

Penentuan Potensi Air Bawah Tanah Menggunakan Kaedah Keberintangan Geoelektrik dan Pengutuban Teraruh di Kawasan Terpilih Sekitar Lembangan Sungai Klang

(Determination of Groundwater Potential Using Geoelectrical Resistivity Method and Induced Polarization in Selected Areas around the Klang River Basin)

MOHD HARIRI ARIFIN¹, AZLAN SHAH NERWAN SHAH^{2*}, MAISARAH ABD MALEK¹, WAN NIK HAIKAL³, MAZATUL AKMA AROS³, TUAN RUSLI TUAN MOHAMED³, NURUL AIN CHE ZAKARIA¹, NOR SHAHIDAH MOHD NAZER¹ & NORSYAFINA ROSLAN¹

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

²*Kumpulan Teknologi Bahan, Bahagian Teknologi Industri, Agensi Nuklear Malaysia, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia*

³*Jabatan Mineral dan Geosains Malaysia (Selangor/ Wilayah Persekutuan), Tingkat 6 & 7, Bangunan Darul Ehsan, Seksyen 14, 40000 Shah Alam, Selangor*

Diserahkan: 23 Februari 2022/Diterima: 19 November 2025

ABSTRAK

Kepesatan pembangunan dan peningkatan populasi penduduk di Lembangan Sungai Klang menuntut keperluan penerokaan sumber air alternatif yang lebih terjamin. Kajian ini menilai potensi air bawah tanah di kawasan batu kapur dan batu metasedimen di sekitar Surau Ad Dinniyah (Batu Caves), Kg. Malaysia Tambahan (Sungai Besi), Jariah Agro Farm (Shah Alam), Masjid Raja Al Fisabilillah (Cyberjaya) dan Universiti Malaya Perdana Siswa (Petaling Jaya) menggunakan gabungan kaedah keberintangan geoelektrik 2D, pengutuban teraruh (IP) dan korelasi data lubang gerudi. Beberapa garis survei merentasi Formasi Batu Kapur Kuala Lumpur dan Formasi Bukit Kenny direkodkan dengan nilai ralat RMS model songsangan antara 19.8% hingga 48.7%. Julat keberintangan yang diperoleh ialah 0.5–5000 Ωm , manakala kebolehcasan berjulat 0.5–200 ms. Zon potensi akuifer dikenal pasti pada julat keberintangan 0–200 Ωm dan kebolehcasan 0–50 ms. Hasil korelasi menunjukkan batuan metasedimen, khususnya batu pasir Formasi Bukit Kenny mempunyai potensi air bawah tanah yang lebih tinggi berbanding batu kapur, di mana lapisan batu pasir tepu air yang tebal dan berpori dengan lapisan lempung sebagai penakung membentuk sistem akuifer yang ideal. Sebaliknya, sistem akuifer batu kapur–marmar yang tinggi kerintangan hanya menunjukkan zon air setempat yang dikawal oleh rekahan dan rongga kars. Dapatan ini boleh dijadikan panduan awal dalam mengenal pasti zon prospek telaga dan menyokong pengurusan air bawah tanah secara mampan di Lembangan Sungai Klang.

Kata kunci: Air bawah tanah, keberintangan geoelektrik, pengutuban teraruh, batu kapur, batu metasedimen, akuifer

ABSTRACT

Rapid development and population growth in the Klang River Basin demand the exploration of more reliable alternative water resources. This study evaluates the groundwater potential in limestone and metasedimentary terrains around Surau Ad Dinniyah (Batu Caves), Kg. Malaysia Tambahan (Sungai Besi), Jariah Agro Farm (Shah Alam), Masjid Raja Al Fisabilillah (Cyberjaya) and Universiti Malaya Perdana Siswa (Petaling Jaya) using a combination of 2D geoelectrical resistivity, induced polarization (IP) methods and borehole data correlation. Several survey lines were conducted across the Kuala Lumpur Limestone Formation and the Bukit Kenny Formation, with inversion RMS errors ranging from 19.8% to 48.7%. The measured resistivity values range from 0.5–5000 Ωm , while chargeability ranges from 0.5–200 ms. Potential aquifer zones are identified within resistivity values of 0–200 Ωm and chargeability values of 0–50 ms. The correlation results show that metasedimentary rocks, particularly the sandstone of the Bukit Kenny Formation, have higher groundwater potential than limestone, where thick, water-saturated and porous sandstone layers overlain by clay acting as a confining layer form an ideal aquifer system. In contrast, the highly resistive limestone–marble aquifer system only exhibits localized water zones controlled by fractures and karst cavities. These findings provide an initial guideline for identifying prospective well sites and support sustainable groundwater management in the Klang River Basin.

Keywords: Groundwater, geoelectrical resistivity, induced polarization, limestone, metasedimentary rocks, aquifer

PENGENALAN

Air sungai merupakan sumber utama bekalan air terawat bagi penduduk setempat khususnya di kawasan Lembah Klang, Selangor. Walau bagaimanapun, sumber air permukaan ini terdedah kepada pencemaran industri dan domestik, perubahan rejim cuaca serta isu yang melibatkan operasi loji rawatan sehingga mengakibatkan gangguan bekalan air yang kerap (Raihan et al. 2023). Keadaan ini menuntut penerokaan sumber air alternatif yang lebih terjamin bagi menampung keperluan penduduk. Air bawah tanah merupakan salah satu sumber utama yang berpotensi dimanfaatkan dan dianggap sebagai penyelesaian alternatif yang berdaya tahan dan mampan (Abdel Moneim 2005). Sifat fiziko-kimia air bawah tanah dipengaruhi oleh sifat hidrolik dan kimia akuifer di mana ia disimpan (Villholth 2006; Mukherjee et al. 2024). Air bawah tanah disifatkan lebih berkualiti berbanding air permukaan kerana bebas daripada pepejal terampai dan patogen serta rendah karbon organik terlarut (Thomas et al. 2022). Walau bagaimanapun, kualiti air bawah tanah masih berupaya untuk terjejas apabila air permukaan yang tercemar meresap masuk ke dalam sistem akuifer, terutamanya di kawasan perbandaran dan perindustrian yang pesat membangun. Justeru, terdapat keperluan untuk mengenal pasti zon yang berpotensi mengandungi air bawah tanah bagi menyokong pembangunan dan pengurusan sumber air secara lestari.

Kaedah keberintangan geoelektrik dan pengutuban teraruh (PI) merupakan kaedah geofizik yang digunakan secara meluas dalam penerokaan air bawah tanah dalam penentuan profil bawah permukaan (Alao & Abubakar 2025). Samsudin (1990) dan Paine dan Minty (2005) menyatakan bahawa ketumpatan, kerentanan magnet, keberintangan geoelektrik dan keradioaktifan merupakan sifat fizik batuan yang sering digunakan dalam penjelajahan geofizik. Selain penerokaan air bawah tanah, kaedah keberintangan turut digunakan bagi menilai kawasan akumulasi mineral ekonomi, tapak pelupusan sisa, takungan, dan pemilihan tapak empangan, dan mengenal pasti struktur geologi dalaman (Kamaraj & Karuppannan 2024). Menurut Reynolds (1997), tindak balas bumi terhadap pengaliran dan perubahan arus elektrik yang mengalir melalui bahan di bawah permukaan bumi dapat ditafsirkan apabila nilai keberintangan dikira dari data yang diperolehi di lapangan.

Pengutuban teraruh pula merupakan ukuran keupayaan sesuatu bahan untuk menyimpan cas elektrik yang lazimnya dinyatakan dalam unit milisaat (ms) (Reynolds 1997; Madun et al. 2018). Menurut Samsudin (1990), sifat fizik yang diukur menggunakan kaedah ini adalah kapasiti elektrik di mana parameter yang diukur adalah voltan pengutuban atau rintangan bumi yang bergantung kepada frekuensi dan dinilai berdasarkan tahap kebolehdasan (Revil et al. 2022). Telford et al. (1990) telah mengelaskan nilai kebolehdasan pelbagai batuan dan mineral, dan nilai-nilai ini dijadikan panduan dalam mentafsir jenis batuan dan kandungan bendalir di bawah permukaan. Aplikasi gabungan kaedah keberintangan elektrik dan

pengutuban teraruh dalam pencarian air bawah tanah turut dibuktikan dalam kajian terdahulu di Malaysia (Madun et al. 2018; Kayode et al. 2023).

Peningkatan jumlah penduduk dan kepesatan aktiviti ekonomi di Lembangan Sungai Klang telah meningkatkan permintaan terhadap bekalan air terawat yang masih bergantung secara dominan kepada air sungai. Kebergantungan yang tinggi terhadap sumber yang terhad ini bakal mendatangkan masalah pada jangka masa panjang. Namun begitu, walaupun air bawah tanah berpotensi dijadikan sebagai sumber air alternatif, maklumat terperinci mengenai taburan, kedudukan, ketebalan dan cirian akuifer di kawasan Lembangan Sungai Klang masih terhad. Hal ini lebih jelas di kawasan yang diwakili oleh dua unit geologi utama iaitu Formasi Bukit Kenny dan Formasi Batu Kapur Kuala Lumpur yang dijangka mempunyai sifat litologi yang berbeza. Tanpa data geofizik dan tafsiran yang terperinci, usaha untuk merancang pembangunan telaga tiub dan eksploitasi air bawah tanah secara bersasar tidak dapat dijalankan secara berkesan.

Oleh itu, kajian eksplorasi air bawah tanah berasaskan kaedah geofizik dijalankan bagi mengisi jurang pengetahuan tersebut. Objektif kajian ini adalah untuk menentukan zon berpotensi air bawah tanah di beberapa lokaliti terpilih sekitar Lembangan Sungai Klang menggunakan gabungan kaedah keberintangan geoelektrik dan pengutuban teraruh selain mentafsir profil bawah permukaan bagi mengenal pasti kedudukan akuifer serta membandingkan ciri geofizik serta potensi akuifer antara batuan Formasi Bukit Kenny dan Formasi Batu Kapur Kuala Lumpur berdasarkan nilai keberintangan dan kebolehdasan yang diperolehi. Dapatan ini dijangka dapat dijadikan sebagai panduan saintifik bagi merangka pembangunan dan pengurusan sumber air bawah tanah yang lebih sistematik di kawasan Lembangan Sungai Klang, Selangor.

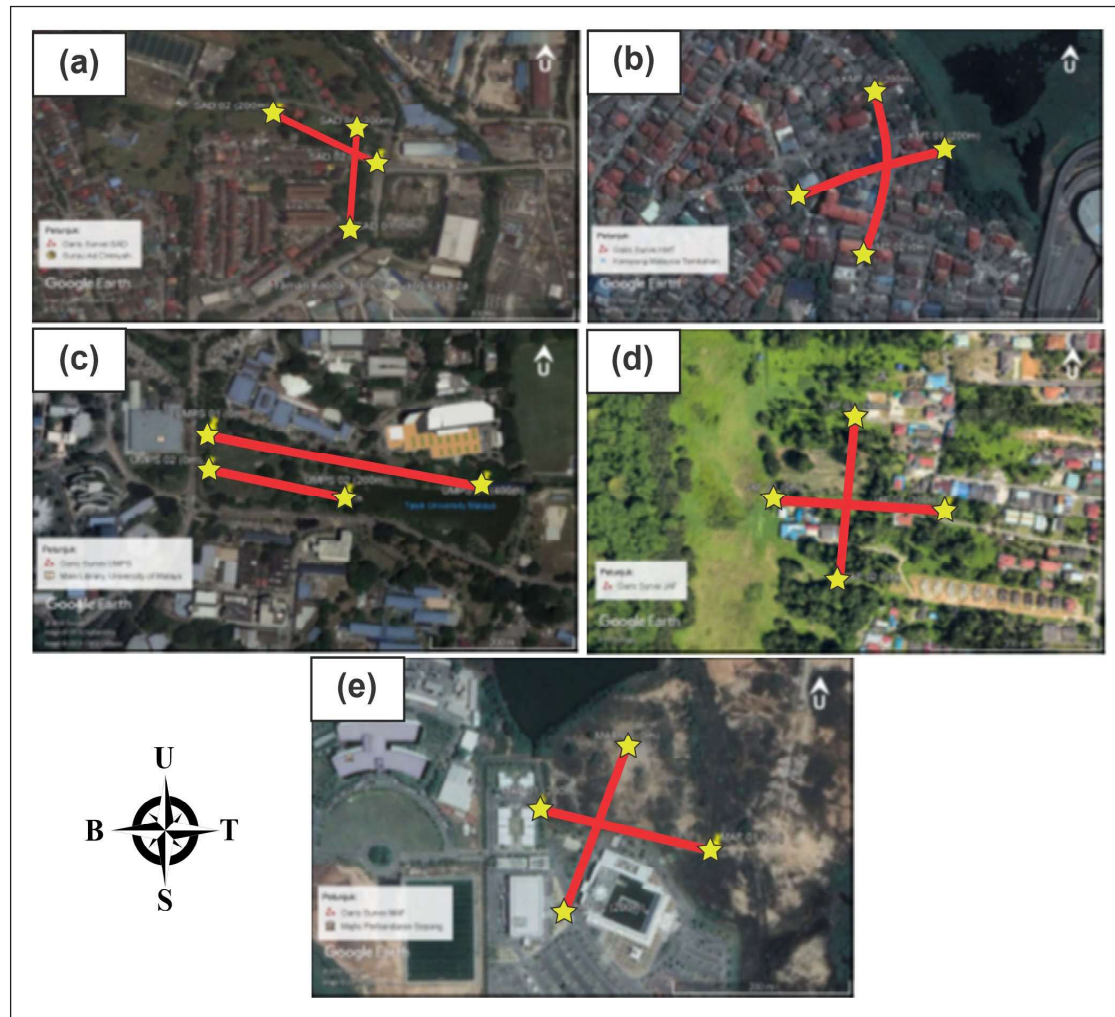
BAHAN DAN KAEDAH KAJIAN

KAWASAN KAJIAN

Kajian ini telah dijalankan di lima lokaliti terpilih sekitar Lembangan Sungai Klang iaitu Surau Ad Dinniyah di Batu Caves (SAD 01 dan SAD 02), Kg. Malaysia Tambahan di Sungai Besi (KMT 01 dan KMT 02), Jariah Agro Farm di Shah Alam (JAF 01 dan JAF 02), Masjid Raja Al Fisabilillah di Cyberjaya (MAF 01 dan MAF 02) dan Universiti Malaya Perdana Siswa di Petaling Jaya (UMPS 01 dan UMPS 02) (Rajah 1). Formasi Bukit Kenny meliputi sebahagian besar kawasan kajian iaitu Universiti Malaya Perdana Siswa, Jariah Agro Farm dan Masjid Raja Al Fisabilillah yang terdiri daripada jujukan selang lapis syal, batu lodak dan batu pasir. Menurut Goh (2000), fasies arenit yang lebih tebal dan fasies argilit yang kurang tebal berselang lapis antara satu sama lain, dan kedua-dua fasies ini telah mengalami metamorfisme gred rendah secara rantau sehingga membentuk batuan filit, metakuarzit dan metasubarenit. Kawasan kajian yang



RAJAH 1. Peta geologi kawasan kajian



RAJAH 2. Kedudukan garis survei a) Surau Ad Dinniyah, Batu Caves, b) Kg. Malaysia Tambahan, Sungai Besi, c) Universiti Malaya Perdana Siswa, Petaling Jaya, d) Jariah Agrofarm, Shah Alam dan e) Masjid Raja Haji Fisabilillah, Cyberjaya

dilitupi batuan Formasi Batu Kapur Kuala Lumpur pula ialah Kg. Malaysia Tambahan dan Surau Ad Dinniyah. Pada peringkat awal kajian, Willbourn (1922) telah mengelaskan batuan klastik di kawasan ini ke dalam satu siri yang menindih batu kapur di sekitar Kuala Lumpur. Batu Kapur Kuala Lumpur terdiri daripada batuan karbonat yang telah terhablur semula menjadi marmar berbutir halus, berwarna kelabu hingga cerah dan berpelapisan tebal. Perbezaan litologi antara batuan sedimen berubah Formasi Bukit Kenny dengan batu kapur/marmar Formasi Batu Kapur Kuala Lumpur dijangka mempengaruhi sifat geofizik dan potensi akuifer di kawasan kajian yang dikaji.

KEBERINTANGAN GEOELEKTRIK DAN PENGUTUBAN TERARUH

Survei ini dilakukan bagi mendapatkan profil bawah permukaan di kawasan kajian serta menentukan lokasi yang berpotensi mengandungi air bawah tanah untuk dijadikan telaga. Keberintangan geoelektrik dan pengutuban teraruh

diukur dengan mengalirkan arus elektrik ke dalam bumi melalui elektrod dan direkod menggunakan alat ABEM Terrameter SAS4000. Sebanyak dua garis survei bagi setiap lokaliti telah dilakukan. Sembilan garis survei berjarak 200 meter dan satu daripadanya berjarak 400 meter. Sebanyak 41 batang elektrod telah dipasang sepanjang garis survei dengan jarak antara elektrod yang ditetapkan adalah sebanyak 5 meter bagi garis survei 200 meter dan 10 meter bagi garis survei 400 meter. Rajah 2 menunjukkan garis survei yang telah dipilih bagi setiap lokaliti.

HASIL DAN PERBINCANGAN

HASIL SURVEI KEBERINTANGAN GEOELEKTRIK DAN PENGUTUBAN TERARUH

Garis Profil SAD 01

Imej songsangan 2D memberikan peratus ralat RMS sebanyak 19.8% dengan sepuluh kali iterasi (Rajah

3(a)). Julat nilai keberintangan bagi imej 2D SAD01 adalah 5.0 Ωm hingga 2000 Ωm . Sementara julat nilai kebolehasan elektrik bagi imej pengutuban teraruh pula adalah 1 ms hingga 50 ms. Zon potensi air bawah tanah mempunyai nilai keberintangan 5 Ωm hingga 200 Ωm . Nilai kebolehasan bagi zon potensi air bawah tanah ialah 10 ms hingga 50 ms. Gabungan nilai ini menunjukkan kemungkinan kehadiran zon batuan yang tepu air dengan kandungan lempung/mineral konduktif yang agak tinggi atau zon rekahan yang diisi oleh air bawah tanah. Berdasarkan litologi kawasan yang didasari oleh batu kapur, zon ini ditafsirkan sebagai bahagian batu kapur yang mengalami proses luluhawa tahap tinggi yang bertindak sebagai akuifer berketelapan sederhana hingga tinggi. Secara geometri, zon ini lazimnya terletak pada kedalaman yang lebih mampat dan menjadi zon potensi penakung air bawah tanah di kawasan kajian. Zon batuan dasar pula ditafsirkan sebagai batu kapur segar yang dicirikan oleh nilai keberintangan yang tinggi iaitu antara 800 Ωm hingga 2000 Ωm serta kebolehasan yang relatif rendah hingga sederhana 10–20 ms. Nilai keberintangan yang tinggi ini menggambarkan sifat batu kapur yang padat, keporoson yang rendah dan mempunyai kandungan air yang terhad. Nilai kebolehasan yang diperoleh juga menunjukkan ketiadaan kandungan lempung atau mineral konduktif yang signifikan. Lapisan terluluhawa pula menunjukkan julat keberintangan 200 Ωm hingga 800 Ωm dengan kebolehasan rendah (1–10 ms). Batu kapur yang bersifat boleh larut akan mengalami proses luluhawa kimia hasil tindak balas air permukaan dan meresap masuk ke batuan dasar yang mempunyai sistem rekahan jauh ke dalam bumi. Proses pelarutan akan membentuk rerongga dalam batuan dasar (batu kapur) dan mewujudkan zon potensi air bawah tanah. Dalam konteks hidrogeologi, lapisan terluluhawa ini berfungsi sebagai zon peralihan antara batu kapur dasar yang padat dan zon akuifer yang lebih tepu dan lebih konduktif. Dari segi taburannya dalam rajah profil survei, zon potensi air bawah tanah SAD 01 lebih meluas dari arah selatan ke utara, selari dengan perkembangan zon lapisan terluluhawa selain dikawal oleh kewujudan zon sesar di bahagian tengah. Kehadiran jasad anomali keberintangan rendah dan kebolehasan tinggi pada zon sesar ini menunjukkan bahawa struktur sesar bertindak sebagai medium aliran air bawah tanah.

Garis Profil SAD 02

Imej keberintangan dan pengutuban teraruh bagi garis survei SAD 02 menunjukkan nilai ralat RMS sebanyak 26.3% selepas sebelas iterasi (Rajah 3(b)). Walaupun nilai ralat yang direkod agak tinggi, model songsangan masih berupaya memberikan gambaran umum susunan geoelektrik bawah permukaan. Julat nilai keberintangan keseluruhan profil adalah antara 5 Ωm hingga 2000 Ωm , manakala nilai kebolehasan (pengutuban teraruh) berjulat antara 1 ms hingga 50 ms. Zon potensi air bawah tanah pada SAD 02 dikenal pasti

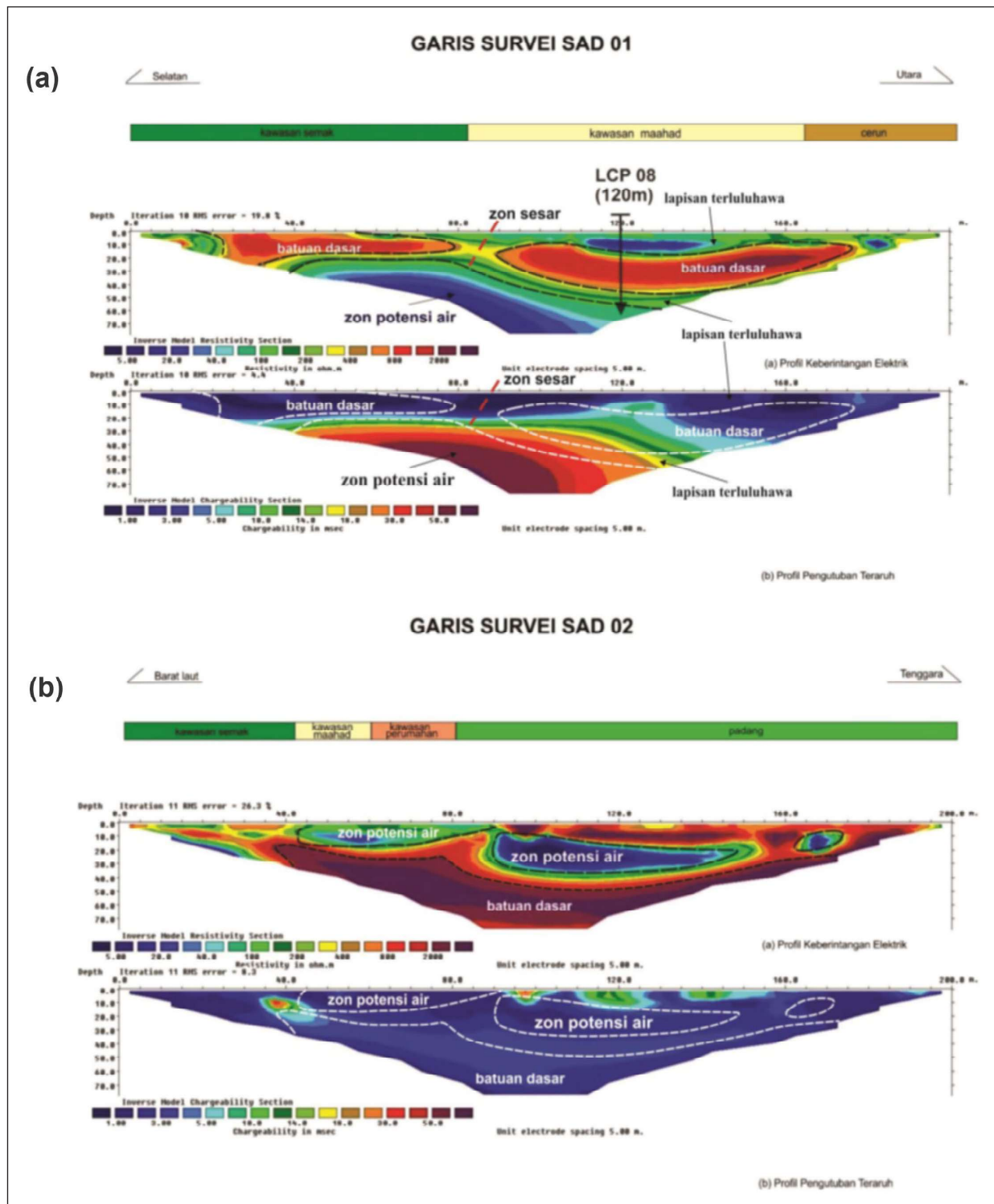
pada bahagian yang menunjukkan tahap keberintangan sangat rendah hingga sederhana, iaitu sekitar 0.5 Ωm hingga 100 Ωm , dengan nilai kebolehasan berjulat 0–3 ms. Gabungan nilai ini menunjukkan zon berair iaitu air bawah tanah yang mengisi rongga, rekahan atau saluran pelarutan dalam batu kapur tanpa kandungan lempung/mineral konduktif yang ketara. Zon ini wujud sebagai jasad anomali keberintangan rendah yang bertabur di atas batuan dasar (800–2000 Ωm) pada kedalaman cetek hingga sederhana. Zon ini ditafsirkan sebagai kawasan potensi akuifer berkemungkinan berbentuk poket rerongga atau saluran kars yang tepu air di dalam jasad batu kapur secara setempat. Sebaliknya, zon batuan dasar menunjukkan keberintangan tinggi (800–2000 Ωm) dengan kebolehasan rendah hingga sederhana (1–10 ms), selari dengan tafsiran batuan kapur segar dan padat. Walaupun terdapat zon potensi air bawah tanah pada garis survei SAD 02, saiz dan kesinambungan anomali geoelektrik dan pengutuban teraruh adalah lebih terhad berbanding SAD 01. Secara menegak, zon potensi penakung air lebih tertumpu di bahagian tengah hingga tenggara garis survei dengan kewujudan jasad bersaiz lebih kecil berkedalaman cetek di bahagian barat laut. Kedua-dua zon ini menunjukkan taburan profil bertompok yang menandakan sistem akuifer di SAD 02 lebih dikawal oleh kewujudan rekahan dan saluran kars setempat.

Garis Profil KMT 01

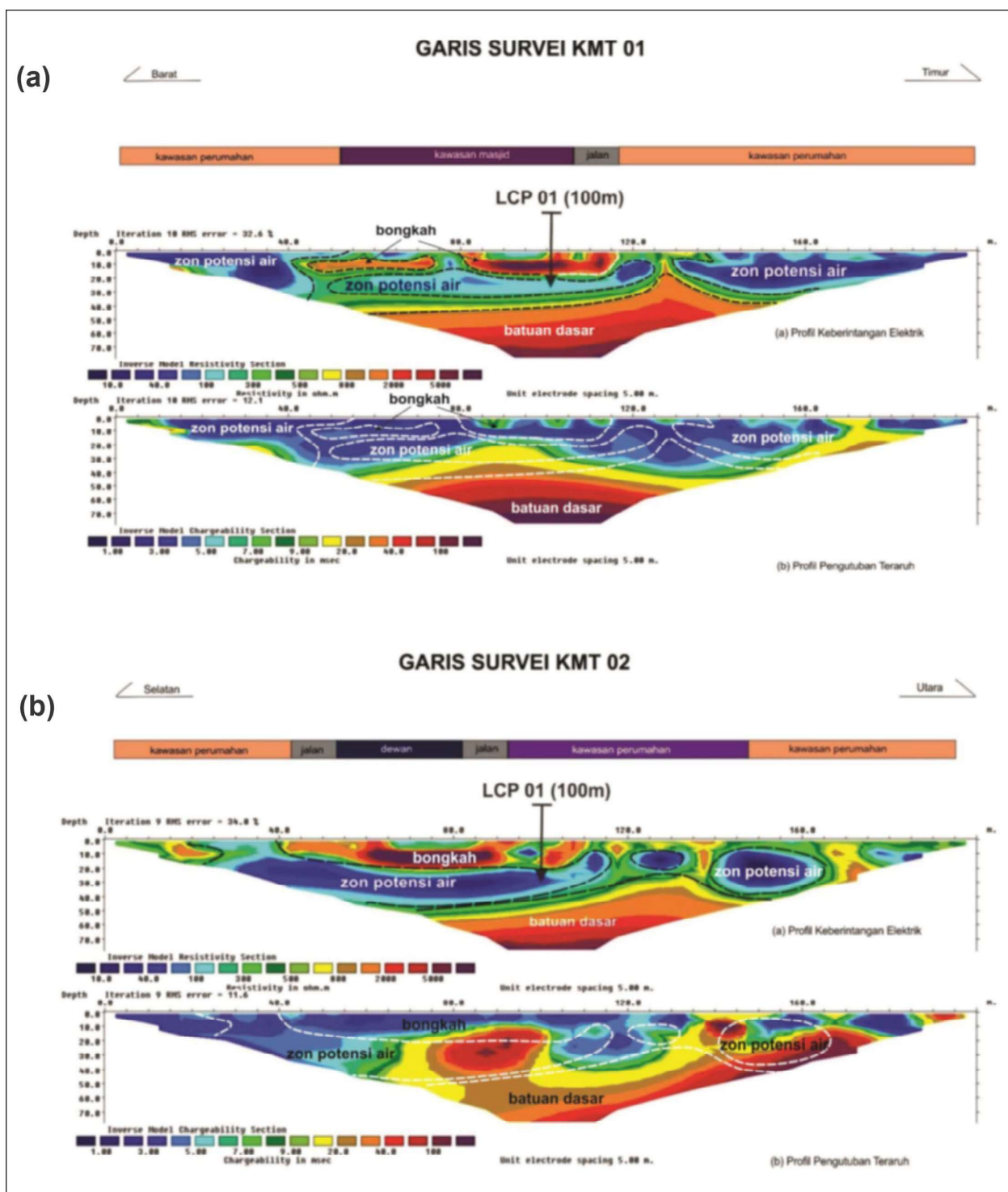
Imej keberintangan dan pengutuban teraruh yang telah dihasilkan bagi garis survei KMT01 seperti di dalam Rajah 4(a) menunjukkan peratus ralat RMS sebanyak 32.6% dengan sepuluh kali iterasi. Zon potensi air bawah tanah dikenal pasti pada kawasan yang menunjukkan julat keberintangan rendah hingga sederhana (10–200 Ωm) dengan nilai kebolehasan yang rendah (1–5 ms). Profil keberintangan dan kawasan berkebolehasan rendah pada profil pengutuban teraruh yang menggambarkan kehadiran batuan kapur terluluhawa tepu air. Garis KMT01 di bahagian barat (kawasan perumahan) menunjukkan zon potensi air wujud pada kedalaman cetek hingga sederhana yang berperanan sebagai akuifer setempat. Di bahagian tengah, zon keberintangan rendah berada di antara bongkah dan batuan dasar dengan nilai resistiviti tinggi dan kebolehasan rendah mencadangkan kewujudan kantung air bawah tanah. Di bahagian timur pula, zon keberintangan rendah–sederhana dengan kebolehasan rendah terbentuk pada ketebalan yang lebih ketara. Zon ini berada di atas batuan dasar yang berperanan sebagai dasar akuifer. Nilai keberintangan tinggi (800–2000 Ωm) dan kebolehasan tinggi (20–150 ms) ditafsirkan sebagai bongkah dan batuan dasar yang kurang berpotensi menyimpan air, di mana persamaan nilai-nilai ini mencadangkan ia mungkin terdiri daripada batu kapur seperti yang dilaporkan oleh Saad et al. (2012).

Garis Profil KMT 02

Imej 2D yang dihasilkan daripada data keberintangan dan pengutuban teraruh bagi garis survei KMT 02 ditunjukkan



RAJAH 3. Profil keberintangan elektrik dan pengutuban teraruh garis survei (a) SAD 01, dan (b) SAD 02



RAJAH 4. Profil keberintangan elektrik dan pengutuban teraruh garis survei (a) KMT 01, dan (b) KMT 02

dalam Rajah 4(b). Peratus ralat RMS adalah 34.0% dengan sembilan kali iterasi. Julat nilai keberintangan bagi KMT 02 adalah 10 Ω m hingga 5000 Ω m manakala julat nilai kebolehasan pula adalah 1 ms hingga 100 ms. Zon potensi air bawah tanah mempunyai nilai keberintangan yang tinggi iaitu 10 Ω m hingga 200 Ω m dan mempunyai nilai kebolehasan berjulat 1 ms hingga 10 ms. Imej 2D yang terhasil menunjukkan nilai keberintangan yang tinggi iaitu 800 Ω m hingga 2000 Ω m pada jarak 40 meter hingga 110 meter yang ditafsirkan sebagai bongkah batuan. Batuan ini mempunyai nilai kebolehasan berjulat 20–100 ms. Batuan dasar mempunyai nilai kebolehasan yang lebih rendah berbanding bongkah batuan iaitu 0 ms hingga 10 ms. Perbezaan nilai ini berkemungkinan disebabkan oleh bongkah batuan mempunyai banyak retakan dan telah terluluhawa. Dari segi taburan menegak, zon potensi penakung air lebih tertumpu di bahagian selatan dan utara garis survei pada kedalaman cetek hingga sederhana. Bahagian tengah profil didominasi oleh jasad bongkah berkeberintangan tinggi. Kawasan ini dilihat kurang sesuai untuk dijadikan sebagai tapak telaga berbanding zon potensi air bawah tanah di hujung profil survei yang dicirikan oleh anomali keberintangan rendah dan kebolehasan lebih tinggi. Berbanding zon profil SAD 01, SAD 02 dan KMT 01, zon potensi air bawah tanah di KMT 02 mempunyai keberintangan relatif lebih tinggi. Hal ini berkemungkinan disebabkan oleh zon akuifer terletak dalam lapisan batu kapur yang lebih segar dan kurang berlempung selain kandungan mineral konduktif dengan kepekatan ion terlarut yang lebih rendah. Oleh sebab itu, walaupun zon tersebut mengandungi air bawah tanah, sifat matriks batuan yang intrinsik menyebabkan nilai keberintangan lebih tinggi berbanding akuifer di garis profil lain.

Garis Profil JAF 01

Imej yang diperoleh hasil pemprosesan data menggunakan perisian RES2DINV (Rajah 5(a)) menunjukkan imej songsangan 2D dengan peratus ralat RMS sebanyak 24.2% selepas enam iterasi. Julat nilai keberintangan bagi imej 2D JAF 01 ialah 0.5 Ω m hingga 150 Ω m, manakala julat nilai pengutuban teraruh ialah 0.5 ms hingga 30 ms. Lokaliti ini merupakan zon yang berpotensi menjadi penakung air bawah tanah yang banyak dengan zon potensi air dicirikan oleh nilai keberintangan sangat rendah berjulat 0.5–40 Ω m dan nilai kebolehasan berjulat 0.5–5 ms. Perkembangan zon potensi air bawah tanah ditunjukkan di bahagian tengah profil survei, dan memanjang secara mendatar ke arah barat dan timur pada kedalaman cetek hingga sederhana (5–20 m) dari permukaan. Profil pengutuban teraruh yang menunjukkan nilai berkebolehasan rendah menandakan medium tepu air dengan kandungan lempung/mineral konduktif yang berperanan sebagai akuifer cetek. Tanah terkonsolidat pula mempunyai nilai keberintangan berjulat 40–150 Ω m dan kebolehasan sehingga 30 ms yang ditafsirkan sebagai tanah baki hasil luluhawa batuan Formasi Bukit Kenny.

Tafsiran ini dibuat berdasarkan corak lapisan yang muncul secara relatif di bahagian bawah hingga tengah imej profil yang mengikuti bentuk permukaan batuan dasar. Gabungan nilai keberintangan sederhana-tinggi dengan kebolehasan tinggi adalah konsisten dengan kemungkinan wujudnya zon saprolit kaya lempung yang terhasil daripada luluhawa syal dan batu lodak yang telah mengalami pemadatan dan konsolidasi yang terletak di bawah di atas zon akuifer yang lebih tepu air.

Garis Profil JAF 02

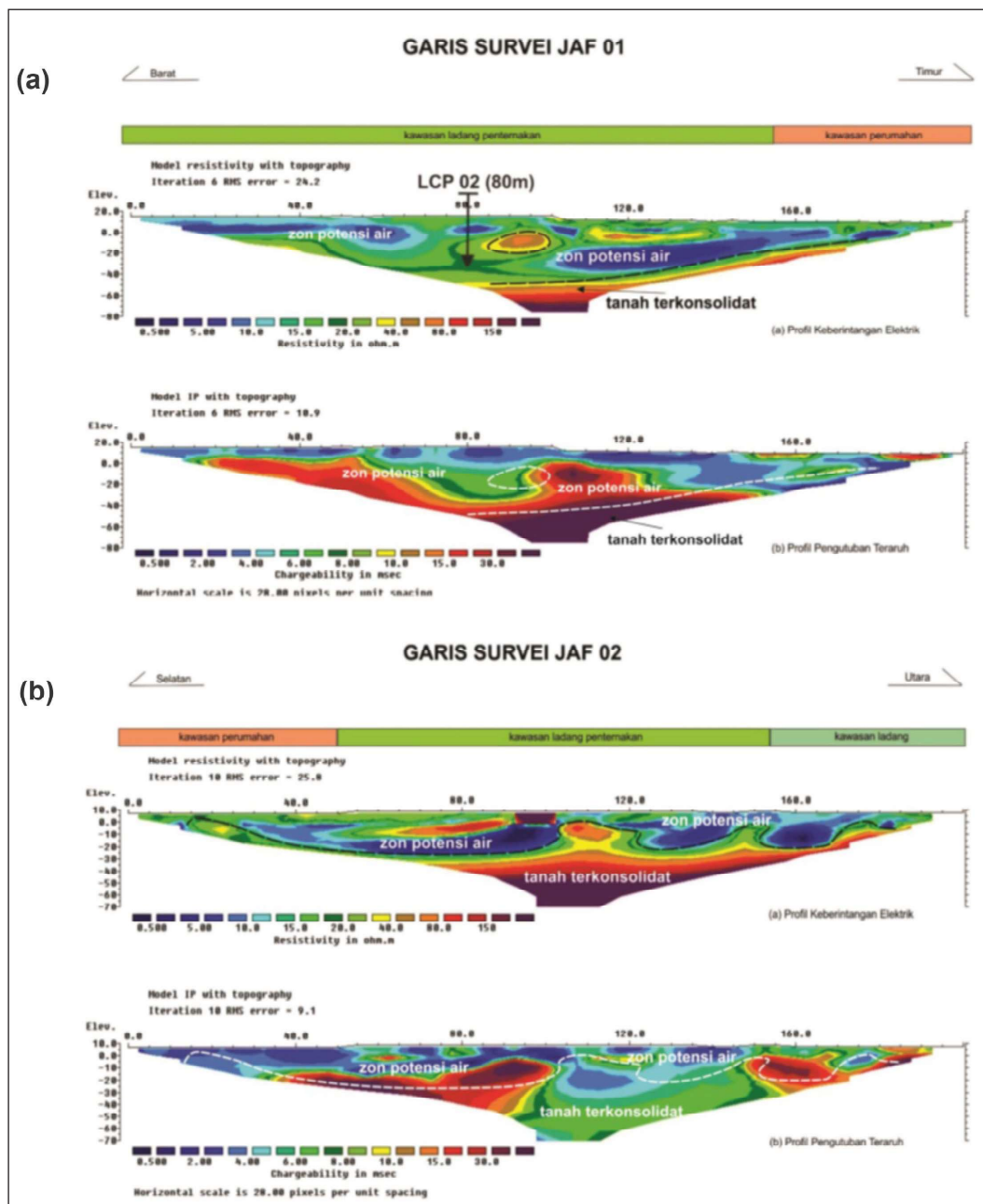
Nilai peratusan ralat RMS 25.8% diperoleh bagi garis survei JAF 02 selepas sepuluh kali iterasi dengan imej songsangan 2D (Rajah 5(b)) menunjukkan nilai keberintangan berjulat 0.5–150 Ω m dan nilai kebolehasan berjulat 0.5–30 ms. Variasi julat nilai ini menyamai nilai yang direkodkan pada garis profil JAF 01. Zon potensi air bawah tanah di JAF 02 dicirikan oleh nilai keberintangan (0.5–40 Ω m dan kebolehasan 0.5–5 ms) yang rendah. Berdasarkan tafsiran profil keberintangan, zon ini wujud sebagai beberapa jasad berkeberintangan rendah utama iaitu (i) zon cetek di bahagian selatan (kawasan penempatan), (ii) zon berdimensi lebih luas di bahagian tengah hingga utara (kawasan ladang penternakan), dan (iii) zon yang lebih dalam di bahagian utara yang terkekang di antara lapisan dengan nilai keberintangan lebih tinggi. Pada profil pengutuban teraruh, ketiga-tiga zon ini sepadan dengan kawasan berkebolehasan rendah yang menandakan wujudnya kehadiran medium tepu air relatif kurang kohesif. Zon ini berfungsi sebagai akuifer cetek hingga sederhana dalam Formasi Bukit Kenny. Tanah terkonsolidat pula mempunyai nilai keberintangan 40 Ω m hingga 150 Ω m dan kebolehasan 15 ms hingga 30 ms. Zon ini ditafsirkan sebagai lapisan tanah mampat kaya lempung yang terbentuk daripada hasil proses luluhawa serta konsolidasi tanah baki syal dan batu lodak. Sama seperti profil JAF 01, lapisan yang terbentuk secara berterusan mengikuti bentuk permukaan batuan induk di bahagian bawah dan tengah profil bertindak sebagai zon kurang telap yang menghalang aliran air bawah tanah secara menegak. Walau bagaimanapun, geometri akuifer di JAF 02 adalah lebih bersegmen dengan beberapa poket air di hujung selatan dan utara dipisahkan oleh tanah terkonsolidat di bahagian tengah. Perbandingan ini menunjukkan bahawa kedua-dua garis JAF 01 dan JAF 02 berada dalam sistem hidrogeologi yang sama namun dibezakan oleh variasi ketebalan dan tahap konsolidasi tanah baki yang mengawal taburan zon penakung air bawah tanah.

Garis Profil MAF 01

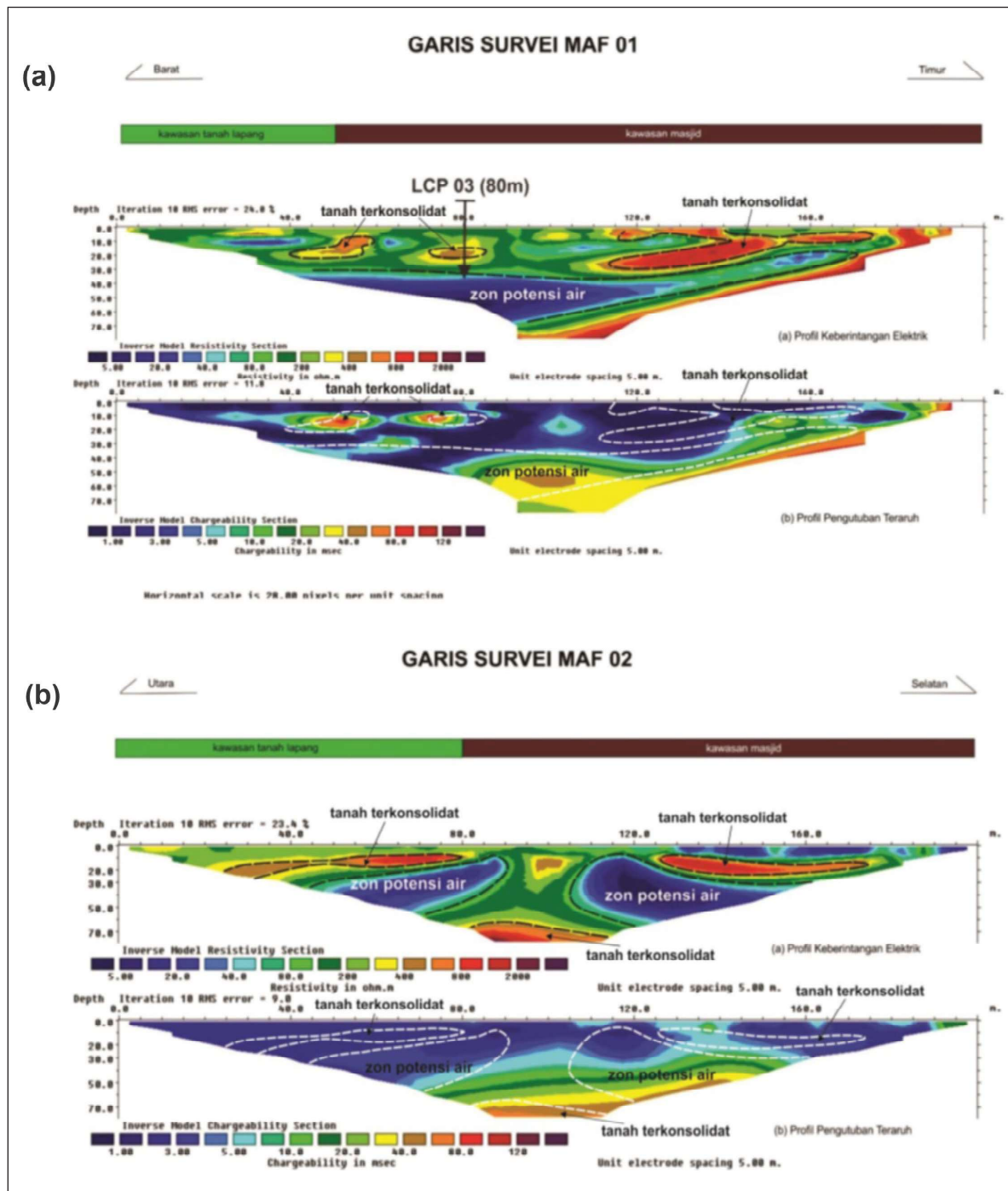
Imej yang diperoleh hasil daripada pemprosesan data bagi garis profil MAF 01 diilustrasikan dalam Rajah 6(a). Imej songsangan 2D ini menunjukkan peratus ralat RMS sebanyak 24.0% dengan sepuluh kali iterasi. Nilai keberintangan adalah berjulat 5–2000 Ω m, sementara nilai kebolehasan elektrik bagi imej pengutuban teraruh pula adalah berjulat 1–120 ms. Zon potensi penakung air

bawah tanah dicirikan oleh nilai keberintangan rendah berjulat 0–100 Ωm dan nilai kebolehcasan yang rendah (0–5 ms). Zon potensi air bawah tanah berada di bahagian tengah profil survei pada kedalaman cetek hingga sederhana (sekitar 5–25 m dari permukaan) dan memanjang secara mendatar ke arah timur yang membentuk seakan-akan lembangan di atas tanah terkonsolidat. Selain itu, terdapat satu lagi zon profil berkeberintangan rendah yang lebih dalam di bahagian barat turut menunjukkan kehadiran poket akuifer setempat. Tanah terkonsolidat pula terhasil daripada batuan sedimen ahli Formasi Bukit Kenny,

khususnya syal dan batu lodak yang telah mengalami proses luluhawa dan konsolidasi jangka panjang. Zon ini mempunyai nilai keberintangan (100–2000 Ωm) dan nilai kebolehcasan relatif (hingga 120 ms) yang lebih tinggi. Corak ini selari dengan tafsiran di JAF 01 dan JAF 02 iaitu tanah terkonsolidat merupakan tanah baki terluluhawa daripada batuan Formasi Bukit Kenny yang kaya lempung dan lebih mampat. Zon ini bersifat kurang telap, manakala zon potensi air bawah tanah (bahagian tengah lembangan) yang berkeberintangan dan kebolehcasan rendah mewakili profil yang lebih berpori dan tepu air.



RAJAH 5. Profil keberintangan elektrik dan pengutuban teraruh garis survei (a) JAF 01, dan (b) JAF 02



RAJAH 6. Profil keberintangan elektrik dan pengutuban teraruh garis survei (a) MAF 01, dan (b) MAF 02

Garis Profil MAF 02

Pada garis MAF 02, nilai peratusan bagi ralat RMS ialah 23.4% dengan sepuluh kali iterasi (Rajah 6(b)). Imej songsangan 2D yang diproses menunjukkan nilai keberintangan berjulat 5–2000 Ωm manakala nilai kebolehcasan berjulat 1–120 ms. Zon potensi air bawah tanah dicirikan oleh nilai keberintangan rendah (0–100 Ωm) dan nilai kebolehcasan yang rendah (0–5 ms). Zon potensi air utama mengunjur di bahagian tengah garis survei, sedikit condong ke arah selatan pada kedalaman cetek hingga sederhana (sekitar 10–25 m dari permukaan). Jasad berkeberintangan rendah ini memanjang secara mendatar dan terkekang di antara lapisan yang mempunyai nilai keberintangan lebih tinggi. Ia disokong oleh profil pengutuban teraruh yang menunjukkan zon ini sepadan dengan kawasan kebolehcasan rendah dan ditafsirkan sebagai akuifer berpori tepu air dengan kandungan lempung/mineral konduktif yang sederhana. Tanah terkonsolidat pula mempunyai nilai keberintangan yang tinggi (100–2000 Ωm) dengan nilai kebolehcasan 0–120 ms. Zon ini merupakan lapisan dominan di bahagian utara dan selatan berhampiran permukaan selain bertindak sebagai unit yang menindih zon potensi air bawah tanah di tengah profil. Tanah terkonsolidat ini ditafsirkan sebagai tanah baki hasil luluhawa batuan Formasi Bukit Kenny yang kemudian mengalami proses pemadatan dan konsolidasi sehingga lebih padat dan kurang telap. Corak ini adalah selari dengan tafsiran garis MAF 01 dan JAF (01 dan 02). Variasi ketebalan dan kedudukan tanah terkonsolidat mengawal kedalaman zon potensi air bawah tanah di kawasan kajian.

Garis Profil UMPS 01

Imej yang diperoleh hasil daripada pemprosesan data bagi garis profil UMPS 01 ditunjukkan pada Rajah 7(a). Imej songsangan 2D ini memberikan peratus ralat RMS yang agak tinggi iaitu 48.7% dengan tujuh kali iterasi. Nilai keberintangan bagi imej 2D UMPS 01 adalah berjulat 0–3500 Ωm , manakala nilai kebolehcasan elektrik bagi imej pengutuban teraruh berjulat 0–200 ms. Zon potensi air bawah tanah mempunyai nilai keberintangan antara 0 Ωm hingga 100 Ωm dan nilai kebolehcasan yang rendah iaitu 0–4 ms. Berdasarkan rajah, zon potensi air bawah tanah ini terletak di bahagian barat hingga tengah profil pada kedalaman cetek hingga sederhana (anggaran 5–20 m dari permukaan) dan memanjang secara mendatar di bawah kawasan tanah universiti sebelum meruncing ke arah tasik yang membentuk lekukan. Imej pengutuban teraruh menyokong dapatan ini di mana ia sepadan dengan kawasan berkebolehcasan rendah yang menandakan medium penakung tepu air dengan kandungan lempung/mineral konduktif sederhana. Zon batuan dasar pula menunjukkan nilai keberintangan tinggi berjulat 1000–3500 Ωm yang ditafsir sebagai batuan segar Formasi Bukit Kenny (berkemungkinan batu pasir ataupun syal) di bahagian timur dengan ketebalan lebih dalam.

Di bahagian atas dan pinggir batuan dasar ini terdapat zon batuan terluluhawa dengan nilai keberintangan sederhana (100–1000 Ωm) dan kebolehcasan rendah (4–10 ms). Zon ini berkemungkinan berasal daripada batuan dasar Formasi Bukit Kenny terluluhawa yang bertindak sebagai zon peralihan antara batuan dasar yang padat dan zon akuifer berkeberintangan rendah di bahagian barat profil.

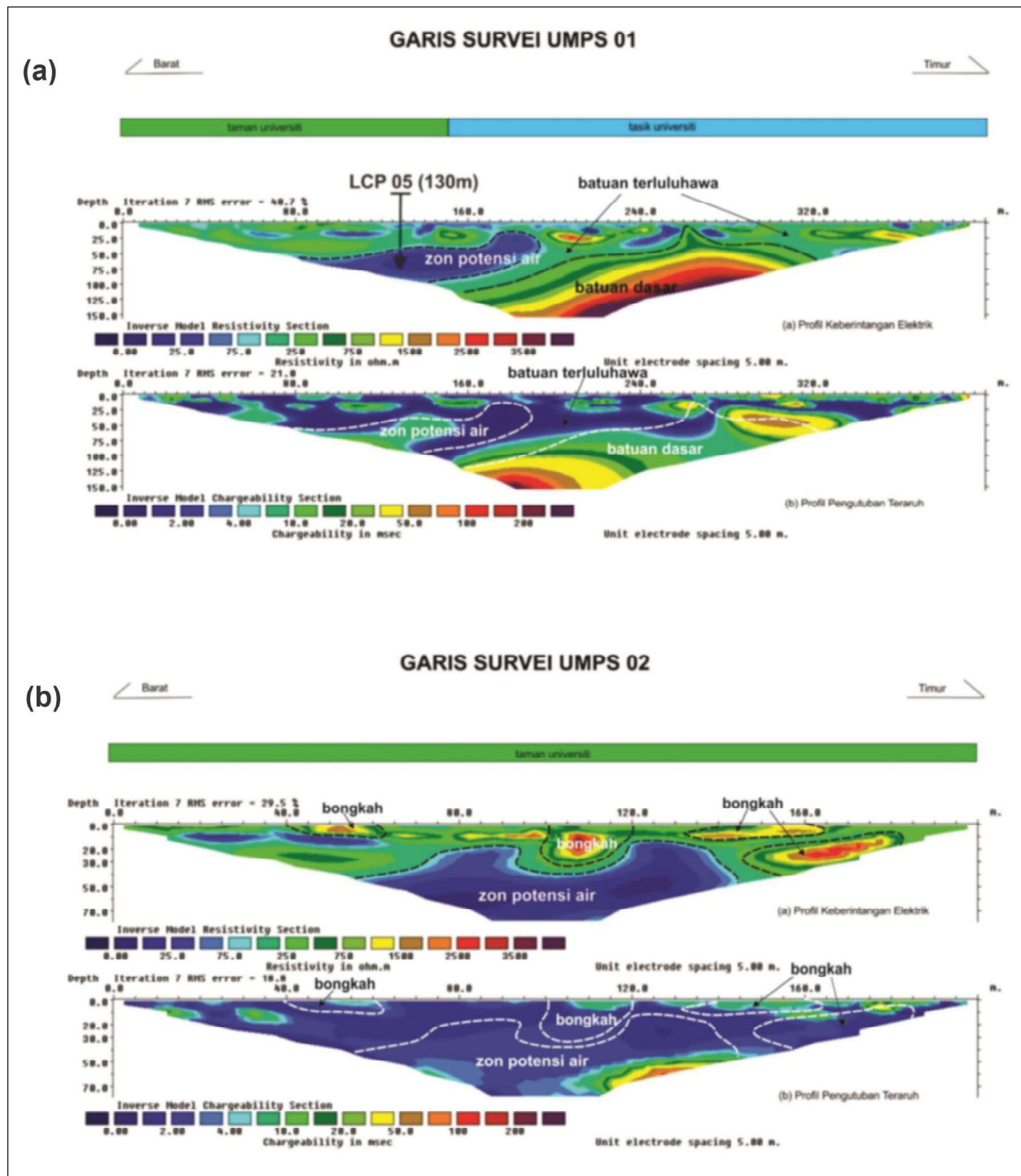
Garis Profil UMPS 02

Nilai peratusan bagi ralat RMS pada garis profil UMPS 02 ialah 29.5% dengan tujuh kali iterasi (Rajah 7(b)). Imej songsangan 2D yang diproses memberikan nilai keberintangan berjulat 0–3500 Ωm , manakala nilai kebolehcasan berjulat 0–200 ms. Zon potensi air bagi garis ini dicirikan oleh nilai keberintangan dan kebolehcasan yang rendah, masing-masing dengan julat 0–100 Ωm dan 0–4 ms. Berdasarkan rajah, zon ini membentuk satu jasad berkeberintangan rendah yang besar dan meluas di bahagian tengah profil serta memanjang dari barat ke timur kawasan kampus universiti pada kedalaman sekitar 5–25 m dari permukaan. Tafsiran imej menunjukkan kewujudan akuifer cetek yang meliputi sebahagian besar garis survei. Bongkahan batuan pula mempunyai nilai keberintangan tinggi dengan julat 1000–2500 Ωm selain nilai kebolehcasan rendah (4–10 ms) yang wujud sebagai tiga jasad berkeberintangan tinggi di bahagian barat, tengah dan timur profil. Bongkah ini ditafsirkan sebagai sisa batuan segar atau separa terluluhawa dari Formasi Bukit Kenny (kemungkinan batu pasir atau syal padat) yang terbenam di dalam matriks tepu air yang mengawal laluan aliran dan taburan air bawah tanah. Corak ini selari dengan tafsiran di UMPS 01 namun, di zon akuifer di garis ini lebih mendatar dan meluas yang menggambarkan satu sistem akuifer cetek.

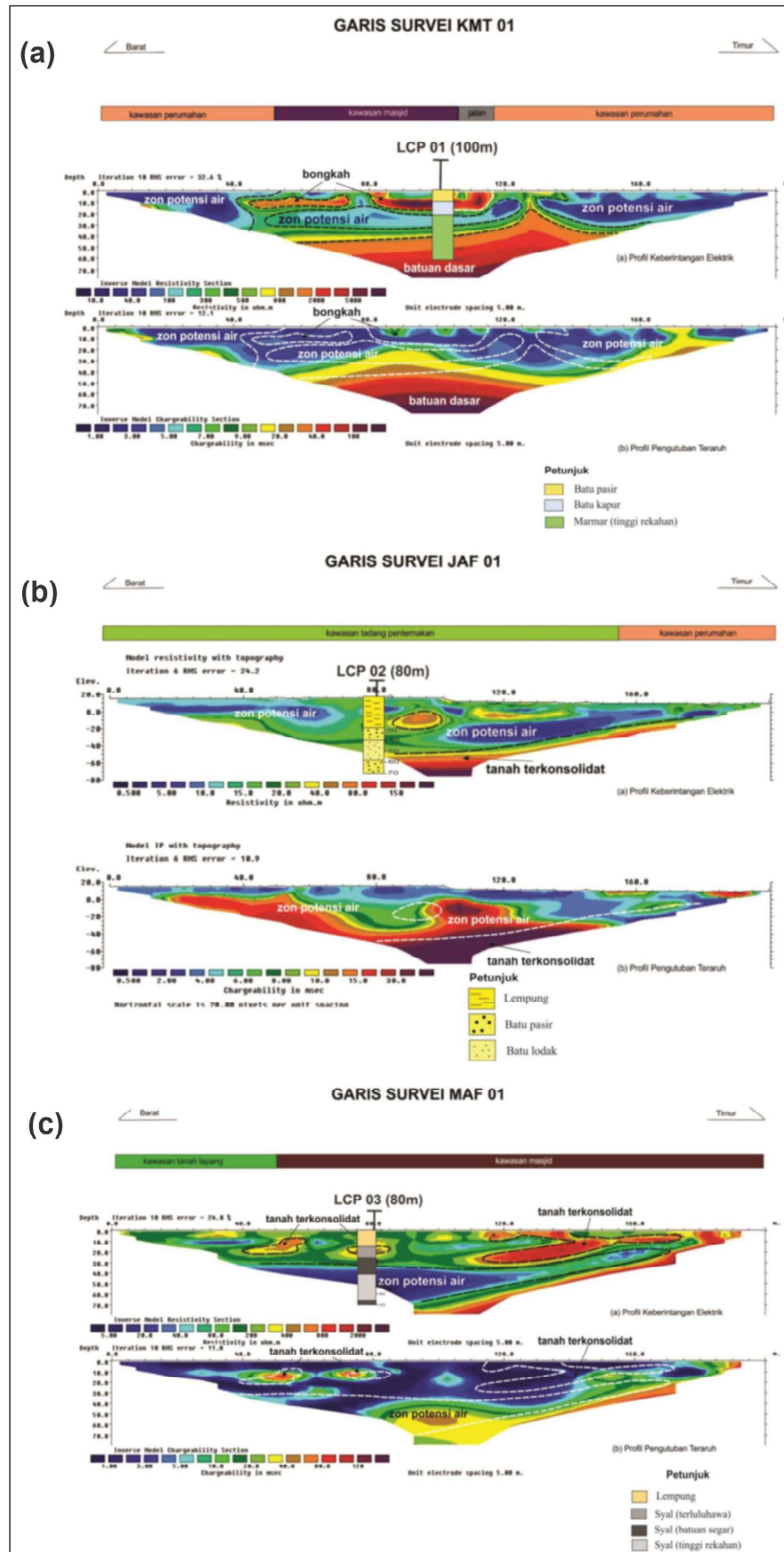
PERBANDINGAN POTENSI AIR BAWAH TANAH BATU KAPUR DAN BATU METASEDIMEN

Perbandingan potensi air bawah tanah antara kawasan batu kapur dan batu metasedimen dapat dibuat dengan menggabungkan maklumat imej keberintangan 2D serta data lubang gerudi di Kg. Malaysia Tambahan (KMT 01; batu kapur), Jariah Agro Farm (JAF 01; batu metasedimen berpasir) dan Masjid Raja Haji Fisabilillah (MAF 01; batu metasedimen bersyal) sepertimana yang ditunjukkan dalam Rajah 8. Secara umumnya, nilai keberintangan yang tinggi mewakili batuan yang lebih padat dan kurang telap, manakala zon keberintangan rendah lazimnya berkait rapat dengan zon tepu air atau zon dengan kandungan lempung yang lebih tinggi, selari dengan tafsiran geoelektrik dalam kajian kaedah geofizik terkini (Loke et al. 2013; Nugraha et al. 2025).

Di Kg. Malaysia Tambahan (Rajah 8(a)), bongkah batu kapur cetek dikesan pada kedalaman kira-kira 10–20 m dengan nilai keberintangan tinggi (800–2000 Ωm) manakala batuan dasar di bahagian bawah terdiri daripada marmar yang mempunyai julat keberintangan yang hampir



RAJAH 7. Profil keberintangan elektrik dan pengutuban teraruh teraruh garis survei (a) UMPS 01, dan (b) UMPS 02



RAJAH 8. Korelasi data lubang gerudi dan imej keberintangan 2D (a) KMT 01, (b) JAF 01, dan (c) MAF 01

sama. nilai keberintangan tinggi (800–2000 Ωm) ini selari dengan sifat batu kapur dan marmar segar yang tidak konduktif, berketumpatan tinggi dan kandungan air yang terhad. Dalam sistem batu kapur, potensi guna air bawah tanah lazimnya dikawal oleh porositi sekunder seperti rekahan, saluran pelarutan dan rongga kars (Zerga 2024), manakala porositi matriks lebih banyak menyumbang kepada simpanan air jangka panjang (Worthington, Davies & Clifford 2000; Manda & Gross 2006). Oleh itu, zon potensi air cenderung hadir sebagai jasad keberintangan lebih rendah yang bertindih di antara bongkah batu kapur/marmar. Walau bagaimanapun, ketebalan zon tepu air berkemungkinan terhad berikutan kedudukan bongkah dan batuan dasar pada kedalaman yang cetek. Akuifer batu kapur di lokaliti ini dijangka berbentuk poket atau saluran kars setempat dengan ketersambungan mendatar yang tidak sekata. Keadaan ini sepadan dengan ciri akuifer kars yang umumnya bersifat heterogen dan sukar diramal (Ford & Williams, 2007; Rusjan et al. 2023).

Sebaliknya, di Jariah Agro Farm yang terletak di kawasan batu metasedimen Formasi Bukit Kenny menunjukkan sistem akuifer yang lebih berkesinambungan (Rajah 8(b)). Terdapat lapisan lempung tebal hampir 30 m yang menindih lapisan batu pasir. Lapisan batu pasir yang tepu air ini dicirikan oleh keberintangan rendah dengan julat 0.5–40 Ωm . Nilai ini menandakan keporosan berbutir yang tinggi dan tahap ketepuan air yang baik. Tanah terkonsolidat atau batu pasir di bahagian bawah bersifat lebih mampat dengan nilai keberintangan sederhana (40–150 Ωm) dan kebolehcasan rendah (15–30 ms) yang menandakan lapisan tersebut telah mengalami proses pemadatan. Kehadiran mineral lempung dalam batu pasir boleh menyempitkan liang dan menurunkan kebolehtelapan batuan (Wang 2020; Mbouaki et al. 2025). Dalam konteks hidrogeologi, susunan lapisan lempung tebal dan batu pasir berpori ini memberi gambaran potensi air bawah tanah yang tinggi dengan zon tepu air lebih tebal berbanding Kg. Malaysia Tambahan.

Masjid Raja Haji Fisabilillah juga didasari Formasi Bukit Kenny namun litologinya lebih didominasi oleh batuan syal (Rajah 8(c)). Tanah terkonsolidat yang ditafsirkan sebagai syal segar direkodkan mempunyai keberintangan tinggi ber julat 100–2000 Ωm . Nilai dalam julat ini menggambarkan sifatnya yang padat dan kurang telap. Zon potensi air di lokaliti ini tidak berkembang di dalam matriks batuan, sebaliknya berkedudukan dalam rekahan syal dengan keberintangan lebih rendah (0–100 Ωm) pada kedalaman sekitar 30–70 m. Kewujudan rekahan syal dan zon lemah ini menjadi laluan utama aliran ke dalam matriks batuan disebabkan oleh tekanan (Murugesu et al. 2024). Hal ini memberi tafsiran bahawa akuifer di Cyberjaya bersifat rekahan (*fractured aquifer*) di mana taburannya lebih bersifat setempat berbanding akuifer batu pasir di Jariah Agro Farm. Kesinambungan zon ini lazimnya adalah terhad dan bergantung kepada orientasi dan kepadatan rekahan. Oleh itu, penentuan tapak telaga memerlukan korelasi teliti dengan gabungan data geoelektrik dan maklumat struktur geologi.

Berdasarkan kepada perbandingan tiga lokaliti ini, beberapa kesimpulan penting berkaitan potensi air bawah tanah batu kapur dan batu metasedimen boleh dibuat. Pertama, dari segi julat keberintangan, batu kapur/marmar segar di Kg. Malaysia Tambahan dan syal segar di Cyberjaya sama-sama menunjukkan nilai keberintangan yang tinggi, namun mekanisme penyimpanan airnya adalah berbeza. Batu kapur dikawal oleh pelarutan dan pembentukan rongga kars, manakala lapisan syal dikawal oleh rekahan. Kedua, batu metasedimen berpasir di Jariah Agro Farm memberikan susunan akuifer paling ideal berikutan kewujudan lapisan berbutir dengan keporosan yang tinggi dan lapisan lempung sebagai penakung menjadikan akuifer lebih tebal dan terlindung. Ketiga, zon tepu air di semua lokasi dicirikan oleh keberintangan rendah ($\leq 100 \Omega\text{m}$), namun interpretasi litologi batuan perlu dibuat bagi memperoleh data yang lebih tepat. Keberintangan rendah dalam batu kapur atau syal menandakan zon rekahan/pelarutan yang terisi air, manakala dalam batu pasir ia lazimnya menandakan matriks berpori yang tepu air. Corak ini konsisten dengan dapatan kajian ERT–lubang gerudi di pelbagai akifer karbonat dan sedimen yang menunjukkan bahawa kombinasi maklumat geofizik dan litologi adalah kritikal untuk menilai potensi air bawah tanah secara berkesan (Loke et al., 2013; Todd & Mays, 2005). Secara keseluruhannya, akuifer batu pasir Formasi Bukit Kenny (JAF 01) menunjukkan potensi air bawah tanah yang paling tinggi dan stabil, diikuti oleh akuifer rekahan dalam syal (MAF 01). Akuifer batu kapur di Kg. Malaysia Tambahan mempunyai potensi air bawah tanah sederhana dan bergantung kepada kewujudan rongga atau rekahan kars.

KESIMPULAN

Secara kesimpulannya, batuan metasedimen dari Formasi Bukit Kenny mempunyai potensi air bawah tanah lebih tinggi berbanding batu kapur Kuala Lumpur. Nilai keberintangan dan kebolehcasan zon potensi air bawah tanah bagi akuifer batuan metasedimen ber julat 0–100 Ωm dan 0–5 ms dengan kedalaman sumber air mencecah 70 m (Jadual 1). Sebaliknya, nilai keberintangan dan kebolehcasan zon potensi air bawah tanah bagi akuifer batu kapur pula ber julat 0–200 Ωm dan 0–50 ms dengan kedalaman sumber air menjangkau 100 m. Sistem akuifer dengan litologi batuan yang berbeza mempunyai mekanisme penyimpanan air berbeza berikutan tahap keporosan dan kehadiran struktur geologi seperti rekahan akibat proses luluhawa berterusan. Walau bagaimanapun, kajian ini mempunyai limitasi seperti nilai ralat RMS yang agak tinggi bagi beberapa garis seperti UMPS 01, KMT 02 menandakan ketaksaaan model, bilangan lubang gerudi yang terhad dan ketiadaan ujian pam serta pemantauan paras air di lapangan. Sebagai kajian lanjutan, adalah dicadangkan pelaksanaan survei tambahan (ERT/IP 3D atau garis 2D yang lebih rapat) di zon akuifer utama, penambahan lubang gerudi penentusahan serta ujian pam untuk mendapatkan parameter hidraulik

JADUAL 1. Rumusan maklumat nilai julat keberintangan, nilai kbolehkancasan serta kedalaman sumber air bagi setiap kawasan kajian

Nama lokaliti	Formasi batuan	Kedalaman sumber air (m)	Julat nilai keberintangan (Ωm)	Julat nilai kebolehcasan (ms)
Surau Ad Dinniyah, Batu Caves (SAD 01)	Batu Kapur Kuala Lumpur	30-70	5-200	10-50
Surau Ad Dinniyah, Batu Caves (SAD 02)	Batu Kapur Kuala Lumpur	0-40	0.5-100	0-3
Kg. Malaysia Tambahan, Sungai Besi (KMT 01)	Batu Kapur Kuala Lumpur	0-40	10-200	1-5
Kg. Malaysia Tambahan, Sungai Besi (KMT 02)	Batu Kapur Kuala Lumpur	10-40	10-200	1-10
Universiti Malaya Perdana Siswa, Petaling Jaya (UMPS 01)	Formasi Bukit Kenny	25-100	0-100	0-4
Universiti Malaya Perdana Siswa, Petaling Jaya (UMPS 02)	Formasi Bukit Kenny	25-70	0-100	0-4
Jariah Agrofarm, Shah Alam (JAF 01)	Formasi Bukit Kenny	30-60	0.5-40	0.5-5
Jariah Agrofarm, Shah Alam (JAF 02)	Formasi Bukit Kenny	30-40	0.5-40	0.5-5
Masjid Raja Haji Fisabilillah, Cyberjaya (MAF 01)	Formasi Bukit Kenny	30-70	0-100	0.5-5
Masjid Raja Haji Fisabilillah, Cyberjaya (MAF 02)	Formasi Bukit Kenny	30-70	0-100	0.5-5

dijalankan pada masa hadapan. Integrasi pemetaan struktur geologi terperinci mengukuhkan asas pengurusan sumber air bawah tanah di kawasan Lembangan Sungai Klang.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada Syarikat Geo Technology Resources Sdn Bhd (GTRSB) dan Jabatan Mineral dan Geosains (JMG) di atas sokongan bagi menjayakan penyelidikan ini. Penghargaan ini turut dipanjangkan kepada Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM) di Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas pembiayaan penyelidikan ini melalui dana Geran Universiti Penyelidikan, GUP-2024-025.

RUJUKAN

- Abdel Moneim, A.A. 2005. Overview of the geomorphological and hydrogeological characteristics of the Eastern Desert of Egypt. *Hydrogeology Journal* 13: 416-425.
- Alao, J.O. & Abubakar, F. 2025. Groundwater exploration, management strategies and sustainability: Geophysical approaches. *Geosystems and Geoenvironment* 4(3): 100395.
- Ford, D.C. & Williams, P. 2007. Karst Hydrogeology and geomorphology. Chichester: John Wiley.
- Goh, B.H. 2000. Pemetaan geomorfologi lembangan labu, negeri sembilan dengan bantuan fotograf udara. Tesis Sarjana Muda. Selangor: Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Kamaraj, P. & Karuppannan, S. 2024. Dataset of geophysical electrical resistivity and subsurface profiling for natural resources exploration in a hard rock terrain of Tamil Nadu, India. *Data in Brief* 54: 110311.
- Kayode, J.S., Arifin, M.H., Mansor, M.I., Malek, N.N.A., Musa, R.C., Shahri, S., Izehar, N.H. & Umor, M.R. 2023. Hydrogeophysical modeling of the groundwater aquifer units under climate variability in parts of Peninsular Malaysia: A case study of the climate-water nexus approach to sustainability. *Heliyon* 9(3): e13710.
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. & Wilkinson, P.B. 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95:135-156.
- Madun, A., Tajudin, S.A.A., Sahdan, M.Z., Md Dan, M.F. & Talib, M.K.A. 2018. Electrical resistivity and induced polarization techniques for groundwater exploration. *International Journal of Integrated Engineering* 10(8): 56-60.

- Manda, A.K. & Gross, M.R. 2006. Identifying and characterizing solution conduits in karst aquifers through geospatial (GIS) analysis of porosity from borehole imagery: An example from the Biscayne aquifer, South Florida (USA). *Advances in Water Resources* 29: 383–396.
- Mbouaki, A.P.M., Cai, Z., Sikanyika, E.W., Mwakipunda, G.C. & Konan, H.R. 2025. Petrophysical evaluation of a shaly sandstone reservoir and the effect of clay minerals on reservoir quality: A case study from the Barremian Mengo Sandstone, Kouilou Basin, Republic of Congo. *ACS Omega* 10(10): 10081–10106.
- Mukherjee, A., Jha, M.K., Kim, K.-W. & Pacheco, F.A.L. 2024. Groundwater resources: challenges and future opportunities. *Scientific Reports* 14: 28540.
- Murugesu, M.P., Vega, B., Ross, M., Kurotori, T., Druhan, J.L. & Kovscek, A.R. 2024. Coupled transport, reactivity, and mechanics in fractured shale caprocks. *Water Resources Research* 60(1): e2023WR035482.
- Nugraha, G.U., Bakti, H., Lubis, R.F., Mulyono, A., Ulfa, Y. & Sudrajat, Y. 2025. Data driven resistivity zonation integrating inversion kriging and clustering for subsurface characterization in groundwater exploration. *Discover Water* 5: 62.
- Paine, J.G. & Minty, B.R.S. 2005. Airborne hydrogeophysics. Dlm. Rubin, Y. & Hubbard, S.S. (Pnyt.). *Hydrogeophysics*. Springer: Dordrecht.
- Raihan, A., Pereira, J.J., Begum, R.A. & Rasiah, R. 2023. The economic impact of water supply disruption from the Selangor River, Malaysia. *Blue-Green Systems* 5(2): 102–120.
- Revil, A., Vaudelet, P., Su, Z. & Chen, R. 2022. Induced polarization as a tool to assess mineral deposits: A review. *Minerals* 12(5): 571.
- Reynolds, J.M. 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Saad, R., Noordin, M.N.M. & Mohamad, E.T. 2012. Groundwater detection in alluvium using 2-d electrical resistivity tomography (ERT). *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 17: 369–376.
- Samsudin, A.R. 1990. *Geofizik: Konsep dan Penggunaan*. Kuala Lumpur: Penerbit Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Dlm. Resistivity Method. Cambridge University Press, ms. 535–538.
- Thomas, B., Vinka, C., Pawan, L. & David, S. 2022. Sustainable groundwater treatment technologies for underserved rural communities in emerging economies. *Science of The Total Environment* 813: 152633.
- Todd, D. & Mays, L. 2005. *Groundwater Hydrology*, Edisi ke-3. Hoboken: John Wiley and Sons.
- Villholth, K.G. 2006. Groundwater assessment and management: Implications and opportunities of globalization. *Hydrogeology Journal* 14: 330–339.
- Wang, L. 2020. Clay stabilization in sandstone reservoirs and the perspectives for shale reservoirs. *Advances in Colloid and Interface Science* 276: 102087.
- Willbourn, E.S. 1922. A general account of the geology of Malay Peninsula and the surrounding countries, including Burma, the Shan States, Yunnan, Indo-China, Siam, Sumatra, Java, Borneo and other islands of the Dutch East. *Journal of the Straits Branch of the Royal Asiatic Society* 86: 237–256.
- Worthington, S.R.H., Ford, D.C. & Davies, G.J. 2000. Matrix, fracture and channel components of storage and flow in a Paleozoic limestone aquifer. Dlm. Sasowsky, I.D. & Wicks, C.M. (Pnyt.). *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Zerga, B. 2024. Karst topography: Formation, processes, characteristics, landforms, degradation and restoration: A systematic review. *Watershed Ecology and the Environment* 6: 252–269.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: azlanshah@nm.gov.my