

Integrasi pemetaan lapangan, tafsiran lineamen dan survei tomografi keberintangan geoelektrik dalam pencirian jasad batuan granit terlindung shotcrete

(Integration of field mapping, lineament interpretation and electrical resistivity tomography survey to characterize granitic rock mass lining by shotcrete)

HAMZAH HUSSIN^{1,2,*}, MOHD HARIRI ARIFIN¹, TAJUL ANUAR JAMALUDDIN¹,
MUHAMMAD FAHMI ABDUL GHANI¹, NADZARI ISMAIL³, ABDUL MANAN ABDULLAH⁴

¹Pusat Pengajian Sains Bumi & Alam Sekitar, Fakulti Sains & Teknologi,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, Bangi, Selangor, Malaysia

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

³TNB Research Sdn. Bhd., No 1, Kawasan Institusi Penyelidikan, Jalan Ayer Hitam, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia

⁴Geo Technology Resources Sdn Bhd, 31-1, Jalan Mawar 5b, Taman Mawar, 43900 Sepang, Selangor, Malaysia

* Corresponding author email address: hamzah.h@umk.edu.my

Abstrak: Pencirian jasad batuan penting bagi mengenalpasti keadaan jasad batuan terutamanya jika melibatkan binaan struktur utama seperti terowong. Pencirian jasad batuan boleh dilakukan samada sebelum, semasa atau selepas pembinaan. Dalam kajian kes ini, pencirian jasad batuan dilakukan selepas terowong siap dibina dan telah aktif beroperasi menghampiri 20 tahun. Pencirian tidak dapat dilakukan secara cerapan terus dilapangan kerana separuh daripada jasad batuan sepanjang terowong telah ditutupi oleh lapisan shotcrete. Pendekatan integrasi melibatkan tiga kaedah iaitu pemetaan lapangan, tafsiran imej satelit dan survei tomografi keberintangan geoelektrik telah digunakan untuk mengatasi permasalahan ini. Tafsiran imej satelit menekankan kepada surihan struktur lineamen negatif manakala pemetaan lapangan menekankan kepada lokasi resapan air bawah tanah dan struktur tektonik major seperti sesar, kekar dan zon ricih. Survei tomografi keberintangan geoelektrik dijalankan pada bahagian dinding terowong menggunakan sistem ABEM SAS 4000 dan susunatur dwikutub-dwikutub. Data mentah diproses menggunakan perisian Res2DINV. Analisis data menunjukkan kehadiran tiga nilai keberintangan bahan yang berbeza iaitu berkeberintangan tinggi ($> 1500 \Omega.m$), sederhana ($100-500 \Omega.m$) dan rendah ($< 25 \Omega.m$). Dapatan daripada pemetaan lapangan dan tafsiran lineamen digunakan dalam tafsiran keratan rentas pseudo. Ketiga-tiga nilai ini ditafsirkan sebagai zon tinggi kandungan air (berkeberintangan rendah), jasad batuan terkesan lineamen dan terkekar kuat (berkeberintangan sederhana) dan batuan granit kurang terkekar (berkeberintangan tinggi).

Kata kunci: Pemetaan lapangan; pencirian jasad batuan; survei keberintangan tomografi keberintangan geoelektrik; tafsiran imej satelit

Abstract: Rock mass characterization is important to identify the condition of rock especially in major infrastructure like a tunnel. Rock mass characterization can be done either before, during or after construction completed. In this case study, this characterization was done after almost 20 years of tunnel operation. Characterization could not be done directly to the field as half of the rock mass along tunnel was covered by shotcrete layer. To overcome this problem, three integration methods which are field mapping, satellite image interpretation and geoelectrical tomography resistivity survey been approached. Satellite image interpretation is to emphasise negative lineament structure tracing while field mapping is to emphasis the location of groundwater intrusion and major tectonic structures like fault, joint and shear zone. Geoelectrical tomography resistivity survey was conducted using ABEM SAS 400 system and dipole-dipole array while raw data were processed using Res2DINV software. Data analysis showed three difference resistivity values which are high resistivity ($> 1500 \Omega.m$), moderate ($100-500 \Omega.m$) and low ($<25 \Omega.m$). Findings from field mapping and lineament interpretation were used to interpret pseudosection. All three resistivity values were interpreted as high water content zone (low resistivity), lineament effected and highly fractured granitic rock mass (moderate resistivity) and low fractured granitic rock (high resistivity).

Keywords: Electrical resistivity tomography survey; field mapping; rock mass characterization; satellite image interpretation

PENGENALAN

Mencirikan jasad batuan penting terutamanya untuk mengesan zon atau kawasan lemah yang memerlukan pemerhatian lebih. Kewujudan zon lemah boleh mendatangkan banyak permasalahan samada dalam bentuk potensi kegagalan atau runtutan, kualiti jasad batuan yang rendah, atau perubahan kepada rekabentuk sistem sokongan. Jasad batuan granit biasanya bersifat masif, tetapi kesan daripada aktiviti tektonik, jasad batuan boleh mempunyai satah ketakselajaran. Satah ketakselajaran terdiri daripada sesar, kekar, zon ricih atau lineamen. Kepadatan dan taburan satah ketakselajaran yang tinggi boleh melemahkan jasad batuan. Struktur yang dibina dalam jasad batuan yang terkesan dengan satah ketakselajaran biasanya memerlukan sistem sokongan bagi memastikannya boleh bertahan untuk satu tempoh yang lama.

Shotcrete merupakan salah satu kaedah yang biasa digunakan untuk menyokong bukaan terowong terutamanya yang dibina menggunakan kaedah gerudi dan letup (*drill and blast*). Shotcrete merupakan bancuhan mortar dengan agregat halus (sehingga 23 mm) yang disemur pada permukaan jasad batuan menggunakan udara termampat. Shotcrete tanpa sokongan dan shotcrete dengan sokongan jaringan keluli tahan karat dan bolt batuan merupakan dua jenis yang biasa digunakan kerana mampu untuk meningkatkan kekuatan regangan dan ricih jasad batuan (Moffat *et al.*, 2017). Tempoh pembinaan yang cepat dan kos yang murah menyebabkan penggunaan shotcrete berkembang dengan pesat sejak diperkenalkan dan menjadi pilihan utama dalam kebanyakan projek pembinaan.

Kaedah sokongan ini dicadangkan dalam banyak sistem pengelasan jasad batuan seperti Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski, 1989), Q System (Schwingenschloegl & Lehmann, 2009), JH Method (Shinji *et al.*, 2002) dan Rock Mass Quality Rating (RMQR) (Aydan *et al.*, 2014). Lapisan shotcrete melindungi singkapan batuan untuk satu tempoh masa yang panjang. Walau bagaimanapun, jika terdapat keperluan untuk menilai kembali keadaan jasad batuan, ianya tidak dapat dilakukan kerana halangan daripada lapisan shotcrete. Penggunaan kaedah survei tomografi keberintangan geoelektrik merupakan kaedah alternatif yang boleh digunakan untuk mencirikan jasad batuan yang terlindung oleh shotcrete. Kaedah tomografi keberintangan geoelektrik menggunakan arus elektrik untuk mengukur sifat kerintangan sesuatu bahan yang terdapat dalam permukaan bumi. Kemampuannya yang mampu menembusi jauh ke dalam permukaan bumi menyebabkannya sering digunakan dalam mencari aliran air bawah tanah dan akuifer (Mohamaden *et al.*, 2016; Nazaruddin *et al.*, 2017; Owen *et al.*, 2006; Selvarani *et al.*, 2016), pemetaan struktur (Gélis *et al.*, 2010; Hamzah Hussin *et al.*, 2017), kajian rerongga atau sinkhole (Arifin *et al.*, 2011; Cardarelli *et al.*, 2010; Siti *et al.*, 2011) dan gred luluhawa (Son *et al.*, 2010).

Kebergantungan secara keseluruhan daripada data survei tomografi keberintangan geoelektrik sahaja tidak mencukupi

kerana tafsiran keratan rentas pseudo memerlukan maklumat tambahan lain. Tujuannya untuk memastikan tafsiran adalah setepat mungkin dan mewakili bahan yang ada dalam kawasan kajian. Dapatan daripada pemetaan lapangan dan tafsiran imej satelit boleh digunakan sebagai maklumat untuk menafsirkan keratan rentas pseudo. Kertas kajian ini menekankan intergrasi tiga kaedah iaitu survei tomografi keberintangan geoelektrik, pemetaan lapangan dan tafsiran imej satelit untuk mencirikan jasad batuan yang terlindung oleh lapisan shotcrete.

KEADAAN DAN GEOLOGI KAWASAN

Sebuah terowong yang terletak di Jajahan Jeli, Kelantan telah dipilih sebagai tapak kajian (Rajah 1). Terowong ini merupakan sebuah terowong yang telah siap dibina pada awal tahun 2000 dan sedang aktif beroperasi. Jasad batuan pada beberapa bahagian terowong disokong menggunakan semburan shotcrete dan bolt batuan. Semburan shotcrete menutup hampir 50% daripada keseluruhan terowong. Kajian dilakukan dalam terowong utama yang berfungsi sebagai laluan untuk ke bahagian cavern. Terowong dibina dalam jasad batuan granit yang dikenali sebagai Granit Lawar (Rajah 2). Batuan Granit Lawar dicirikan oleh warna kelabu cerah, berbutir halus dan sama saiz serta mempunyai mineral biotit dan hornblend sebagai mineral sampingan (The Malaysian and Thai Working Groups, 2006). Batuan granit ini dikelaskan sebagai jenis-I dan dianggarkan berusia Kapur berdasarkan korelasi dengan batuan Granit Noring.

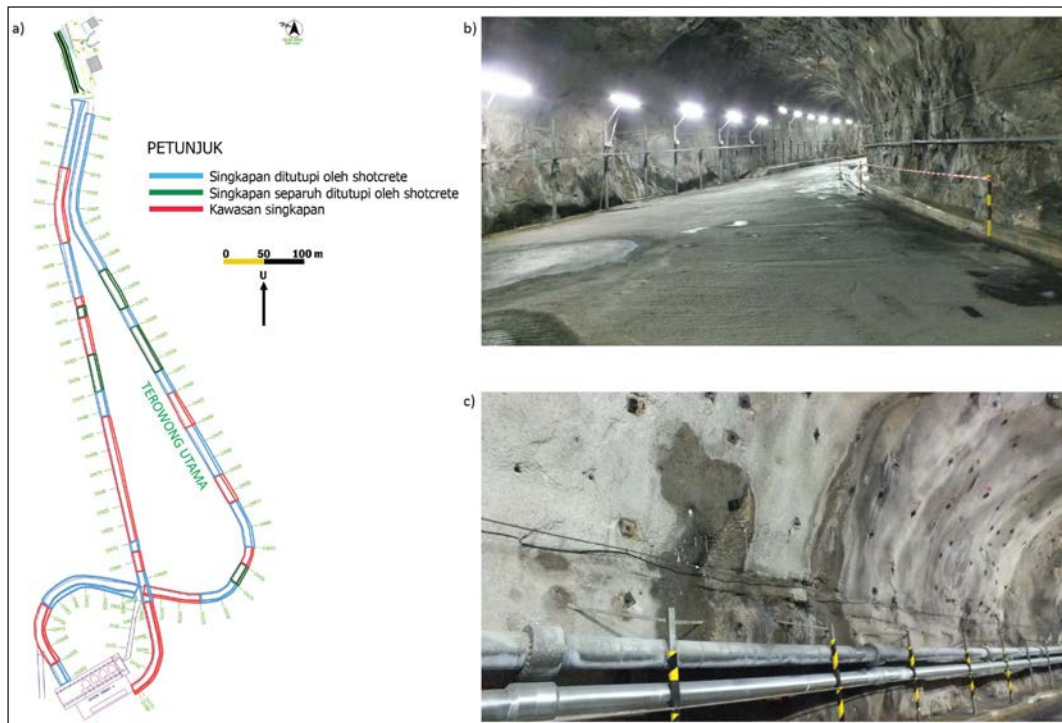
KAEDAH KAJIAN

Pemetaan lapangan

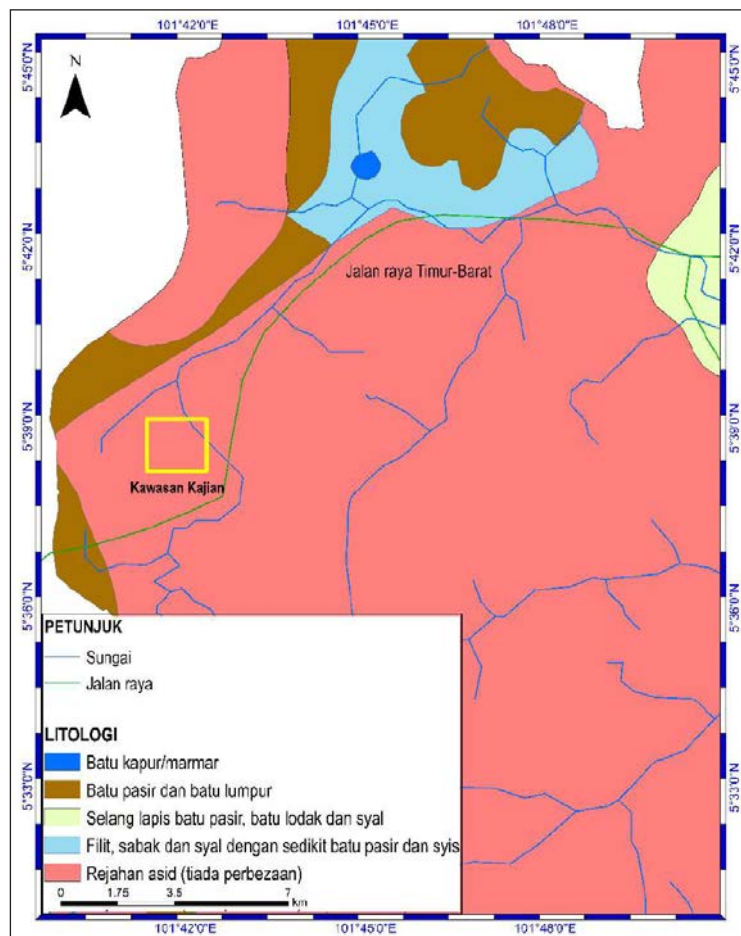
Sepanjang garis survei, catatan lapangan pada bahagian dinding dilakukan untuk melihat sebarang fitur atau maklumat penting yang boleh membantu dalam proses tafsiran. Pemetaan struktur menggunakan kaedah pemetaan tettingkap dengan bantuan gambar mozoik. Dua maklumat yang diberi penekanan ialah satah ketakselajaran dan kawasan resapan air. Cerapan satah ketakselajaran hanya boleh dilakukan pada bahagian dinding yang tidak ditutupi oleh lapisan shotcrete (Rajah 3). Maklumat satah ketakselajaran yang dicerap boleh digunakan untuk menafsirkan keadaan jasad batuan di kawasan yang ditutupi oleh shotcrete. Lokasi zon resapan air yang berlaku di sepanjang terowong juga ditanda.

Tafsiran imej satelit

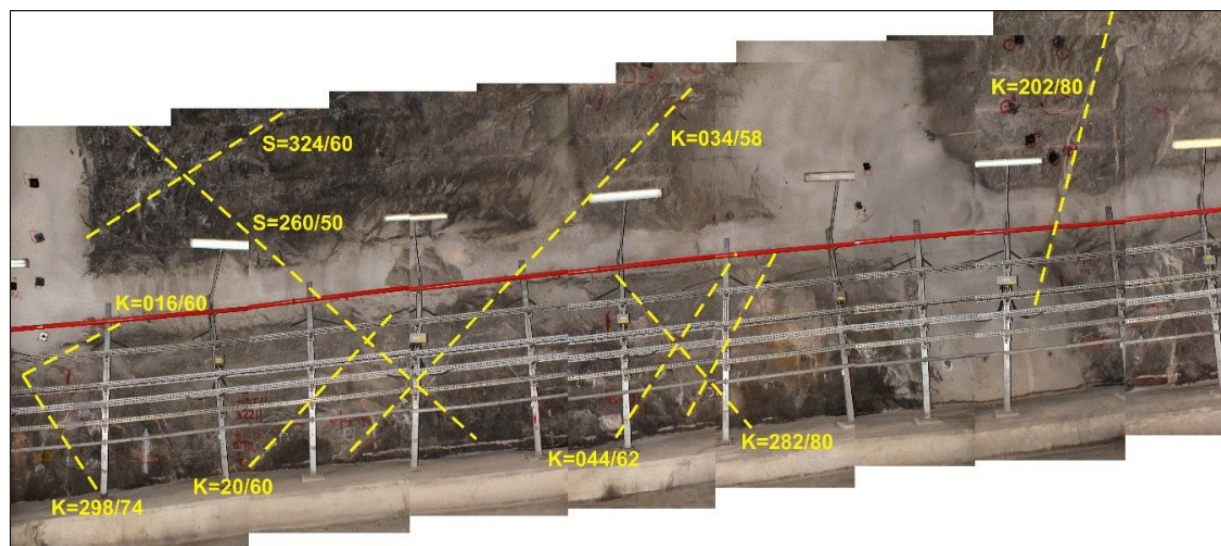
Penggunaan imej satelit dalam kajian geologi semakin berkembang dan digunakan secara meluas dalam bidang geologi. Imej satelit yang berkualiti dan beresolusi tinggi boleh memberi maklumat penting, seperti kehadiran lineamen dalam kes ini (Ghani *et al.*, 2016). Tafsiran lineamen bertujuan untuk mendapatkan maklumat rantau taburan, orientasi dan ketumpatan struktur dalam kawasan kajian. Lineamen ditakrifkan sebagai fitur lurus dalam bentuk landskap muka bumi yang mewakili struktur geologi seperti



Rajah 1: a) Jajaran terowong yang dibina; b dan c) Keadaan sekitar dalam terowong utama.



Rajah 2: Peta geologi kawasan kajian (Jabatan Mineral dan Geosains, 2014).



Rajah 3: Penggunaan gambar mozoik semasa pemetaan struktur menggunakan kaedah tettingkap di lapangan. Contoh pemetaan yang dilakukan dalam terowong utama pada CH 420-440 (K=Kekar, S=Sesar).

sesar (Huggett, 2007). Secara dasar, lineamen diwakili oleh lurah yang selari dengan orientasi sesar, siri perbukitan yang selari dengan sesar atau lipatan, garis pantai yang lurus, ataupun gabungan fitur-fitur tersebut (O'leary *et al.*, 1976). Jasad batuan yang terkesan dengan lineamen akan mempunyai kadar retakan atau kepadatan kehancuran yang lebih tinggi berbanding dengan kawasan yang tidak terkesan dengan lineamen (Hamzah Hussin & Tajul Anuar Jamaluddin, 2011; Hussin *et al.*, 2017).

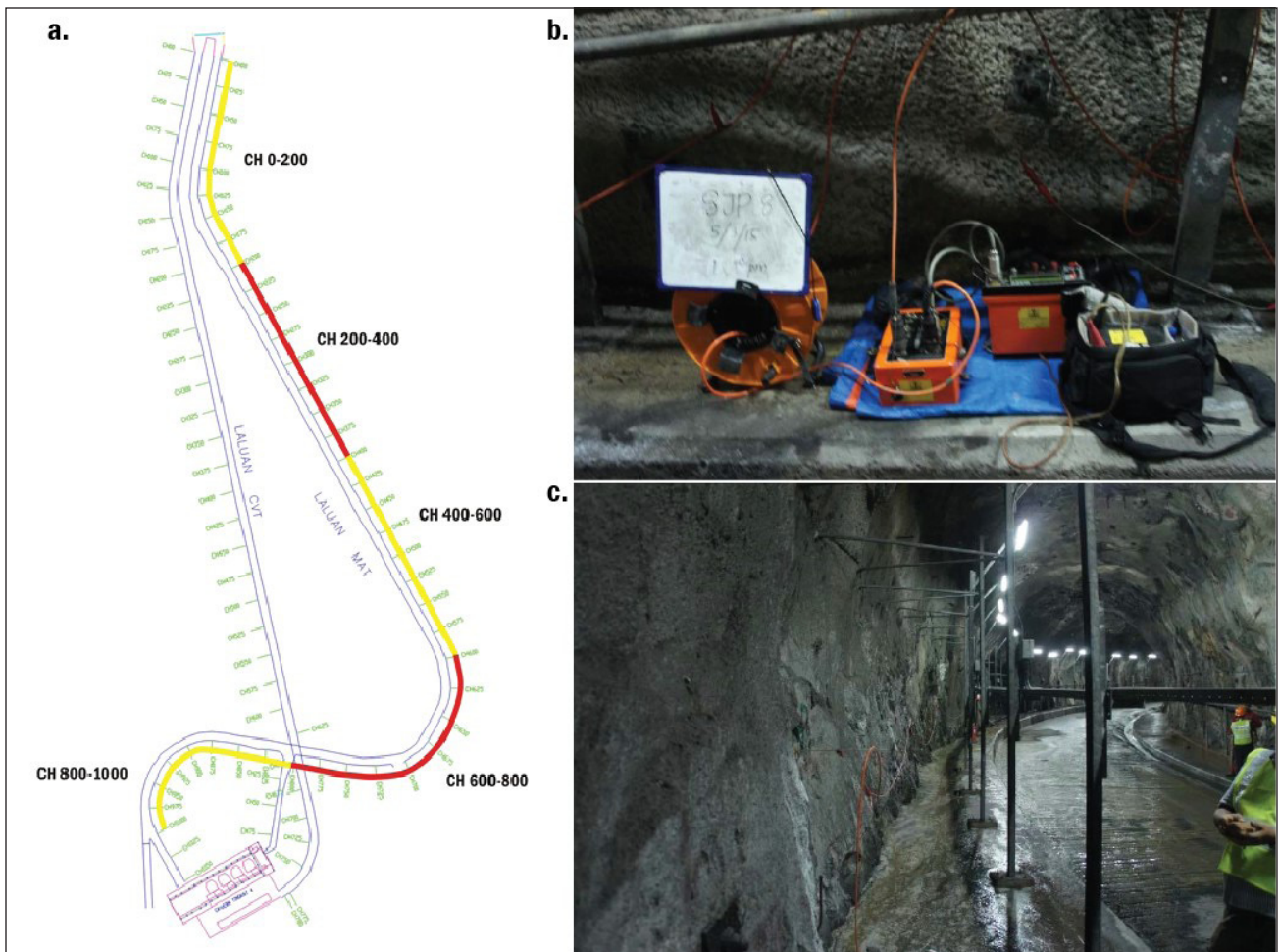
Tafsiran lineamen dilakukan menggunakan imej satelit yang dimuat turun daripada pengkalan data ArcGIS dengan skala 1:15,000. Tafsiran dilakukan secara manual dan kemudian didigitkan dalam perisian ArcGIS. Dalam kajian ini, hanya lineamen negatif yang disurih kerana lineamen jenis ini dikaitkan dengan kehadiran sesar atau zon ricih di lapangan. Kehadiran sesar di lapangan boleh mempengaruhi secara langsung kekuatan jasad batuan kerana jasad batuan tersebut biasanya hancur, mempunyai ketumpatan ketakselajaran yang tinggi, serta sering menjadi laluan pengaliran air bawah tanah (Hamzah Hussin *et al.*, 2017).

Survei tomografi keberintangan geoelektrik

Keberintangan geoelektrik merupakan satu kaedah yang berdasarkan pengukuran perbezaan keupayaan antara dua titik di atas permukaan bumi hasil daripada pengaliran arus elektrik yang bergerak di bawah subpermukaan bumi. Tomografi keberintangan geoelektrik secara asas menggunakan empat elektrod iaitu elektrod arus dan elektrod keupayaan. Elektrod arus bertindak sebagai konduktor untuk mengalirkan elektrik dari elektrod 1 (C1) ke elektrod kedua (C2). Empat susunan elektrod yang sering digunakan iaitu Wenner, Schlumberger, Dwikutub-dwikutub dan Kutub-dwikutub.

Nilai keberintangan dikawal oleh porositi, jumlah kandungan air, kandungan mineral lempung dan nilai keberintangan air bawah tanah dalam retakan atau sesar (Matsui *et al.*, 2000). Faktor ini membolehkan satu jenis batuan boleh mempunyai nilai keberintangan dalam julat yang besar, contohnya daripada 1000-10000000 Ωm . Ciri ini sangat berguna untuk mengesan zon retakan yang wujud dalam jasad batuan. Sifat batuan sedimen yang mempunyai nilai porositi dan kandungan air yang lebih tinggi menyebabkan nilai keberintangan menjadi lebih rendah iaitu hampir 50 hingga 10,000 Ωm (Keller & Frischknecht (1966) dan Telford *et al.* (1990)). Sedimen umumnya mempunyai nilai keberintangan yang paling rendah berbanding dengan batuan igneus, metamorfik dan sedimen. Nilai keberintangannya berjulat daripada 1000 Ωm hingga kurang daripada 10 Ωm .

Sebanyak 10 garis survei berkepanjangan 200 m setiap satu dengan jarak antara elektrod 5 m dilakukan di sepanjang terowong utama di kedua-dua belah bahagian dinding (Rajah 4). Setiap garis survei bersambung dari hujung ke hujung yang membolehkan satu profil keberintangan geoelektrik di dalam jasad batuan yang lengkap dapat dihasilkan. Survei menggunakan sistem ABEM SAS 4000. Permukaan jasad batuan yang terdiri daripada batuan granit yang keras dan diliputi oleh lapisan shotcrete menyebabkan setiap lubang untuk memasang elektrod perlu digerudi. Sebanyak 41 batang elektrod perlu digunakan untuk satu garis survei. Klip wayar digunakan untuk menyambungkan batang elektrod kepada gelung kabel multi teras untuk melengkapkan satu litar elektrik. Gelung kabel multi teras disambungkan kepada sistem LUND ES464. Sistem LUND ES464 berfungsi untuk memilih secara automatik empat elektrod aktif yang digunakan untuk pengukuran satu datum data. Sistem ABEM Sistem LUND ES464 disambungkan ke ABEM Terrameter SAS



Rajah 4: a) Peta lokasi survei tomografi keberintangan elektrik dilakukan; b) sistem ABEM SAS 4000 dalam kajian; c) Pengukuran data di lapangan.

4000 dan bateri. Bateri berfungsi untuk membekalkan arus dan membolehkan alat beroperasi.

Susunatur dwikutub-dwikutub telah digunakan dalam kajian kajian ini. Kesemua data yang telah diukur disimpan dalam memori dalam bentuk format S4K. Data lapangan dalam format S4K ini dipindahkan daripada ABEM SAS4000 ke dalam komputer menggunakan kabel RS232 dengan rutin *transfer* dan input data. Data kemudiannya ditukarkan kepada format (.dat) bagi membolehkannya dianalisis menggunakan perisian Res2DINV yang dihasilkan oleh Geotomo Software. Program ini menggunakan kaedah pengiraan *2D finite element*.

Perisian Res2DINV membahagikan data daripada survei subpermukaan secara automatik kepada beberapa blok dan seterusnya membina satu model 2D bawah permukaan untuk setiap blok. Kaedah *least squares inversion* digunakan untuk menentukan nilai kerintangan bersesuaian dengan setiap blok dan seterusnya menghasilkan keratan pseudo bagi tujuan pengimejan. Penerangan yang lebih lengkap mengenai pengoperasian perisian Res2DINV boleh dirujuk kepada Loke (2004). Keratan rentas pseudo yang telah siap

diproses ditafsirkan berdasarkan kepada nilai keberintangan bahan bumi berdasarkan nilai yang dicadangkan oleh Keller & Frischknecht (1966) dan Telford *et al.* (1990).

DAPATAN KAJIAN

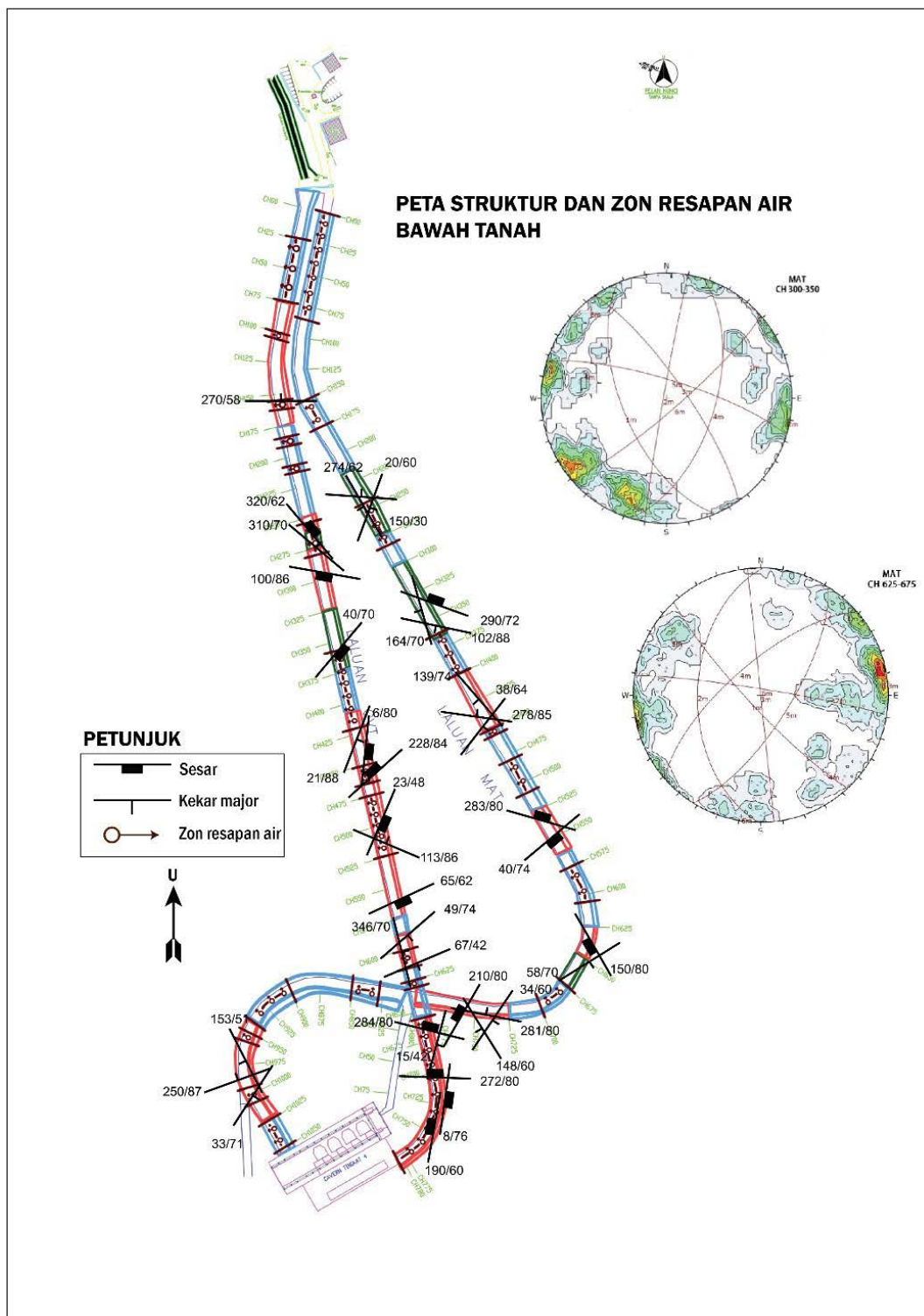
Pemetaan lapangan

Pemetaan struktur menunjukkan kekar, sesar dan zon ricih merupakan tiga jenis ketakselajaran yang terbentuk di kawasan kajian. Kehadiran satah ketakselajaran yang padat dan rapat, serta kadar pengaliran air bawah tanah yang tinggi dalam jasad batuan ditafsirkan berasosiasi dengan zon sesar utama atau lineamen. Dua arah utama sesar yang dijumpai disepanjang towong iaitu selari dan berserenjang dengan jajaran terowong. Analisis data ketakselajaran pada kedudukan CH 300-350 dan CH 625-675 menggunakan perisian DIPS versi 6.016 menunjukkan kehadiran enam set satah ketakselajaran.

Pemetaan zon resapan air menemukan empat keadaan resapan iaitu mengalir, menitis laju, menitis perlahan dan lembap. Resapan air yang mengalir dan menitis laju sangat biasa dijumpai sepanjang terowong manakala menitis perlahan

dan lembap sedikit kurang dijumpai. Kawasan berlakunya resapan air ini selalunya boleh dicerap mendapan mineral iaitu kalsit. Pemetaan menunjukkan hampir 50% daripada panjang terowong utama mengalami masalah resapan air.

Kehadiran air ke dalam terowong menyebabkan berlaku masalah berkaitan terutamanya kakisan kepada struktur sokongan terowong seperti bolt batuan. Ringkasan dapatan daripada pemetaan terowong ditunjukkan dalam Rajah 5.



Rajah 5: Ringkasan struktur sesar dan kekar major serta lokasi resapan air yang di sepanjang dinding-dinding terowong.

Tafsiran lineamen

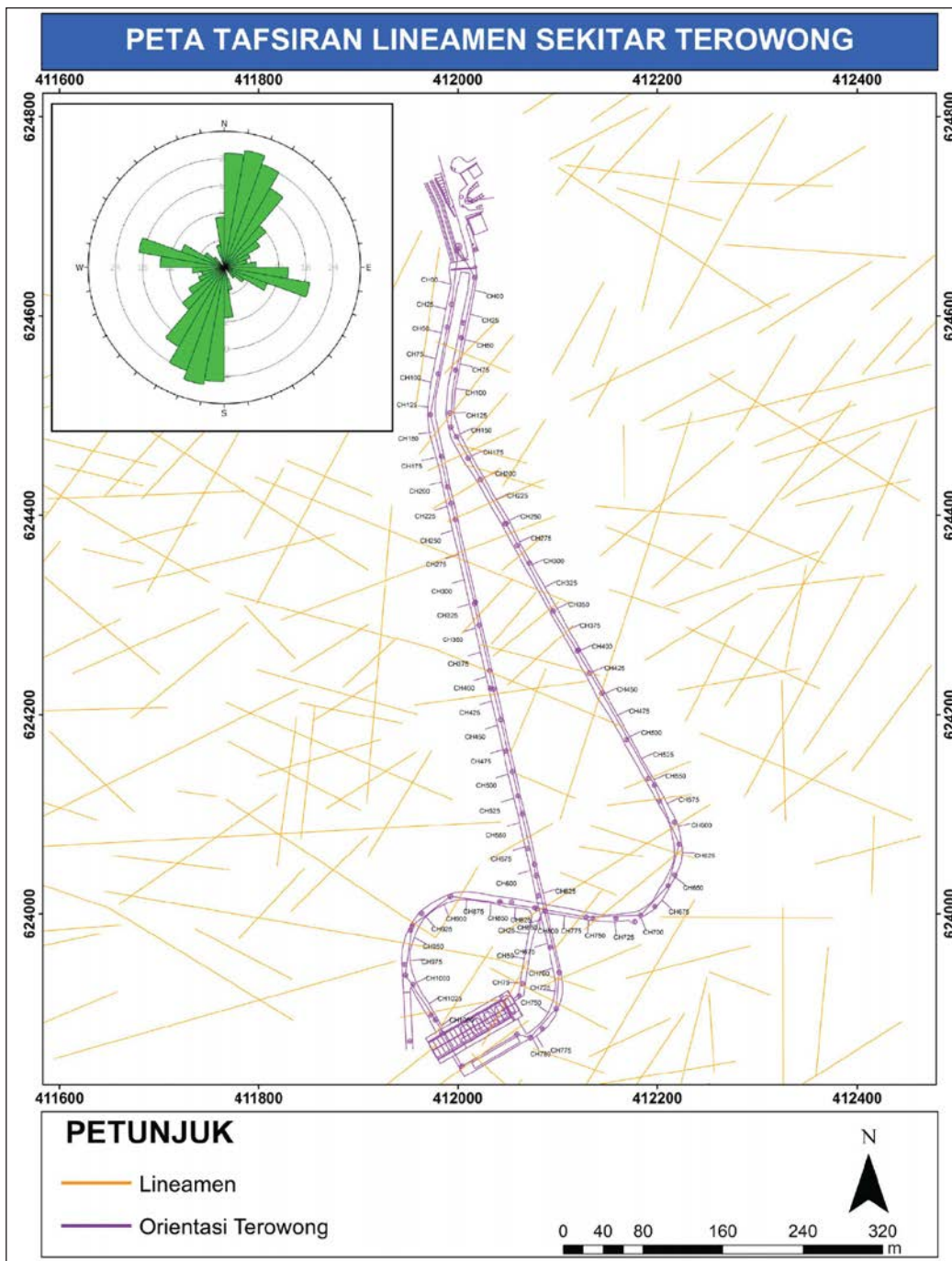
Peta surihan lineamen ditunjukkan dalam Rajah 6. Analisis gambarajah ros menunjukkan empat set lineamen iaitu utara-selatan, timur-barat timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Arah timur laut-barat daya merupakan arah yang dominan berbanding dengan orintasi yang lain. Tafsiran ini selari dengan orientasi struktur yang ditafsirkan dalam peta geologi oleh Jabatan Mineral dan Geosains (2014) dan Pour & Hashim (2017).

Peta lineamen menunjukkan kehadiran lineamen dikesan merentasi jajaran terowong terutamanya dari CH 50-375 dan CH 550-800. Pada kawasan lain, kehadiran lineamen

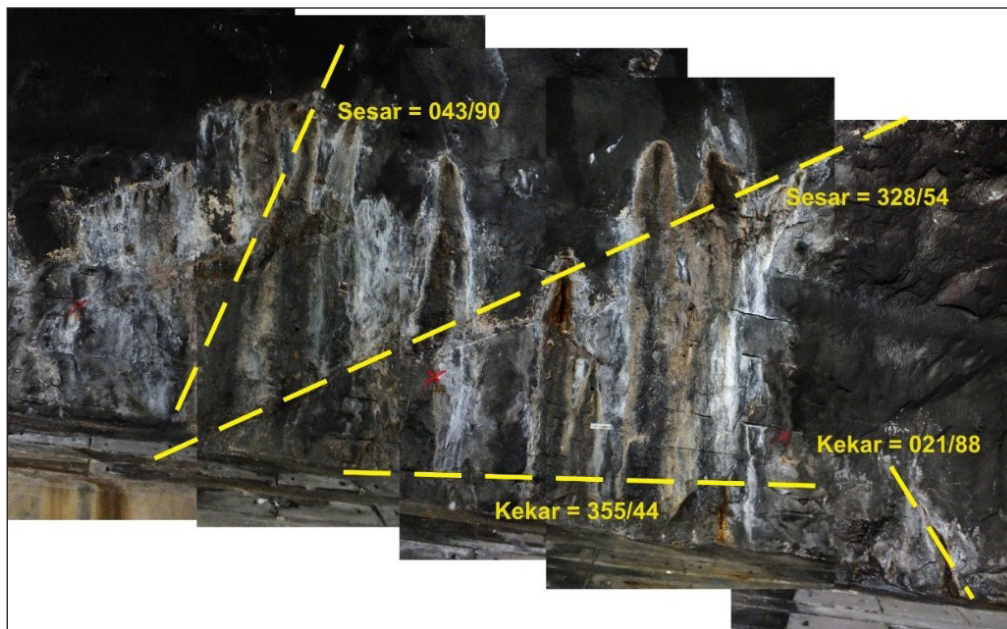
adalah kurang. Ketepatan tafsiran lineamen ditentusahkan di lapangan. Cerapan lapangan di bahagian yang tidak ditutupi oleh shotcrete menunjukkan lineamen yang ditafsirkan diwakili oleh sesar dan selalunya berasosiasi dengan resapan air bawah tanah (Rajah 7). Berdasarkan dapatan ini, boleh disimpulkan resapan air yang berlaku ke dalam terowong adalah dikawal oleh kehadiran lineamen.

Tafsiran geologi keratan rentas pseudo

Sebanyak 10 profil keratan rentas pseudo tomografi keberintangan geoelektrik telah ditafsirkan sepanjang terowong utama dengan lima profil masing-masing untuk



Rajah 6: Peta surihan lineamen yang ditafsirkan daripada imej satelit.



Rajah 7: Pengaruh satah sesar dan kekar yang memainkan peranan penting sebagai kawasan laluan keluar air bawah tanah ke dalam terowong.

dinding sebelah kiri dan kanan. Kompilasi keseluruhan tafsiran survei keberintangan elektik sepanjang terowong utama di tunjukkan dalam Rajah 8. Keseluruhan profil menunjukkan kehadiran tiga bahan yang berbeza iaitu batuan granit kurang terkekar ($> 1500 \Omega.m$), batuan granit terkesan lineamen dan terkekar kuat ($100-500 \Omega.m$) dan zon tinggi kandungan air ($< 25 \Omega.m$).

Batuan granit kurang terkekar

Bahan bumi yang berkeberintangan tinggi ditafsirkan sebagai jasad batuan granit kurang terkekar. Zon batuan granit ini dikesan kewujudannya pada semua keratan rentas pseudo tetapi keluasan dan kedalaman dari permukaan dinding terowong berbeza antara satu samalain. Keratan rentas pseudo untuk CH 200-400, CH 400-600 dan CH 600-800 menunjukkan kehadiran jasad batuan granit yang jelas berbanding dengan CH 0-200 dan CH 800-1000. Dinding sebelah kanan pada CH 400-440 menunjukkan nilai keberintangan tinggi dari permukaan terowong hingga kedalaman maksimum keratan rentas pseudo iaitu 25 m. Cerapan lapangan dilakukan untuk melihat keadaan sebenar jasad batuan. Pemerhatian menunjukkan permukaan jasad batuan umumnya adalah kering atau sedikit lembap serta mempunyai jumlah kekar dan sesar yang kurang (Rajah 9). Bukaan ketakselanjarian biasanya ketat. Berdasarkan kepada cirian ini, jasad batuan granit di kawasan lain dalam keratan rentas pseudo dianggap mempunyai sifat yang sama. Keadaan jasad batuan yang berciri sedemikian boleh dikatakan berada dalam keadaan baik (Danielsen & Dahlin, 2009).

Dinding sebelah kanan pada kedudukan CH 400-440 menunjukkan nilai keberintangan tinggi dari permukaan

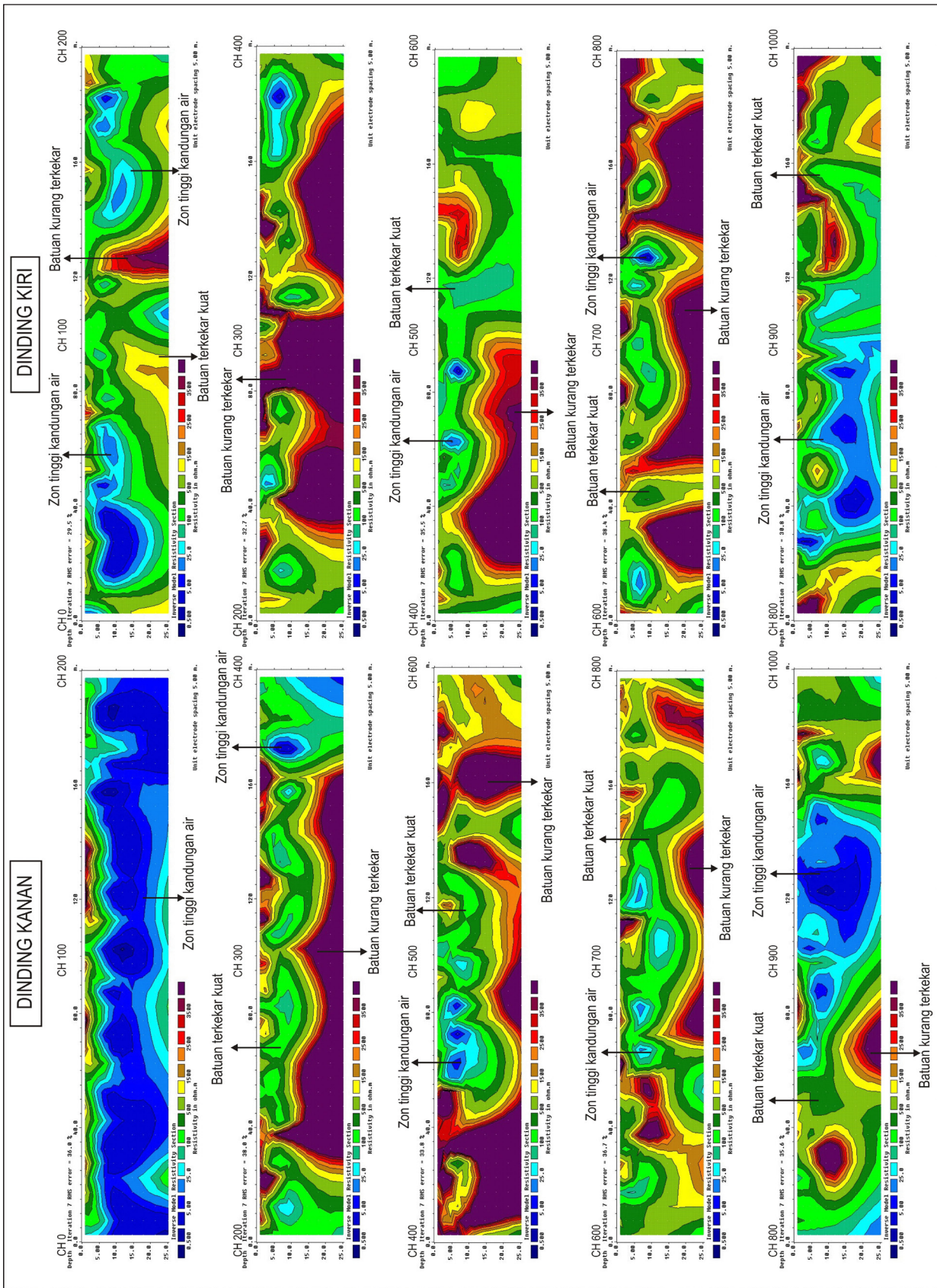
terowong hingga kedalaman maksimum keratan rentas pseudo iaitu 25 m. Cerapan lapangan dilakukan untuk melihat keadaan sebenar jasad batuan. Pemerhatian menunjukkan permukaan jasad batuan umumnya adalah kering atau sedikit lembap serta mempunyai jumlah kekar dan sesar yang kurang. Bukaan ketakselanjarian biasanya ketat. Berdasarkan kepada cirian ini, jasad batuan granit di kawasan lain dalam keratan rentas pseudo dianggap mempunyai sifat yang sama. Keadaan jasad batuan yang berciri sedemikian boleh dikatakan berada dalam keadaan baik (Danielsen & Dahlin, 2009).

Batuan granit terkesan lineamen dan terkekar kuat

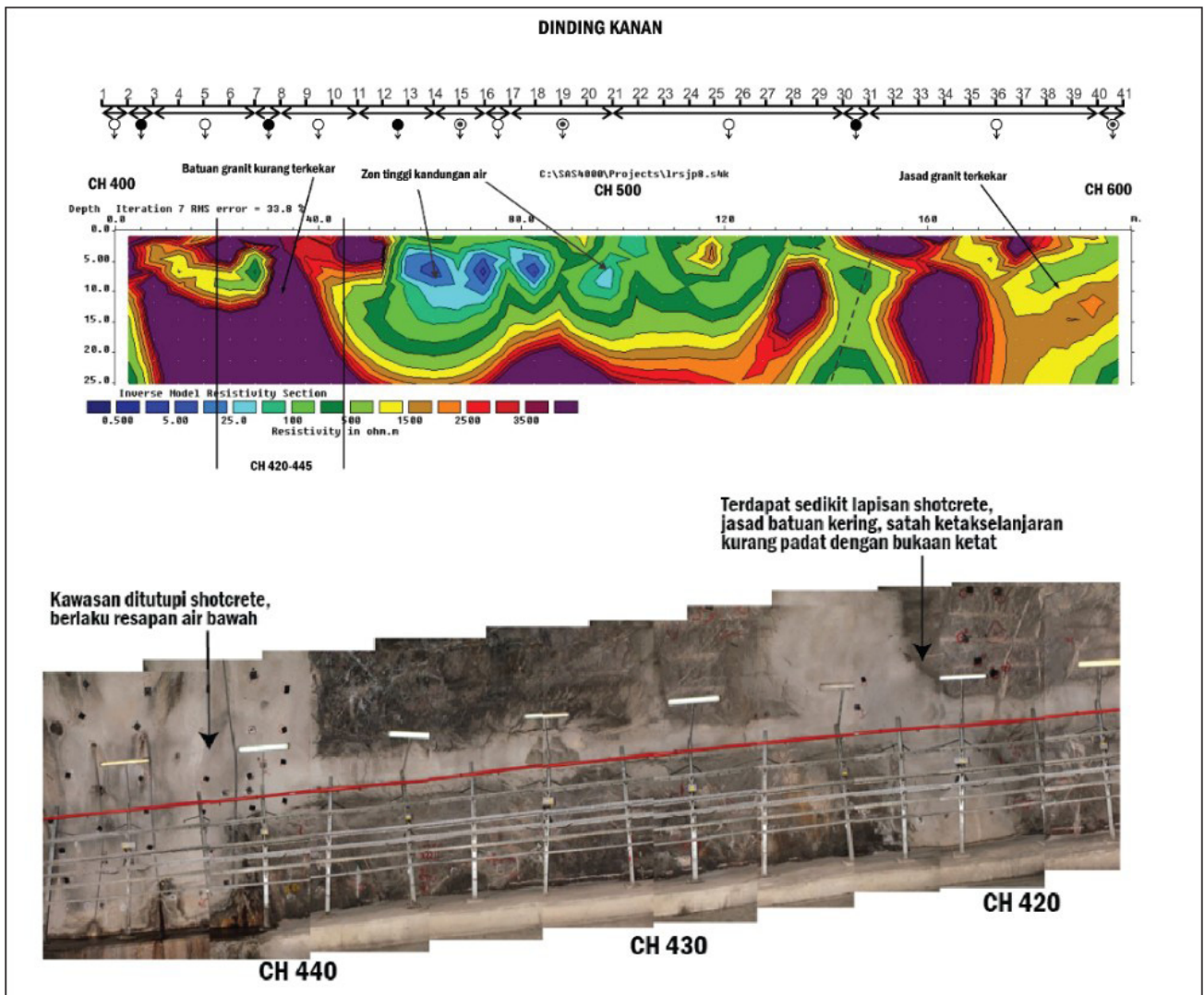
Zon berkeberintangan sederhana berjulat antara $100-500 \Omega.m$ secara umumnya boleh dilihat dalam setiap keratan rentas pseudo. Bahan bumi yang mempunyai nilai keberintangan sederhana ini ditafsirkan sebagai zon yang terkesan oleh struktur lineamen. Perbandingan antara keratan rentas pseudo dengan taburan lineamen dilakukan untuk melihat sebarang hubungan antara keduanya. Hasil perbandingan ditunjukkan dalam Rajah 10. Perbandingan menunjukkan kawasan jasad batuan yang terkesan dengan lineamen mempunyai nilai keberintangan yang lebih rendah berbanding dengan jasad batuan yang tidak terkesan oleh lineamen. Jika zon lineamen ini terisi oleh takungan air, nilai keberintangannya menjadi semakin rendah iaitu kurang daripada $500 \Omega.m$.

Zon tinggi kandungan air

Zon berkeberintangan rendah ditafsirkan sebagai kawasan yang mempunyai kandungan air yang tinggi dalam jasad batuan. Dua keadaan dikaitkan dengan zon



Rajah 8: Tafsiran tomografi keberintangan geoelektrik dalam terowong utama dari CH 0-1000.



Rajah 9: Keadaan jasad batuan di lapangan menunjukkan keadaan jasad batuan granit pada CH 390-410 yang mempunyai nilai keberintangan tinggi.

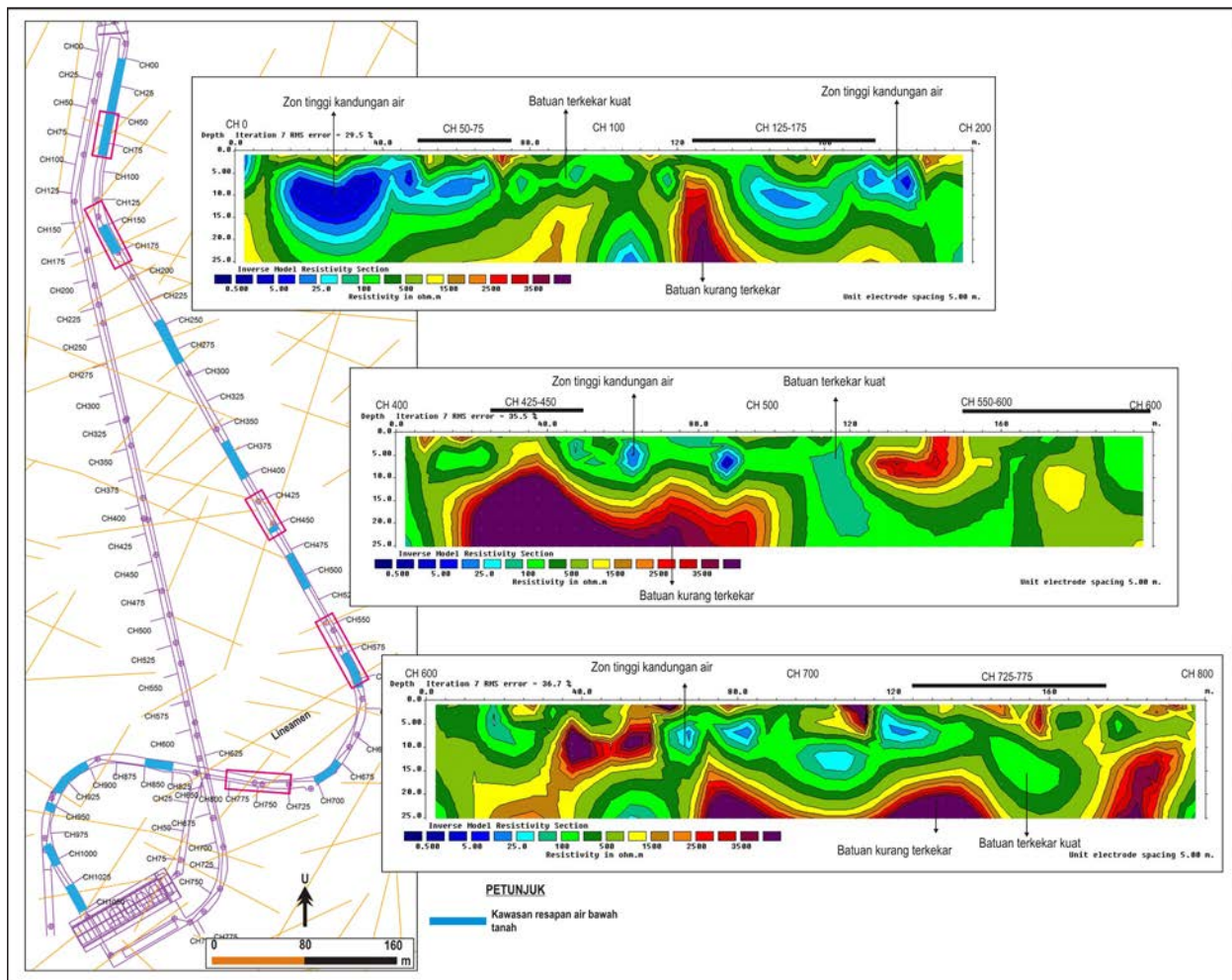
tinggi kandungan air dalam kajian ini iaitu kesan daripada resapan air permukaan ke dalam jasad batuan dan asosiasi dengan zon lineamen atau sesar. Zon kandungan air dikesan dalam setiap rentas pseudo terutamanya pada CH 0-200 dan CH 800-1000. Air bawah tanah untuk CH 0-200 ditafsirkan sebagai kesan daripada resapan air dari permukaan bumi ke dalam jasad batuan kerana jarak antara terowong dengan permukaan adalah dekat. Keadaan bahan bumi yang terluluhawa tinggi dan bersifat tanah membolehkan resapan berlaku jauh ke dalam sehingga terus ke dalam terowong. Kawasan kandungan tinggi air yang diperlihatkan pada CH 800-1000 berlaku dalam jasad batuan yang terkesan oleh lineamen. Pola yang sama juga boleh dilihat dalam keratan rentas pseudo lain sepanjang terowong ini (Rajah 11). Nilai keberintangan rendah disebabkan oleh sifat air yang merupakan konduktor elektrik yang baik.

PERBINCANGAN

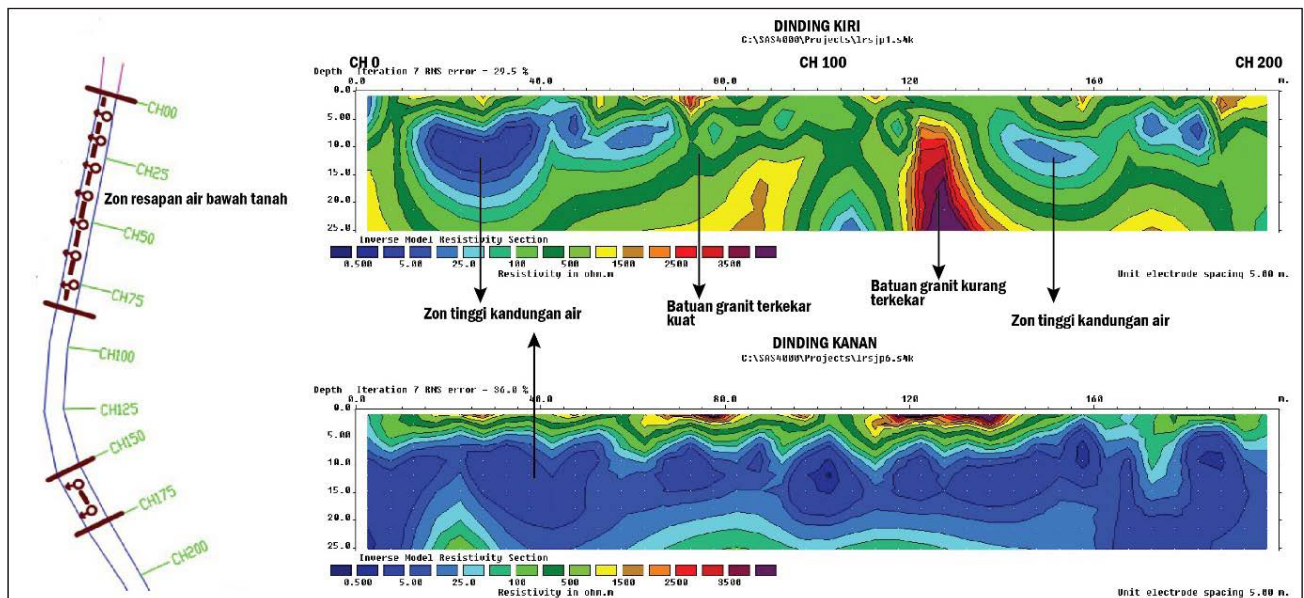
Tafsiran daripada survei tomografi keberintangan geoelektrik menunjukkan kehadiran tiga nilai yang berbeza yang mewakili tiga bahan bumi yang berlainan. Tiga bahan yang ditafsirkan boleh diringkaskan seperti berikut (Jadual 1):

Jadual 1: Tafsiran jenis bahan berdasarkan kepada nilai keberintangan elektrik

Nilai keberintangan	Penerangan
Berkeberintangan tinggi (> 1500 Ω.m)	Jasad batuan granit yang segar dan kurang ketakselajaran
Berkeberintangan sederhana (100-500 Ω.m)	Jasad batuan yang terkesan dengan lineamen. Jumlah satah ketakselajaran lebih tinggi
Berkeberintangan rendah (< 25 Ω.m)	Zon kandungan tinggi air



Rajah 10: Perbandingan antara keratan rentas pseudo dengan tafsiran lineamen pada tiga kawasan yang berbeza iaitu pada CH 0-200, CH 400-600 dan CH 600-800.



Rajah 11: Zon kandungan tinggi air yang ditafsirkan daripada survei tomografi keberintangan geoelektrik. Cerapan lapangan menunjukkan kawasan tersebut basah dengan aliran air.

Berdasarkan kepada nilai dan tafsiran ini, nilai keberintangan bahan dipengaruhi oleh dua faktor iaitu kepadatan satah ketakselajaran dan kandungan air. Satah ketakselajaran yang terdiri daripada kekar dan sesar terhasil daripada aktiviti tektonik. Pembentukan struktur ini menyebabkan jasad batuan yang masif retak kepada bentuk blok. Ruang kosong antara satah ketakselajaran membolehkan pembentukan mineral sekunder atau lembapan terkumpul. Bahan ini boleh bertindak sebagai pengalir elektrik sekaligus merendahkan nilai keberintangan.

Jika jumlah lembapan air terkumpul di antara celahan ketakselajaran, maka nilai keberintangan elektik menjadi lebih rendah. Jumlah air yang banyak dalam jasad batuan boleh meningkatkan potensi geobahaya. Pengenalpastian kawasan yang mengandungi jumlah air yang banyak membolehkan langkah kawalan dilakukan seperti memasang sistem saluran tambahan untuk mempercepatkan pengaliran keluar air tersebut dari jasad batuan. Jasad batuan granit yang bersifat masif atau kurang ketakselajaran menunjukkan nilai keberintangan yang tinggi. Dapatan ini selari dengan hasil kajian terdahulu seperti Keller & Frischknecht (1966) dan Telford *et al.* (1990).

Persamaan dapatan daripada survei tomografi keberintangan geoelektrik dengan tafsiran lineamen dan pemetaan lapangan menunjukkan kebolegunaan ketiga-tiga kaedah ini untuk melengkapkan antara satu sama lain. Tafsiran lineamen dan pemetaan lapangan membantu dalam tafsiran keratan rentas pseudo manakala survei tomografi keberintangan geoelektrik boleh menentusahkan ketepatan tafsiran lineamen yang telah dilakukan.

KESIMPULAN

Survei tomografi keberintangan geoelektrik merupakan satu kaedah yang boleh digunakan untuk mencirikan jasad batuan. Dalam kajian ini, penggunaan survei tomografi keberintangan geoelektrik boleh disimpulkan seperti berikut:

Jenis dan keadaan bahan batuan yang terlindung dibalik lapisan shotcrete boleh ditentukan berdasarkan kepada nilai keberintangan bahan tersebut. Maklumat ini sangat penting terutamanya untuk mengenalpasti kawasan lemah atau bermasalah seperti zon lineamen atau zon tinggi kandungan air.

Kehadiran zon lineamen boleh memberi kesan kepada nilai keberintangan di kawasan tersebut. Peningkatan jumlah ketakselajaran di kawasan yang terkesan dengan lineamen menyebabkan nilai keberintangan menjadi lebih rendah. Keadaan ini boleh disumbangkan oleh kehadiran lembapan di antara retakan yang sering menjadi laluan kepada air bawah tanah.

Kandungan air yang tinggi boleh dikenalpasti kedudukannya dalam jasad batuan. Dalam kes batuan granit, zon kandungan tinggi air berasosiasi dengan zon lineamen kerana kehadiran sistem retakan memudahkan proses pengumpulan atau pengaliran.

Tafsiran keratan rentas pseudo perlu berdasarkan kepada data tambahan, seperti cerapan lapangan atau tafsiran imej satelit. Maklumat ini boleh membantu proses tafsiran data keberintangan elektrik dilakukan dengan lebih tepat dan bermaklumat. Ini kerana satu julat nilai keberintangan boleh diwakili oleh pelbagai jenis bahan yang berlainan.

PENGHARGAAN

Terima kasih diucapkan kepada staf Geo Technology Resources Sdn Bhd dan staf sokongan program geologi UKM yang membantu semasa kerja lapangan dijalankan. Kajian ini dibiayai menggunakan dana penyelidikan dari Universiti Kebangsaan Malaysia (ST-2015-004) dan Universiti Malaysia Kelantan (R/GETR/A08.00/01037A/002/2015/000274).

RUJUKAN / REFERENCES

- Arifin, M.H., Samsudin, A.R., Umor, M.R., & Husin, H., 2011. 2-D resistivity survey for cavity detection at Chiku 5, Gua Musang, Kelantan. In: N.T. Fatt (Ed.), National Geoscience Conference (pp. 71–72), Johor. Persatuan Geologi Malaysia.
- Aydan, Ö., Ulusay, R. & Tokashiki, N., 2014. A new rock mass quality rating system: rock mass quality rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(4), 1255–1276.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York. 251 p.
- 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>.
- Danielsen, B.E. & Dahlin, T., 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel, Sweden. *Engineering Geology*, 107(3–4), 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.005>.
- Gélis, C., Revil, A., Cushing, M.E., Jougnot, D., Lemeille, F., Cabrera, J., A. De Hoyos & Rocher, M., 2010. Potential of Electrical Resistivity Tomography to Detect Fault Zones in Limestone and Argillaceous Formations in the Experimental Platform of Tournemire, France. *Pure and Applied Geophysics*, 167(11), 1405–1418. <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0097-x>.
- Ghani, M.F.A., Simon, N., Lai, G.T., Mohamed, T.R.T. & Rafek, A.G., 2016. Kajian Ketumpatan Lineamen dalam Penilaian Potensi Jatuhan Batuan di Kawasan Lembah Kinta. *Sains Malaysiana*, 45(12), 1887–1896.
- Hamzah Hussin, Mohd Hariri Ariffin, Mohd Amir Asyraf Sulaiman & Nurhazren Fauzi, 2017. Effectiveness of 2-D Resistivity Survey to Identify Lineament (Fault) from Photolineament Interpretation – Case Study at Kampung Dato’ Mufti, Ampang, Selangor. *J. Trop. Resour. Sustain. Sci.*, 5, 1–8.
- Hamzah Hussin & Tajul Anuar Jamaluddin, 2011. Kajian fotograf udara untuk geologi kejuruteraan cerun di kawasan Bukit Chendering, Kuala Terengganu. In: National Geoscience Conference (p. 39), Johor Bahru. Persatuan Geologi Malaysia.
- Huggett, R.J., 2007. *Fundamentals of Geomorphology* (2nd ed.). Taylor & Francis, London. 458 p.
- Hussin, H., Fauzi, N., Jamaluddin, T.A., & Arifin, M.H., 2017. Rock Mass Quality Effected by Lineament Using Rock Mass

- Rating (RMR) – Case Study from Former Quarry Site. *Earth Science Malaysia*, 1(2), 13–16.
- Jabatan Mineral dan Geosains, 2014. *Peta Geologi Semenanjung Malaysia Edisi ke 9. Skala 1:500,000, Edisi Ke-14*.
- Keller, G.V. & Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford. 519 p.
- Loke, M. H., 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Geotomo Software, Penang.
- Matsui, T., Park, S.G., Park, M.K. & Matsuura, S., 2000. Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks. In: *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.
- Moffat, R., Jadue, C., Beltran, J. F. & Herrera, R., 2017. Experimental evaluation of geosynthetics as reinforcement for shotcrete. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(3), 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.01.007>.
- Mohamaden, M.I.I., Hamouda, A.Z. & Mansour, S., 2016. Application of electrical resistivity method for groundwater exploration at the Moghra area, Western Desert, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 42(3), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2016.06.002>.
- Nazaruddin, D.A., Amiruzan, Z.S., Hussin, H. & Jafar, M.T.M., 2017. Integrated geological and multi-electrode resistivity surveys for groundwater investigation in Kampung Rahmat village and its vicinity, Jeli district, Kelantan, Malaysia. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 23–32.
- O’leary, D.W., Friedman, J.D., & Pohn, H.A., 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, 87(10), 1463–1469.
- Owen, R.J., Gwavava, O., & Gwaze, P., 2006. Multi-electrode resistivity survey for groundwater exploration in the Harare greenstone belt, Zimbabwe. *Hydrogeology Journal*, 14(1–2), 244–252.
- Pour, A.B., & Hashim, M., 2017. Application of Landsat-8 and ALOS-2 data for structural and landslide hazard mapping in Kelantan, Malaysia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7), 1285–1303.
- Schwingschloegl, R., & Lehmann, C., 2009. Swelling rock behaviour in a tunnel: NATM-support vs. Q-support – A comparison. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.08.007>.
- Selvarani, A.G., Elangovan, K., & Kumar, C.S., 2016. Evaluation of groundwater potential zones using electrical resistivity and GIS in Noyyal river basin, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India*, 87(5), 573–582.
- Shinji, M., Akagi, W., Shiroma, H., Yamada, A., & Nakagawa, K., 2002. *JH Method Of Rock Mass Classification For Tunnelling*. In: *ISRM International Symposium - EUROCK 2002* (pp. 375–383). International Society for Rock Mechanics. Madeira, Portugal
- Siti, N.M., Mohd, H.A., Abd, R.H., & Abdul, R.S., 2011. Geo electrical Resistivity Survey for Ancient Tunnel Detection at Bukit Tenggek, Setiu, Terengganu. *Sains Malaysiana*, 40(11), 1223–1229.
- Son, Y., Oh, M. & Lee, S., 2010. Estimation of soil weathering degree using electrical resistivity. *Environmental Earth Sciences*, 59(6), 1319–1326. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0119-0>.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge. 770 p.
- The Malaysian and Thai Working Groups, 2006. *Geology of the Batu Melintang-Sungai Kolok Transect Area along the Malaysia – Thailand Border*.

Manuscript received 30 November 2018
Revised manuscript received 18 June 2019
Manuscript accepted 24 January 2020