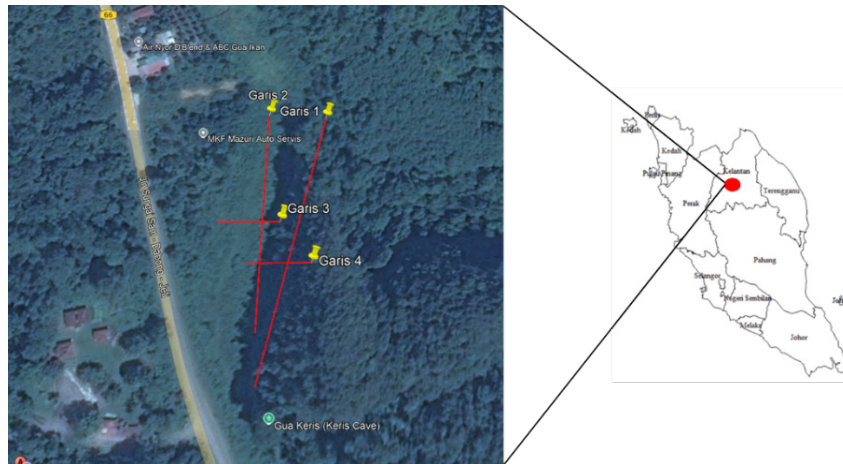
KAEDAH

KEBERINTANGAN GEOELEKTRIK

Kaedah keberintangan geoelektrik merupakan salah satu teknik geofizik yang paling meluas digunakan bagi tujuan pengimejan bawah permukaan berdasarkan nilai



RAJAH 1. (b) Peta geologi kawasan kajian



RAJAH 1. (c) Garis Survei kawasan kajian bagi ERT dan SRT

keberintangan geoelektrik (Guinea et al. 2025). Prinsip asas kaedah ini bergantung kepada variasi nilai keberintangan yang dipengaruhi oleh jenis litologi, kandungan lembapan serta kehadiran ruang kosong atau rongga di bawah permukaan (Bharti et al. 2022, 2021, 2016a, 2016b; Das & Mohanty 2016; Martínez-Moreno et al. 2013; Singh et al. 2019; Srivastava, Pal & Kumar 2020). Kajian terdahulu turut menunjukkan bahawa kaedah ini sangat berkesan dalam mengenal pasti rongga berisi udara atau air kerana ciri tersebut lazimnya menghasilkan kontras keberintangan yang tinggi berbanding bahan geologi di sekelilingnya (Razmi et al. 2024).

Bagi tinjauan ERT, empat garisan tinjauan (LR1-LR4) telah ditetapkan dengan panjang bagi garis 1 (200 m), garis 2 (150 m) dan garis 3 dan garis 4 adalah 40 m. Pengumpulan data dilakukan menggunakan sistem ABEM Terrameter LS 1 dengan jarak elektrod 1 m (garis 3 dan garis 4), 2 m (garis 2) dan 5 m (garis 1) serta menggunakan konfigurasi susunan Wenner-Schlumberger. Pemilihan jarak elektrod dan panjang garisan tinjauan dibuat berdasarkan objektif kajian serta kesesuaian keadaan lapangan. Pertimbangan teliti terhadap konfigurasi susunan semasa pengambilan data adalah penting kerana mempengaruhi kedalaman kajian dan kualiti data yang diperolehi. Dalam kajian ini, susunan Wenner-Schlumberger dipilih kerana sesuai untuk memetakan ciri struktur bawah permukaan secara menegak dan mengufuk. Susunan ini sangat berkesan dalam menggambarkan sempadan geologi dan menawarkan keseimbangan antara kedalaman kajian dan resolusi imej. Selain itu juga, dianggap salah satu kaedah yang paling berkesan untuk mengesan zon tepu air atau air bawah tanah dalam sistem kars (Hermawan & Putra 2016). Data yang diperolehi telah diproses menggunakan perisian Res2Dinv yang menghasilkan model inversi keberintangan 2-D. Rajah 2(a) menunjukkan susun atur geometri bagi konfigurasi Wenner-Schlumberger dalam kajian keberintangan geoelektrik.

PEMBIASAN SEISMOS

Kaedah pembiasan seismos merupakan satu kaedah geofizik yang meluas digunakan untuk mengesan rongga bawah permukaan. Prinsip asas kaedah ini bergantung kepada analisis tingkah laku gelombang seismos apabila merambat melalui lapisan bawah permukaan yang berbeza. Apabila gelombang ini menemui rongga atau perubahan sifat bahan, ia akan mengalami pembiasan yang menghasilkan variasi kelajuan gelombang yang dapat dikesan (Brixová, Mosná & Putiška 2018). SRT pula memanfaatkan fenomena pembiasan gelombang seismos dalam lapisan geologi dan unit batuan untuk membina model kelajuan bawah permukaan yang lebih terperinci (Al-Heety & Shanshal 2016). Data yang diperolehi daripada tinjauan pembiasan seismos diproses menggunakan perisian khusus bagi menghasilkan model halaju gelombang-P. Gelombang-P bergerak selari dengan arah perambatannya dan merupakan hasil regangan memampatan sepusat (Alsamarraie 2020; Masson & Pride 2007). Oleh itu, gelombang-P sering digunakan dalam kajian pembiasan seismos cetek, terutamanya untuk mengenal pasti rongga, zon lemah dan anomali bawah permukaan yang lain.

Dalam kajian ini, empat garisan tinjauan SRT (LS1-LS4) telah dijalankan, masing-masing berukuran 23 m (garis 3 dan garis 4) dan 46 m (garis 1 dan garis 2) dengan jarak geofon 1 m dan 2 m. Rakaman gelombang seismos dilakukan menggunakan seismograf ABEM Terraloc. Semasa tinjauan, masa ketibaan gelombang terbias direkodkan dan teknik pelbagai susunan diaplikasikan bagi meningkatkan nisbah isyarat kepada hingar. Proses ini dilaksanakan dengan mengetuk penukul berulang kali bagi menjana tenaga seismos. Sebanyak tujuh titik tembakan diperolehi, menghasilkan taburan halaju yang padat. Daripada jumlah tersebut, lima merupakan titik tembakan sebaris, manakala dua titik tembakan lagi ditempatkan sebagai ofset positif dan negatif. Penggunaan tembakan ofset adalah penting dalam menentukan lapisan bawah permukaan terakhir dengan lebih tepat kerana

mempengaruhi kedalaman penetrasi gelombang. Data yang dikumpulkan kemudiannya diproses menggunakan perisian ZondST2D bagi menghasilkan model seismos.

MODEL PLOT SILANG 2-D

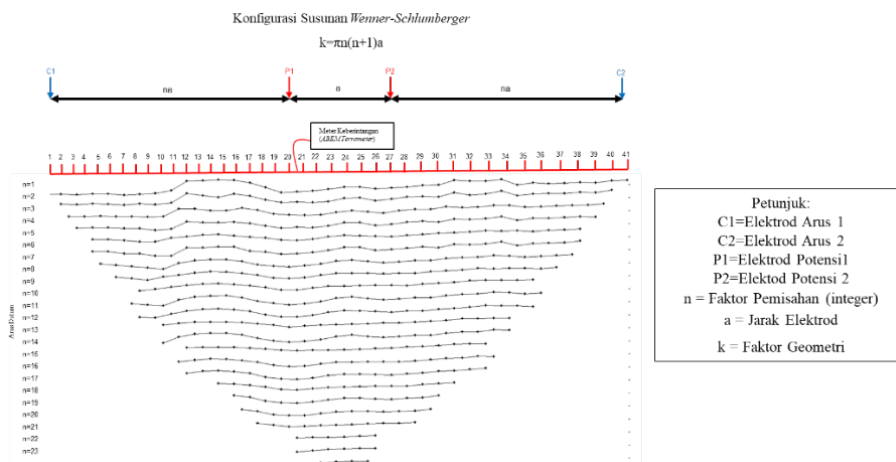
Berdasarkan integrasi kaedah ERT dan SRT, satu model analisis plot silang yang inovatif telah dibangunkan bagi meningkatkan kecekapan pencirian bawah permukaan. Model ini memanfaatkan sifat pelengkap antara data keberintangan dan halaju gelombang-P untuk mempertingkatkan resolusi serta ketepatan interpretasi geofizik. Analisis plot silang 2-D ini berfungsi sebagai pendekatan kuantitatif dengan bahan bawah permukaan dikelaskan berdasarkan respons keberintangan geoelektrik dan halaju gelombang-P. Rajah 2(b)) menunjukkan aliran kerja bagi menghasilkan model plot silang 2-D.

Secara umumnya, kedua-dua set data ERT dan SRT dieksport dalam format (.xyz) sebelum diproses menggunakan Microsoft Excel melalui tiga peringkat utama: Pembedulan geometri, analisis grafik dan titik datum serta pengelompokan. Pada peringkat pembedulan geometri, titik datum daripada setiap set data dijajarkan semula mengikut kedudukan x (jarak) dan y (kedalaman) yang sepadan bagi memastikan keseragaman spatial. Data yang telah dijajarkan kemudiannya melalui proses analisis grafik dan titik datum bagi menyingkirkan data yang tidak tekal atau menunjukkan sisihan ketara. Seterusnya, analisis pengelompokan dijalankan untuk mengelaskan data ke dalam kumpulan tertentu berdasarkan julat nilai kuadran yang diperoleh daripada plot taburan keberintangan-halaju.

Bagi mentafsirkan dataset bersepadu ini, satu rangka kerja berasaskan kuadran diperkenalkan melalui penetapan ambang nilai bagi kedua-dua parameter. Setiap titik data diplot dan dikelaskan ke dalam salah satu daripada empat kuadran (Q1-Q4). Sekali gus membolehkan variasi litologi serta zon anomali seperti rongga berpotensi, zon tepu

air atau lapisan lemah dikenal pasti. Integrasi ini secara signifikan meningkatkan kejelasan pemodelan bawah permukaan dengan mengurangkan keaburan yang sering timbul apabila satu kaedah digunakan secara tunggal (Akingboye 2025; Dick et al. 2024; Sujitapan et al. 2024; Zakaria et al. 2021). Rajah 2(c) memaparkan hubungan skematik antara nilai keberintangan dan halaju gelombang. Had kuadran ditentukan berdasarkan hasil analisis daripada kedua-dua kaedah ERT dan SRT. Semua data output bagi setiap kuadran dikumpulkan dalam fail (.xlsx) sebelum diplotkan semula ke dalam model 2-D menggunakan fungsi pasca-peta dalam perisian Surfer berdasarkan kedudukan x (jarak) dan y (kedalaman) setiap titik data.

Setiap kuadran mewakili kumpulan nilai keberintangan – halaju yang mencirikan sifat bahan bawah permukaan. Daripada empat kuadran tersebut, Q2 lazimnya dikaitkan dengan zon berpotensi mengandungi rongga. Kuadran ini dicirikan oleh nilai halaju yang rendah dan keberintangan yang tinggi iaitu gabungan yang sinonim dengan kehadiran ruang kosong atau bahan yang kurang termampat (Zakaria et al. 2024). Nilai halaju yang rendah biasanya menunjukkan tahap pemampatan yang rendah, selaras dengan prinsip modulus pukal yang menjelaskan hubungan linear antara halaju dan kedalaman dengan peningkatan kedalaman umumnya disertai peningkatan halaju akibat pemampatan dan ketumpatan bahan yang lebih tinggi (Zakaria et al. 2022). Walau bagaimanapun, pembentukan rongga turut dipengaruhi oleh variasi keberintangan dengan nilai keberintangan yang tinggi lazimnya menunjukkan keadaan batuan terlapuk. Ciri Q2 ini membolehkan pengenalpastian dan interpretasi zon rongga dibuat dengan lebih jelas. Oleh itu, pengesanan Q2 memainkan peranan penting dalam menghuraikan mekanisme asas yang menyumbang kepada pembentukan rongga di kawasan kajian. Rajah 3 menunjukkan analisis plot silang berdasarkan integrasi model ERT dan SRT yang melibatkan lima langkah utama dalam pembinaan model



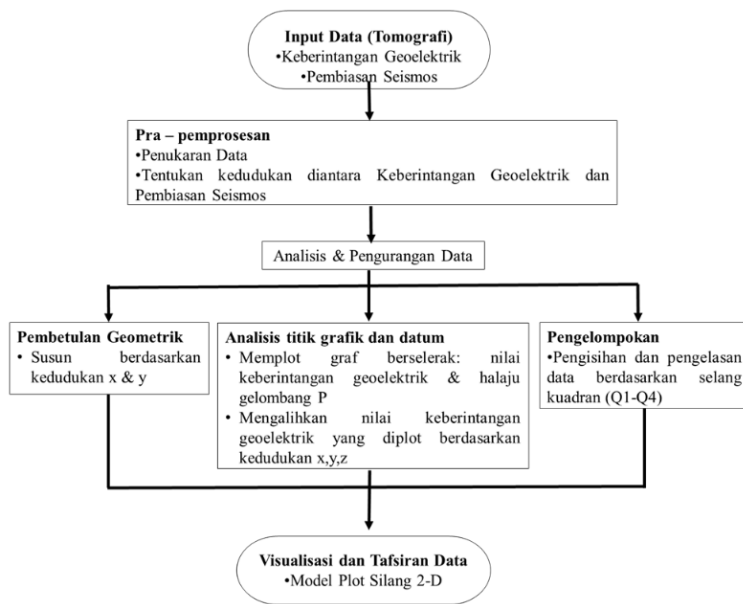
RAJAH 2. (a) Susun atur geometri susunan Wenner-Schlumberger bagi kaedah keberintangan geoelektrik (Diubah suai daripada Sanny, Asrib dan Insani 2023)

2-D iaitu: Rajah 3(a) model awal ERT dan SRT, Rajah 3(b) pertindihan titik datum kedua-dua kaedah, Rajah 3(c) plot silang titik datum selepas pembetulan geometri, Rajah 3(d) analisis grafik berdasarkan nilai ambang dan Rajah 3(e) contoh model akhir hasil plot silang 2-D.

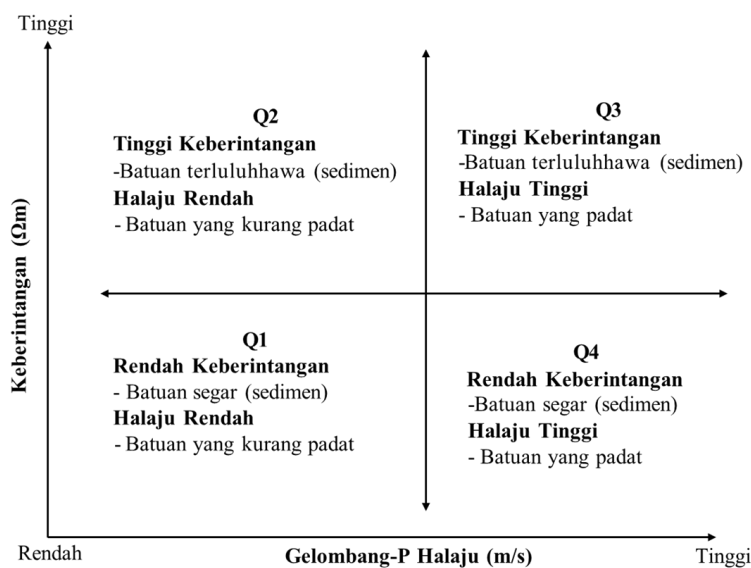
HASIL DAN PERBINCANGAN

Rajah 4 menunjukkan plot silang bersepadu antara nilai keberintangan geoelektrik dan halaju gelombang-P yang diperoleh daripada garisan tinjauan LR1 & LS1 hingga

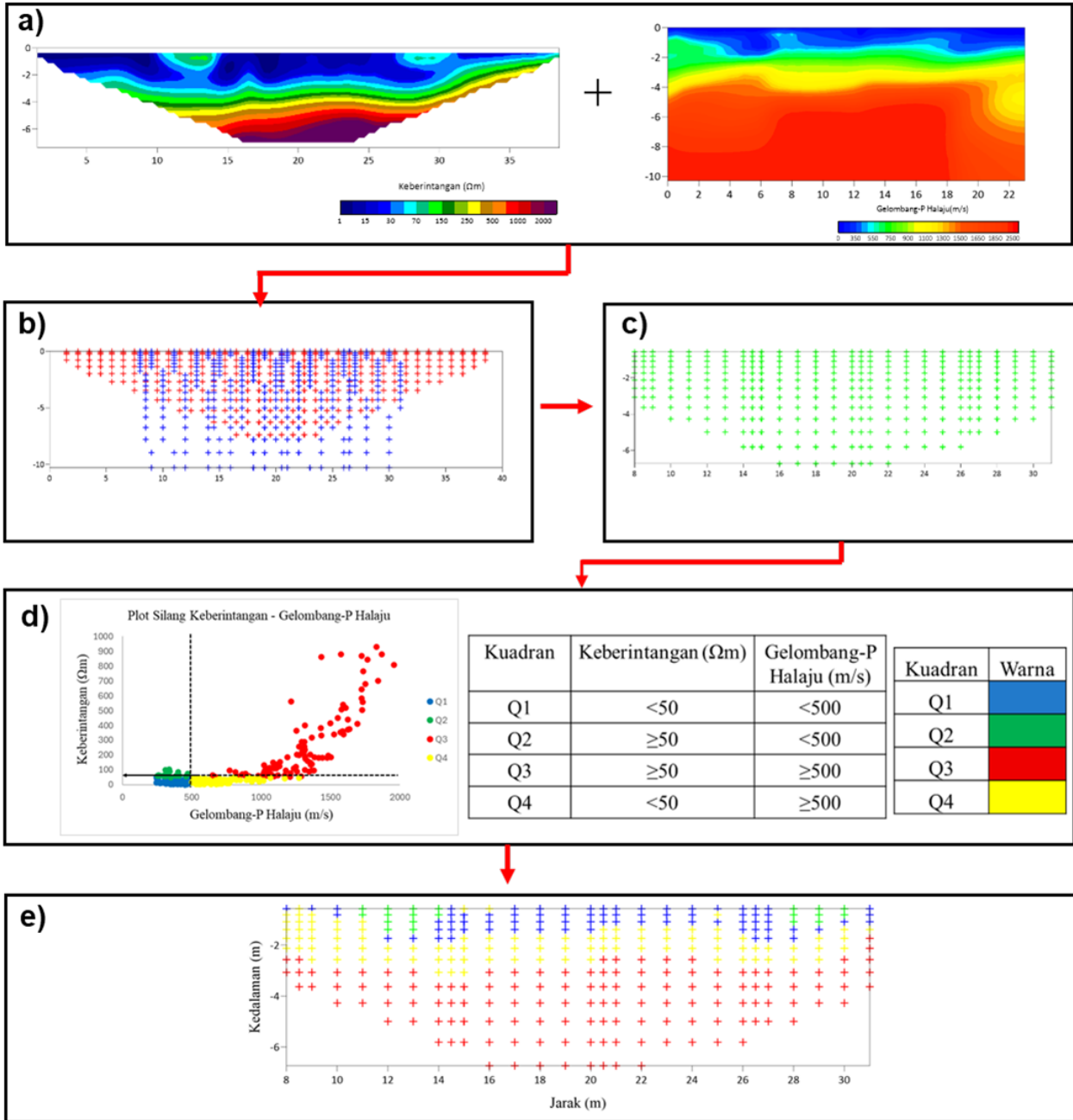
LR4 & LS4. Plot ini digunakan bagi menilai hubungan antara kedua-dua parameter geofizik tersebut dalam usaha mengenal pasti zon berpotensi mengandungi rongga bawah permukaan. Data yang diperoleh kemudiannya dikelaskan kepada empat kuadran: Q1, Q2, Q3 dan Q4 bagi memudahkan proses intepretasi bahan bawah permukaan berdasarkan gabungan ciri elektrik dan elastik medium. Pendekatan plot silang ini memberikan kelebihan berbanding analisis menggunakan satu kaedah geofizik sahaja kerana ini membolehkan korelasi antara dua parameter fizikal yang berbeza dilakukan secara



RAJAH 2. (b) Aliran kerja bagi menghasilkan model plot silang 2-D



RAJAH 2. (c) Hubungan skematik antara keberintangan-halaju (Zakaria et al. 2024)



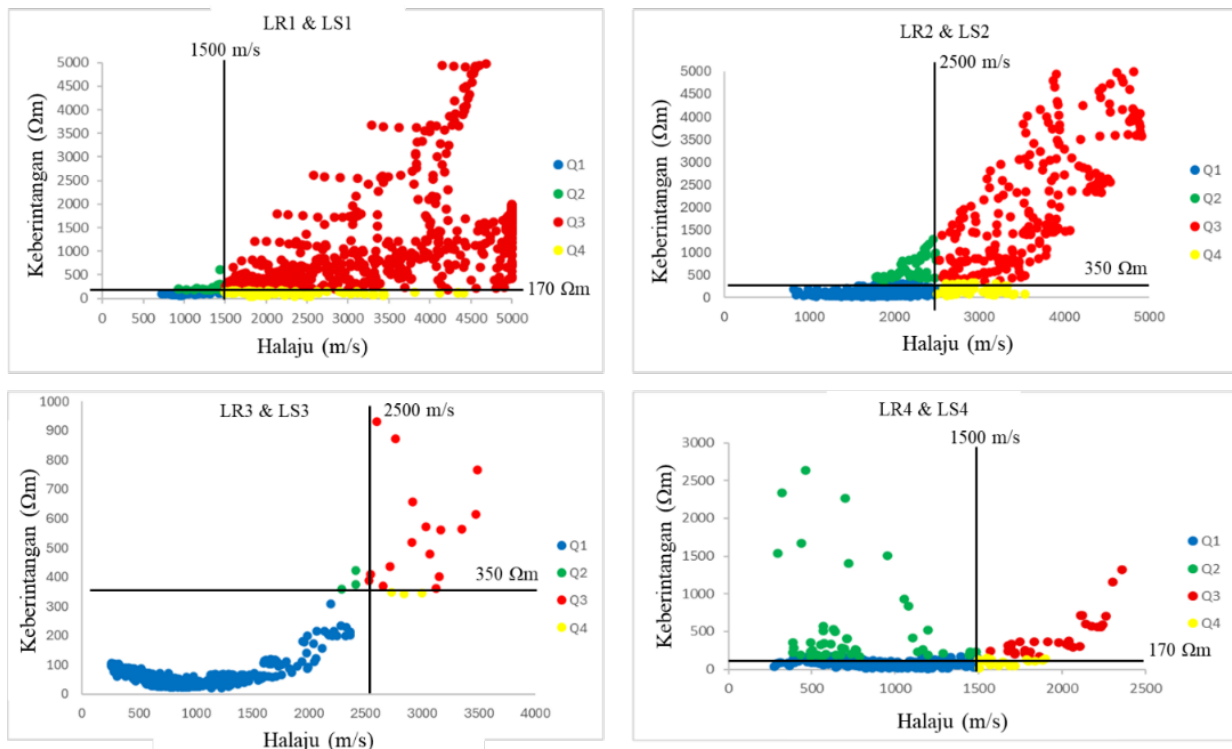
RAJAH 3. Analisis plot silang berdasarkan integrasi antara model tomografi keberintangan geoelektrik (ERT) dan tomografi pembiasan seismos (SRT). Rajah 3(a) model awal ERT dan SRT, Rajah 3(b) titik data bertindih bagi kedua-dua ERT dan SRT, Rajah 3(c) titik data plot silang kedua-dua kaedah selepas pembetulan geometri, Rajah 3(d) analisis graf berdasarkan nilai ambang dan Rajah 3(e) contoh output akhir model plot silang 2-D

serentak. Nilai ambang telah ditetapkan pada $170 \Omega\text{m}$ bagi keberintangan geoelektrik dan 1500 m/s bagi halaju gelombang-P. Pemilihan nilai ini adalah berdasarkan rasional saintifik yang merujuk kepada julat sifat fizikal bahan terluhawa dan zon berongga yang lazim menunjukkan nilai keberintangan relatif tinggi akibat pengurangan kandungan lembapan atau peningkatan ruang pori, manakala halaju gelombang-P cenderung rendah disebabkan oleh kehadiran ruang kosong atau zon lemah dalam medium batuan. Oleh itu, gabungan nilai keberintangan yang tinggi dan halaju seismos yang rendah sering dikaitkan dengan zon berpotensi rongga atau kawasan yang mengalami terluhawa intensif. Pendekatan ini selaras dengan kajian terdahulu yang menunjukkan bahawa integrasi data keberintangan dan seismos dapat meningkatkan ketepatan interpretasi struktur bawah permukaan berbanding penggunaan satu kaedah sahaja.

Merujuk kepada Rajah 1(a), lokasi rongga yang disyaki di permukaan dikenal pasti sepanjang LR1 pada jarak antara 58 hingga 62 meter. Pemerhatian lapangan di kawasan ini menunjukkan bahawa nilai keberintangan dan halaju seismos yang direkodkan adalah tekal dengan ciri zon rongga permukaan. Dalam plot silang, titik data bagi kawasan tersebut tertumpu dalam Q2 iaitu zon yang dicirikan oleh nilai keberintangan $\geq 170 \Omega\text{m}$ dan halaju gelombang-P $< 1500 \text{ m/s}$ yang menunjukkan potensi tinggi

berlakunya pembentukan rongga atau zon lemah bawah permukaan. Secara umum, pembahagian kuadran adalah seperti berikut: Q1 ($< 170 \Omega\text{m}$, $< 1500 \text{ m/s}$), Q2 ($\geq 170 \Omega\text{m}$, $< 1500 \text{ m/s}$), Q3 ($\geq 170 \Omega\text{m}$, $\geq 1500 \text{ m/s}$) dan Q4 ($< 170 \Omega\text{m}$, $\geq 1500 \text{ m/s}$). Pengelasan ini membolehkan pengelompokan data dilakukan secara sistematik berdasarkan gabungan sifat geofizik yang berbeza. Walau bagaimanapun, analisis lanjut menunjukkan bahawa tidak semua zon dengan ciri keberintangan tinggi semestinya mewakili rongga aktif. Dalam sesetengah keadaan, rongga yang telah terisi oleh sedimen atau bahan runtuh boleh menunjukkan nilai halaju seismos yang lebih tinggi akibat pemadatan bahan pengisi. Justeru, tafsiran berdasarkan satu parameter sahaja berpotensi menghasilkan interpretasi yang kurang tepat, justeru menegaskan kepentingan pendekatan integrasi antara data keberintangan dan seismos dalam kajian ini.

Oleh itu, satu set ambang alternatif turut dipertimbangkan iaitu Q1: $< 350 \Omega\text{m}$, $< 2500 \text{ m/s}$, Q2: $\geq 350 \Omega\text{m}$, $< 2500 \text{ m/s}$, Q3: $\geq 350 \Omega\text{m}$, $\geq 2500 \text{ m/s}$ & Q4: $< 350 \Omega\text{m}$, $\geq 2500 \text{ m/s}$ untuk menilai kemungkinan zon rongga yang telah mengalami pengisian sedimen dan pemadatan. Dalam konteks ini, kawasan yang berada dalam julat nilai tersebut berkemungkinan mewakili zon yang lebih stabil berbanding rongga terbuka, walaupun interpretasi ini masih memerlukan pengesahan lanjut melalui kaedah tambahan seperti penggerudian atau



RAJAH 4. Integrasi graf keberintangan-halaju pada lokasi X-Y yang sama

kajian geoteknik. Bagi meningkatkan kesepadanan ruang antara kedua-dua dataset, satu algoritma penyusunan telah digunakan bagi menjajarkan nilai keberintangan dan halaju seismos mengikut kedalaman serta kedudukan lateral. Dataset kemudiannya disusun mengikut turutan garisan tinjauan daripada LR1 dan LS1 hingga LR4 dan LS4 bagi memastikan keselarasan kedudukan antara kedua-dua profil geofizik. Pendekatan bersepadu ini merupakan satu kaedah yang berkesan dalam mengenal pasti zon lemah serta kawasan berpotensi mengandungi rongga di kawasan kajian. Walau bagaimanapun, pendekatan ini juga mempunyai beberapa limitasi, antaranya sensitiviti terhadap variasi heterogeniti litologi, kesan kelembapan tanah serta resolusi data yang berbeza antara kaedah keberintangan dan seismos. Oleh itu, interpretasi yang diperoleh perlu ditafsir secara berhati-hati dan sebaiknya disokong oleh maklumat geologi serta data kajian lapangan yang lain.

GARIS 1

Garis 1 (LR1 dan LS1) menunjukkan nilai keberintangan antara 1-5600 Ωm . Nilai rendah (1-80 Ωm) pada kedalaman 1-3 m mencerminkan lapisan tanah atas atau batu kapur terluluhawa tinggi. Nilai tinggi pada kedalaman 4-6 m dan jarak 30-176 m berkemungkinan menunjukkan batuan batu kapur. Nilai 170 Ωm yang sering dikaitkan dengan rongga berisi udara dikesan pada kedalaman 1-3 m dan jarak 58-62 m. Halaju gelombang-P berada dalam julat 1-3600 m/s. Halaju rendah (<800 m/s) pada kedalaman 1-3 m melambangkan tanah atas yang longgar dan terluluhawa. Halaju lebih tinggi hadir pada 7-20 m, manakala zon berpotensi rongga (1500 m/s) ditemui pada jarak 1-3 m. Penggabungan ERT dan SRT menunjukkan potensi rongga pada kedalaman sekitar 3 m, ditandai oleh keberintangan (170 Ωm) dan halaju (1500 m/s) yang rendah. Analisis plot silang 2-D mengelaskan data kepada empat kuadran dengan Q2 jelas menunjukkan ciri rongga berisi udara, sepadan dengan anomali dalam Rajah 5(a) dan 5(b). Rajah 5(c) menunjukkan kemungkinan hadir rongga. Q1 mewakili tanah atas atau batu kapur terluluhawa tinggi, Q3 mewakili batu kapur terluluhawa dan Q4 menunjukkan zon batu kapur lebih kompleks.

GARIS 2

Nilai keberintangan di kawasan kajian berada dalam julat 1-5600 Ωm . Nilai rendah (1-80 Ωm) yang lazimnya dikaitkan dengan lapisan tanah atas atau batu kapur terluluhawa tinggi dikesan pada kedalaman 1-5 m. Nilai keberintangan yang lebih tinggi muncul pada kedalaman 10-15 m dan jarak mendatar 38-126 m. Keputusan pembiasan seismos menunjukkan halaju gelombang-P

antara 1-3600 m/s. Halaju rendah (<800 m/s) direkodkan pada kedalaman 1-2 m, mencadangkan kehadiran lapisan tanah atas. Lapisan batu kapur dikenal pasti pada kedalaman 6-20 m sepanjang garisan tinjauan 0-92 m dengan julat halaju 2400-3600 m/s.

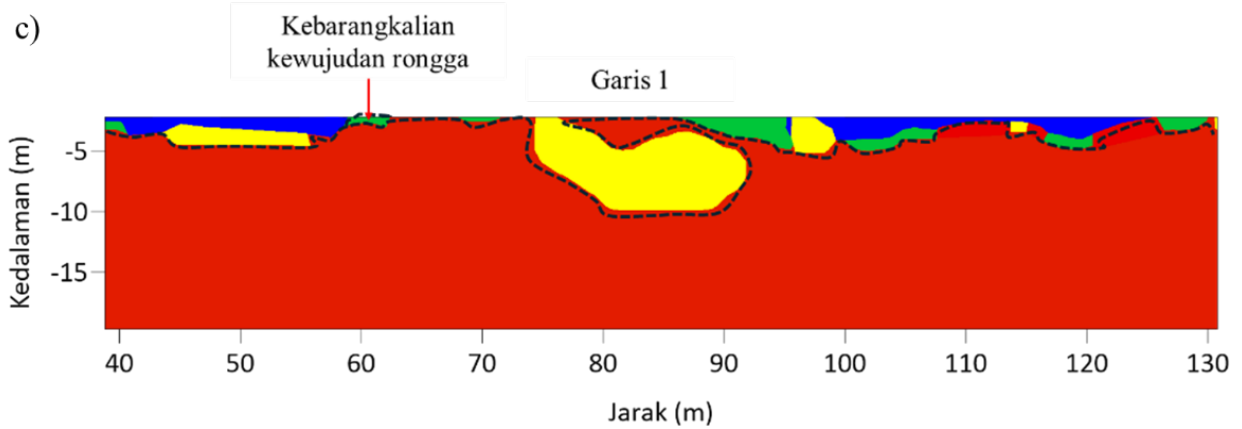
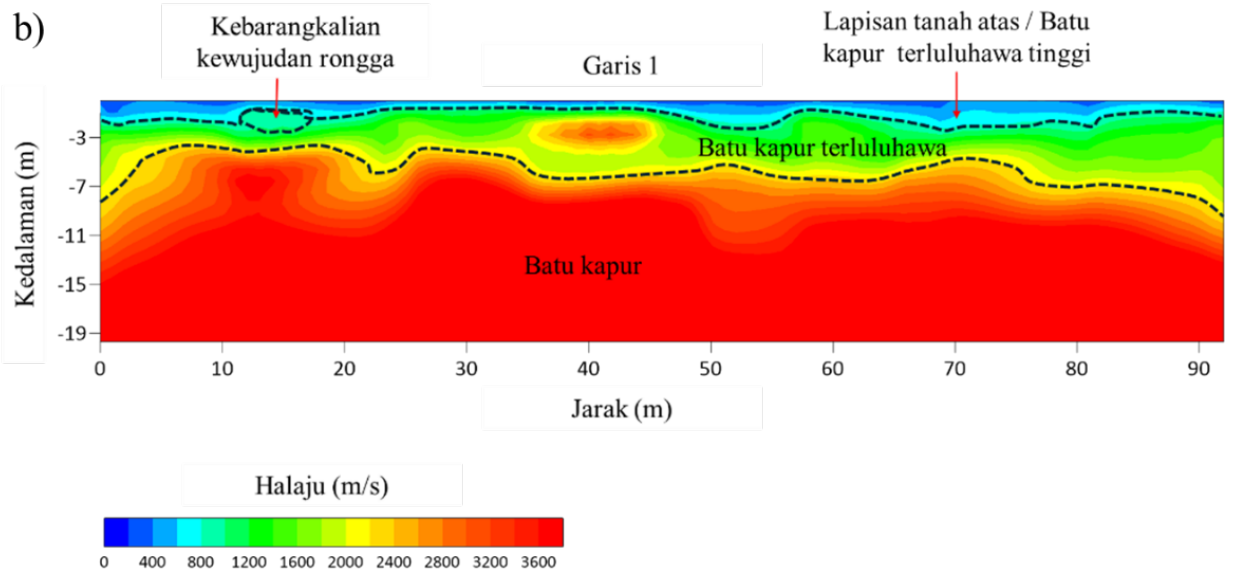
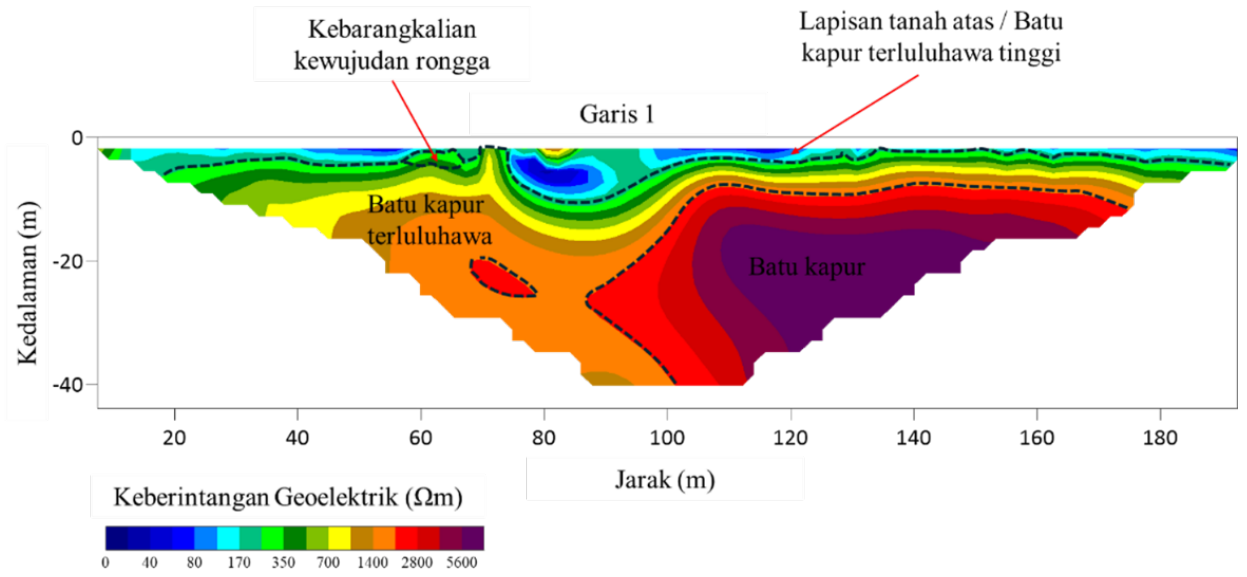
Berdasarkan gabungan keputusan ERT dan SRT, tiada petunjuk signifikan mengenai pembentukan rongga di kawasan ini. Ketiadaan zon anomali serta profil bawah permukaan yang tebal menunjukkan keadaan tanah adalah stabil dan tidak menyokong perkembangan rongga. Walaupun Rajah 6(c) menunjukkan kehadiran Q2, potensi kewujudan rongga tidak dapat disahkan. Ini turut disokong oleh Rajah 6(a) dan Rajah 6(b) dengan kedua-dua model keberintangan dan halaju seismos tidak mempamerkan anomali yang menyerupai rongga. Oleh itu, kemunculan Q2 dalam model plot silang 2-D berkemungkinan besar disebabkan oleh artifak interpolasi semasa proses integrasi kedua-dua set data.

GARIS 3

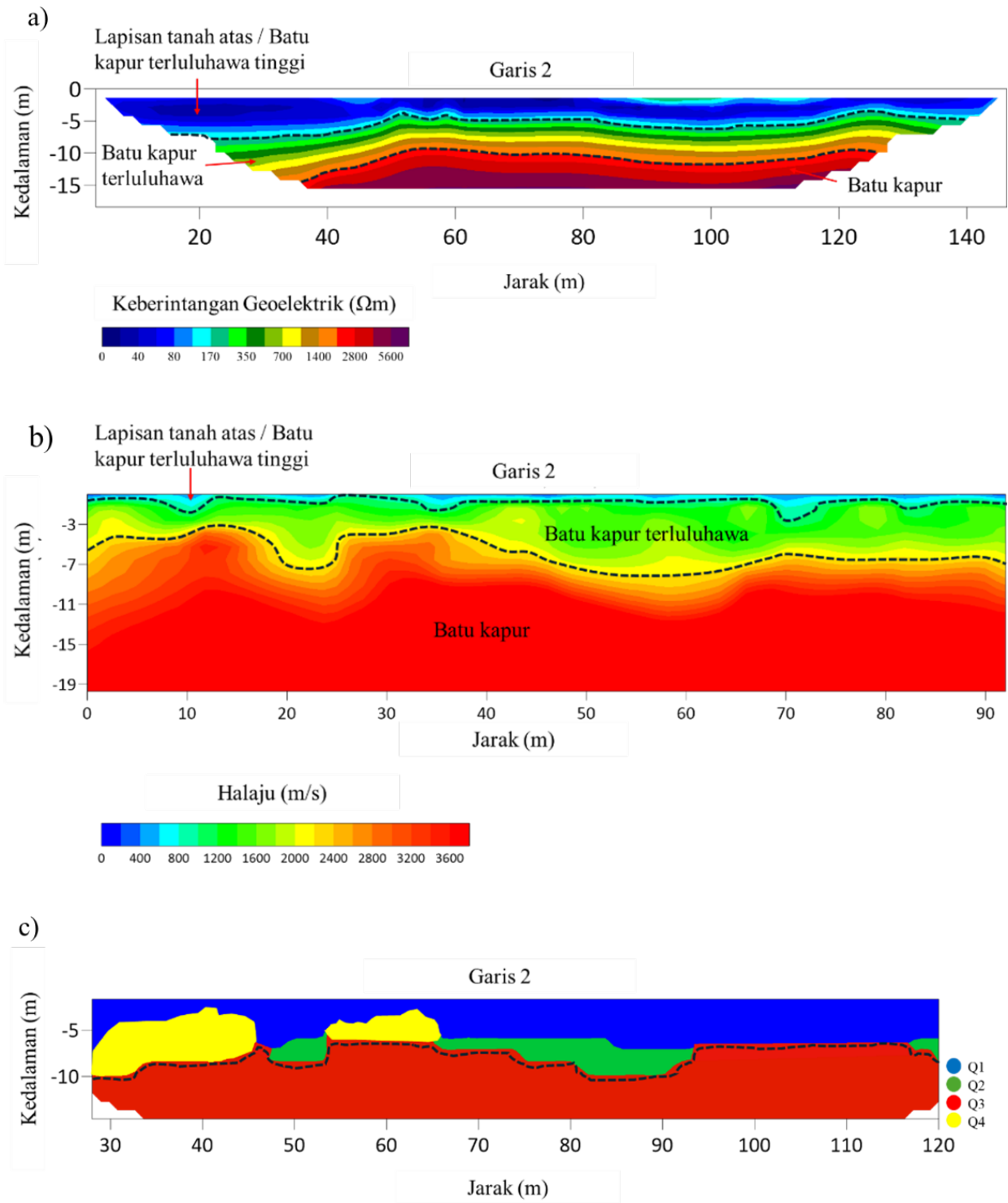
Rajah 7 menunjukkan (a) model ERT, (b) model SRT dan (c) model Plot Silang 2-D bagi garis 3. Garis 3 mempamerkan corak taburan keberintangan yang hampir sama dengan laluan sebelumnya. Profil bawah permukaan boleh ditafsirkan sebagai lapisan tanah atas atau batu kapur sangat terluluhawa (1-170 Ωm ; 1-600 m/s), zon batu kapur terluluhawa (170-700 Ωm ; 600-2400 m/s) dan zon batu kapur (700-5600 Ωm ; 2800-3600 m/s). Lapisan tanah atas/batu kapur terluluhawa tinggi ditemui pada kedalaman 1-4 m, diikuti oleh batu kapur terluluhawa pada 5-6 m, manakala lapisan batu kapur terletak antara 7-10 m.

GARIS 4

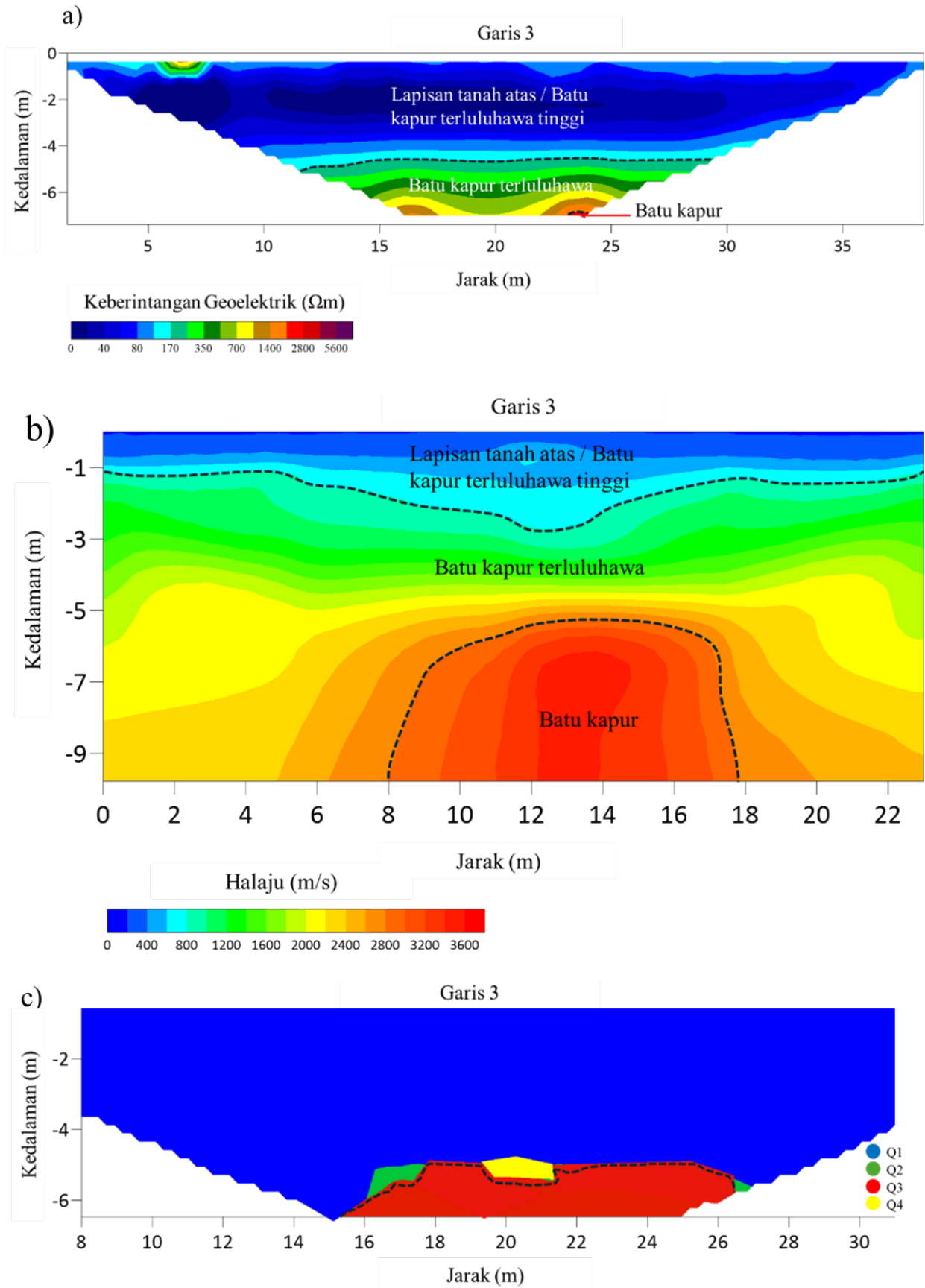
Rajah 8 menunjukkan (a) hasil model ERT, (b) hasil model SRT dan (c) hasil model plot silang 2-D. Garis 4 mempamerkan corak yang hampir sama dengan garis sebelumnya. Berdasarkan nilai keberintangan dan halaju, kawasan ini boleh ditafsirkan sebagai lapisan tanah atas atau batu kapur terluluhawa tinggi (1-170 Ωm dan 1-600 m/s), batu kapur terluluhawa (170-700 Ωm ; 600-2400 m/s) dan batu kapur 700-5600 Ωm ; 2400-3600 m/s). Lapisan tanah atas dan batu kapur terluluhawa dikesan pada kedalaman 1-5 m, manakala lapisan batu kapur muncul pada 4-6 m. Antara 13-19 m dalam plot silang 2-D menunjukkan kemungkinan kewujudan rongga bawah permukaan. Walaupun tiga ciri dalam Q2 dikenal pasti, integrasi data menunjukkan bahawa potensi rongga sebenar tertumpu pada zon tengah. Dua ciri lain dalam Q2 lebih berkemungkinan mewakili lapisan tanah atas atau batu kapur terluluhawa tinggi dan bukan anomali berkaitan rongga.



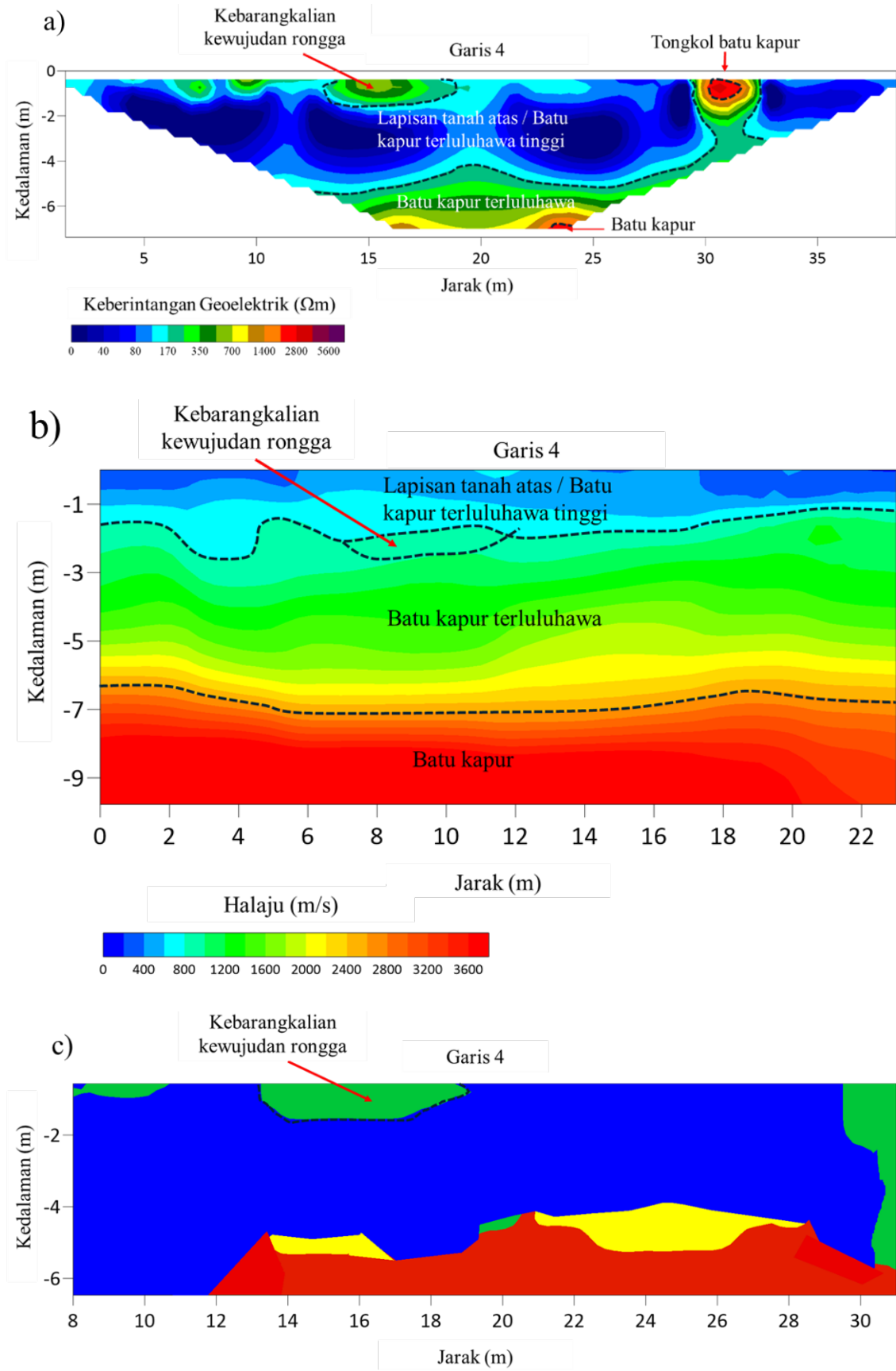
RAJAH 5 (a) model ERT, (b) model SRT (c) model plot silang 2-D bagi garis 1



RAJAH 6 (a) model ERT, (b) model SRT (c) model plot silang 2-D bagi garis



RAJAH 7. (a) model ERT, (b) model SRT (c) model plot silang 2-D bagi garis 3



RAJAH 8. (a) model ERT, (b) model SRT (c) model plot silang 2-D bagi garis 4

KESIMPULAN

Kajian ini membuktikan keberkesanan pengintegrasian kaedah Keberintangan Geoelektrik (ERT) dan Pembiasan Seismos (SRT) melalui model plot silang 2-D dalam meningkatkan pengesanan anomali bawah permukaan bagi tujuan mitigasi bahaya geologi. Penggabungan data keberintangan dan halaju gelombang-P membolehkan pengelasan bawah permukaan kepada empat kuadran (Q1-Q4) dengan Q2 yang menunjukkan nilai keberintangan tinggi dan halaju rendah sebagai penunjuk utama kewujudan rongga berisi udara. Ciri ini turut dikenal pasti di Garis 1 pada jarak 58-62 meter, selari dengan anomali yang dikesan dalam kedua-dua profil ERT dan SRT. Walau bagaimanapun, beberapa kejadian seperti ini yang ditunjukkan dalam Rajah 6(c) berkemungkinan berpunca daripada tafsiran data dan bukan anomali geologi sebenar.

Model plot silang 2-D ini jelas meningkatkan ketepatan interpretasi berbanding penggunaan kaedah geofizik secara tunggal, sekali gus menyediakan kerangka analisis yang lebih kukuh dalam persekitaran batu kapur aktif seperti Kompleks Gua, Dabong, Kelantan. Pendekatan bersepadu ini juga menyumbang kepada pengesanan awal geobahaya seperti rongga dan lubang benam, seterusnya menyokong perancangan guna tanah dan penilaian risiko geoteknikal. Untuk penyelidikan seterusnya, disarankan agar pemerolehan data beresolusi lebih tinggi dilaksanakan melalui jarak elektrod dan geofon yang lebih rapat serta penerapan pemodelan dan inversi 3-D bagi meningkatkan visualisasi struktur bawah permukaan. Pengesanan lapangan melalui lubang gerek atau GPR di zon anomali utama perlu dijalankan bagi mengukuhkan interpretasi. Selain itu, pemantauan jangka panjang dan integrasi analisis geoteknikal, hidrogeologi serta GIS berpotensi menghasilkan peta kepekaan rongga yang lebih komprehensif bagi tujuan mitigasi geobahaya.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas pembiayaan melalui Geran Galakan Penyelidik Muda (GGPM), di bawah nombor geran GGPM-2023-042 bertajuk 'Integration of Geophysical Inversion for Heterogeneous Near-Subsurface Environments using 2-D Cross-Plot Models'. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada penyelia, penyelia bersama serta pelajar dari Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dan Universiti Malaysia Kelantan (UMK) atas bantuan yang diberikan. Penulis pertama turut merakamkan penghargaan atas sokongan biasiswa melalui Zamalah di bawah UKM serta MyBrain 2.0 di bawah Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia.

RUJUKAN

Abd El Aal, A.K. 2017. Identification and characterization of near surface cavities in Tuwaiq Mountain Limestone, Riyadh, KSA, "detection and treatment". *Egyptian Journal of Petroleum* 26(1): 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.04.004>

- Abdelrahman, K., Saadon, A.B. & Qaysi, S. 2024. Estimating shear wave velocity and site characterization of western Riyadh City, Saudi Arabia based on multichannel analysis of surface waves. *Frontiers in Earth Science* 12: 1395431. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1395431>
- Abdelrahman, K., Hazaea, S.A., Hazaea, B.Y., Abioui, M. & Al-Awah, H. 2023. Groundwater potentiality in hard-rock terrain of southern Saudi Arabia using electrical resistivity tomography approach. *Journal of King Saud University - Science* 35(9): 102928. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102928>
- Akingboye, A.S. 2025. Electrical and seismic refraction methods: Fundamental concepts, current trends, and emerging machine learning prospects. *Discover Geoscience* 3: 87. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00169-8>
- Akingboye, A.S. & Ogunyele, A.C. 2019. Insight into seismic refraction and electrical resistivity tomography techniques in subsurface investigations. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik* 34(1): 93-111. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.9>
- Al-Adly, A.I.F. 2025. Reduction of under-road pavement sinkhole hazards by soil improvement. *International Journal of GEOMATE* 29(131): 76-83. <https://doi.org/10.21660/2025.131.4926>
- Alarifi, S.S. 2025. Surface and subsurface sinkholes and karstic cavities in the Uppermost Jurassic-Lower Cretaceous Sulaiy Formation in An Narjis District, Riyadh, Central Saudi Arabia: Field and geophysical investigation. *Journal of Applied Geophysics* 233: 105612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.japgeo.2024.105612>
- Al-Heety, A.J.R. & Shanshal, Z.M. 2016. Integration of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography in engineering geophysics for soil characterization. *Arabian Journal of Geosciences* 9: 73. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2116-9>
- Alsamarraie, M.M. 2020. Seismic refraction method in the determination of site characteristics. *Iraqi Geological Journal* 53(2): 53-63. <https://doi.org/10.46717/igj.53.2d.4ms-2020-10-26>
- Alzahrani, H., Abdelrahman, K. & Hazaea, S.A. 2022. Use of geoelectrical resistivity method for detecting near-surface groundwater potential zones at Riyadh city, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Science* 34(7): 102253. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102253>
- Baghzendani, H., Aghajani, H. & Karami, G.H. 2024. *Detection of Karst Features using Integrated Geophysical Methods; Case Study Ravansar Area*. <https://doi.org/10.22044/jme.2024.14984.2855>
- Bharti, A.K., Singh, K.K.K., Ghosh, C.N. & Mishra, K. 2022. Detection of subsurface cavity due to old mine workings using electrical resistivity tomography: A case study. *Journal of Earth System Science* 131: 39. <https://doi.org/10.1007/s12040-021-01781-1>

- Bharti, A.K., Prakash, A., Verma, A. & Singh, K.K.K. 2021. Assessment of hydrological condition in strata associated with old mine working during and post-monsoon using electrical resistivity tomography: A case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80(6): 5159-5166. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02208-3>
- Bharti, A.K., Pal, S.K., Priyam, P., Kumar, S., Srivastava, S. & Yadav, P.K. 2016a. Subsurface cavity detection over Patherdih colliery, Jharia Coalfield, India using electrical resistivity tomography. *Environmental Earth Sciences* 75(5): 443. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5025-z>
- Bharti, A.K., Pal, S.K., Priyam, P., Pathak, V.K., Kumar, R. & Ranjan, S.K. 2016b. Detection of illegal mine voids using electrical resistivity tomography: The case-study of Raniganj coalfield (India). *Engineering Geology* 213: 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.09.004>
- Brixová, B., Mosná, A. & Putiška, R. 2018. Applications of shallow seismic refraction measurements in the Western Carpathians (Slovakia): Case studies. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 48(1): 1-21. <https://doi.org/10.2478/congeo-2018-0001>
- Capizzi, P., Martorana, R., Carollo, A. & Vattano, M. 2017. Cluster analysis for cavity detection using seismic refraction and electrical resistivity tomography. *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics 2017*: 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702123>
- Cardarelli, E., Cercato, M., Cerreto, A. & Di Filippo, G. 2010. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting* 58(4): 685-695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>
- Carollo, A., Capizzi, P. & Martorana, R. 2020. Joint interpretation of seismic refraction tomography and electrical resistivity tomography by cluster analysis to detect buried cavities. *Journal of Applied Geophysics* 178: 104069. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104069>
- Daniels, J. 1988. Locating caves, tunnels and mines. *The Leading Edge* 7(3): 32-52. <https://doi.org/10.1190/1.1439492>
- Das, P. & Mohanty, P.R. 2016. Resistivity imaging technique to delineate shallow subsurface cavities associated with old coal working: A numerical study. *Environmental Earth Sciences* 75(8): 661. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5404-0>
- Daud, S., Ishak, M.F., Ismi, P.I. & Zolkepli, M.F. 2025. Investigation of potential groundwater sources using electrical resistivity imaging for industrial facilities in Gebeng, Kuantan, Malaysia: A case study. *Warta Geologi* 51(2): 177-185. <https://doi.org/10.7186/wg512202502>
- Dick, M.D., Bery, A.A., Okonna, N.N., Ekanem, K.R., Bashir, Y. & Akingboye, A.S. 2024. A novel machine learning approach for interpolating seismic velocity and electrical resistivity models for early-stage soil-rock assessment. *Earth Science Informatics* 17(3): 2629-2648. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01303-9>
- Doyoro, Y.G., Chang, P.Y. & Puntu, J.M. 2021. Uncertainty of the 2D resistivity survey on the subsurface cavities. *Applied Sciences (Switzerland)* 11(7): 3143. <https://doi.org/10.3390/app11073143>
- Guinea, A., Playà, E., Rivero, L., Martínez, N. & Cutipa, V. 2025. Geoelectrical methods for evaluating the characteristics of different gypsum varieties in gypsum quarries. *Engineering Geology* 353: 108112. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108112>
- Gutiérrez, F. 2016. *Sinkhole Hazards*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.40>
- Hasan, M.F.R., Susilo, A., Suryo, E.A., Agung, P.A.M., Idmi, M.H., Suaidi, D.A. & Aprilia, F. 2024. *Iraqi Geological Journal* 57(1A): 159-168.
- Hayashi, K. & Konishi, C. 2012. Joint use of a surface-wave method and a resistivity method for safety assessment of levee systems. *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*. pp. 1340-1349. [https://doi.org/doi:10.1061/41095\(365\)134](https://doi.org/doi:10.1061/41095(365)134)
- Hermawan, O.R. & Putra, D.P.E. 2016. The effectiveness of Wenner-Schlumberger and dipole-dipole array of 2D geoelectrical survey to detect the occurring of groundwater in the Gunung Kidul Karst Aquifer System, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Applied Geology* 1(2): 71-81.
- Ishak, M.F., Zolkepli, M.F., Masyhur, E.M.H., Yunus, N.Z.M., Rashid, A.S.A., Hezmi, M.A., Hasbollah, D.Z.A. & Yusoff, A.R. 2022. Interrelationship between borehole lithology and electrical resistivity for geotechnical site investigation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128: 103279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103279>
- Mansor, H.E., Saad, N.N.M., Mohamed, K.R., Khan, M.M.A., James, E., Mohd Amin, M.F., Sulaiman, N. & Hassan, H.M. 2024. Geoheritage of the Gua Ikan Karst Complex (GIKC), Stong Geopark, Dabong, Kuala Krai District, Kelantan, Malaysia: Evaluation for geotourism opportunities. *BIO Web of Conferences* 131: 04018. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413104018>
- Martínez-Moreno, F.J., Pedrera, A., Ruano, P., Galindo-Zaldívar, J., Martos-Rosillo, S., González-Castillo, L., Sánchez-Úbeda, J.P. & Marín-Lechado, C. 2013. Combined microgravity, electrical resistivity tomography and induced polarization to detect deeply buried caves: Algaidilla cave (Southern Spain). *Engineering Geology* 162: 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.05.008>

- Masson, Y.J. & Pride, S.R. 2007. Poroelastic finite difference modeling of seismic attenuation and dispersion due to mesoscopic-scale heterogeneity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112: B03204. <https://doi.org/10.1029/2006JB004592>
- Metwaly, M., Elawadi, E., Moustafa, S.S.R., Halawa, A.A. & Shaaban, F. 2024. Detecting cavernous features in Al Kharj, Saudi Arabia: Advancements in TEM and ERT geophysical measurements. *Environmental Earth Sciences* 83(8): 235. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11523-3>
- Onyango, J.A., Sasaoka, T., Shimada, H., Hamanaka, A. & Moses, D. 2025. Equivalent porous medium (EPM) modeling of karst features for slope stability analysis in karst-prone weak rock masses. *Modelling* 6(3): 81.
- Razmi, N.S., Umor, M.R., Arifin, M.H., Simon, N., Sulaiman, N. & Mohd Nazer, N.S. 2024. Pencirian geohazard tanah runtuh pendam lama di kawasan Bukit Fraser, Pahang. *Sains Malaysiana* 53(5): 995-1007. <https://doi.org/10.17576/jsm-2024-5305-02>
- Sahoo, S.D., Pal, S.K., Vikash, V., Narayan, S., Kumar, R., Srivastava, S. & Bhattacharjee, R.M. 2024. Quantifying environmental impact of unplanned mining through integrated non-invasive geophysical methods: A case study from Jharia coalfield, India. *Environmental Earth Sciences* 83: 411. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11719-7>
- Sanny, T.A., Asrib, M.L. & Insani, A.Z.M. 2023. Soil characterization using the Electrical Resistivity Tomography (ERT) approach on non-typical land of *Ipomoea batatas* "Cilembu". *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA* 9(8): 6128-6135. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i8.4653>
- Singh, K.K.K., Bharti, A.K., Pal, S.K., Prakash, A., Saurabh, Kumar, R. & Singh, P.K. 2019. Delineation of fracture zone for groundwater using combined inversion technique. *Environmental Earth Sciences* 78(4): 110. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8072-z>
- Srivastava, S., Pal, S.K. & Kumar, R. 2020. A time-lapse study using self-potential and electrical resistivity tomography methods for mapping of old mine working across railway-tracks in a part of Raniganj coalfield, India. *Environmental Earth Sciences* 79(13): 332. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09067-3>
- Sujitapan, C., Kendall, J.M., Chambers, J.E. & Yordkayhun, S. 2024. Landslide assessment through integrated geoelectrical and seismic methods: A case study in Thungsong site, southern Thailand. *Heliyon* 10(2): e24660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24660>
- Ukorebi Asuquo, B., M. George, A., Akaerue, E. & Chigoziem Akakuru, O. 2024. Integrating seismic refraction and electrical approaches in determining geophysical properties of near-surface cavities in Calabar-Ikom highway, Odukpani, Cross River State, Nigeria. *International Journal of Advanced Geosciences* 12(1): 7-16. <https://doi.org/10.14419/mze5m111>
- Yu, H., Liu, Z., Song, M., Liu, L., Liu, Z., Cao, E. & Zhao, X. 2025. Evaluating the reliability of geophysical methods for investigating the migration of a hydrocarbon plume: Validation by sample analysis. *Environmental Pollution* 372: 126032. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126032>
- Zakaria, M.T., Ismail, N.A., Muztaza, N.M. & Zaki, M.F.M. 2024. Integrated geophysical models for interpretations of heterogeneous subsurface environments. *Sains Malaysiana* 53(5): 1021-1031. <https://doi.org/10.17576/jsm-2024-5305-04>
- Zakaria, M.T., Mohd Muztaza, N., Zabidi, H., Salleh, A.N., Mahmud, N. & Rosli, F.N. 2022. Integrated analysis of geophysical approaches for slope failure characterisation. *Environmental Earth Sciences* 81(10): 299. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10410-z>
- Zakaria, M.T., Muztaza, N.M., Zabidi, H., Salleh, A.N., Mahmud, N., Samsudin, N., Rosli, F.N., Olugbenga, A.T. & Jia, T.Y. 2021. 2-D cross-plot model analysis using integrated geophysical methods for landslides assessment. *Applied Sciences (Switzerland)* 11(2): 747. <https://doi.org/10.3390/app11020747>

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: taquiuddin@ukm.edu.my