

Peranan geofizik dalam pembinaan dan penilaian kestabilan terowong

(The role of geophysics in the construction and stability assessment of tunnels)

NIK ADIB YAAZIZ*, MOHD HARIRI ARIFIN

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

* Corresponding author email address : p106589@siswa.ukm.edu.my

Abstrak: Bidang geofizik memainkan peranan yang penting dalam pembinaan mana-mana struktur utama di dunia. Salah satu daripada struktur buatan manusia ialah terowong. Pelbagai maklumat dan kaedah geofizik perlu difahami secara mendalam sebelum merangka sebuah projek pembinaan terowong. Penyiasatan menyeluruh terhadap keadaan bumi perlu dilakukan terlebih dahulu sebelum kajian persediaan lapangan yang akan menentukan tempoh masa bertahan tanpa sokongan dan keadaan air bawah tanah yang mungkin menyukarkan pembinaan terowong. Bagi menilai kestabilan terowong pula, integrasi pelbagai kaedah diperlukan untuk mendapatkan hasil kajian yang lebih tepat. Tafsiran imej satelit menekankan kepada surihan struktur lineamen negatif manakala pemetaan lapangan menekankan kepada lokasi resapan air bawah tanah dan struktur tektonik utama seperti sesar, kekar dan zon ricih. Survei tomografi keberintangan geoelektrik dapat mengenalpasti keberintangan bahan yang berbeza di mana ia dapat menentukan kandungan air di dalam bahan bumi. Pemilihan langkah-langkah pemulihan akan ditentukan berdasarkan dapatan hasil kajian tersebut.

Kata kunci: Terowong, penggalan, penilaian kestabilan, pemulihan

Abstract: Geophysics play a vital role in the constructions of any major manmade structures in the world. One of those being the tunnels. In depth understanding of geophysical methods and a lot of information are needed in order to design a tunnel construction project. Comprehensive investigation on the ground condition has to be done before the field preparation study that will determine the stand-up time and the groundwater condition that may disrupt the tunnel construction. For tunnel stability assessment, an integration of geophysical methods is a must in order to obtain the most accurate results. Satellite imaging interpretation emphasizes on the structural tracing of negative lineament while field mapping emphasizes on location of underground seepage and major tectonic structures such as faults, joints and shear zones. Geoelectrical resistivity tomography survey is able to identify the differences in resistivity of Earth's materials based on the water content inside of them. The best course of remediation could only be chosen once the output from all these studies are made available.

Keywords: Tunnel, drilling, stability assessment, remediation

PENGENALAN

Terowong ialah sebuah lorong bawah tanah, digali melalui bahan bumi sama ada tanah atau batuan sekitarnya dan tertutup kecuali di pintu masuk dan keluar di setiap penghujungnya. Terowong umumnya agak panjang dan sempit di mana panjangnya adalah lebih jika dibandingkan dengan diameternya. Kegunaan terowong mungkin berbeza, sama ada sebagai laluan pejalan kaki, laluan lalu lintas kenderaan, laluan keretapi ataupun sebagai terusan. Sesetengah terowong bertindak sebagai akueduk untuk membekalkan air untuk diminum ataupun untuk kegunaan stesen janaelektrik (Rajah 1) dan pembentungan. Terowong kemudahan awam digunakan untuk penghalaan stim, air

sejuk, bekalan elektrik ataupun kabel telekomunikasi serta menghubungkan bangunan-bangunan dengan laluan bagi manusia dan peralatan. Terowong rahsia pula dibina untuk kegunaan ketenteraan atau oleh orang tertentu bagi tujuan penyeludupan senjata haram, kontraband ataupun manusia. Terowong khas seperti lintasan haiwan liar dibina semata-mata untuk membolehkan binatang menyeberangi mana-mana halangan buatan manusia. Terowong boleh dihubungkan bersama melalui rangkaian terowong yang meluas. Tidak kira apa jenis terowong sekalipun, pembinaan dan penyelenggaraan kesemuanya adalah lebih kurang sama. Di antara semua bidang kepakaran yang sama terlibat, bidang geofizik merupakan antara



Rajah 1: Terowong Janakuasa Hidroelektrik TNB Pergau, Jeli, Kelantan. Sumber: Mohd Hariri Arifin.

yang paling penting apabila melibatkan pembinaan dan kestabilan terowong.

PEMBINAAN TEROWONG

Sebuah projek terowong utama mesti bermula dengan penyiasaan keadaan bumi yang menyeluruh dengan memperolehi sampel-sampel dari lubang gerudi dan juga menerusi teknik-teknik geoteknikal yang lain. Pilihan jentera dan kaedah yang tepat kemudiannya dapat dibuat bagi penggalian dan sokongan tanah di mana ianya akan dapat mengurangkan risiko menghadapi masalah keadaan bumi yang tak terduga. Di dalam perancangan laluan terowong, penjarangan menegak dan melintang perlu diambil kira untuk menentukan keadaan bumi dan air yang terbaik. Adalah menjadi amalan biasa untuk merancang terowong yang lebih dalam dari yang diperlukan supaya dapat menggali batuan pejal dan bahan-bahan lain yang lebih mudah untuk ditampung semasa pembinaan.

Kajian persediaan lapangan mungkin memberikan maklumat yang tidak mencukupi untuk menilai faktor-faktor seperti sifat bongkah batuan, kedudukan tepat zon-zon sesar ataupun tempoh masa bertahan tanpa sokongan (*stand-up time*) bahan bumi yang lembut. Ini adalah kebimbangan yang utama di dalam terowong yang berdiameter besar. Untuk mendapat maklumat yang lebih, kebiasaannya sebuah terowong rintis akan dibuat terlebih dahulu sebelum penggalian utama. Terowong yang lebih kecil adalah berkemungkinan rendah untuk roboh dengan teruk sekiranya syarat-syarat tertentu dipatuhi dan ianya boleh dimasukkan ke dalam terowong akhir atau digunakan sebagai sandaran atau laluan pelepasan kecemasan. Sebagai langkah alternatif, lubang gerudi melintang boleh dibuat sebelum memajukan muka terowong.

Faktor-faktor geoteknikal yang lain:

- Tempoh masa bertahan tanpa sokongan ialah jumlah masa sesuatu rongga yang baru digali dapat menampung secara sendiri tanpa bantuan struktur tambahan. Dengan mengetahui parameter ini, ia

mbolehkan jurutera untuk menentukan sejauh mana penggalian dapat dilakukan sebelum system sokongan diperlukan, di mana ianya akan turut mempengaruhi kelajuan, keberkesanan dan juga kos pembinaan. Secara dasarnya, sesetengah konfigurasi batuan dan lempung mempunyai tempoh masa bertahan tanpa sokongan paling lama manakala pasir dan tanah halus mempunyai tempoh masa bertahan tanpa sokongan yang jauh lagi pendek (Sutcliffe, 2004).

- Pengawalan air bawah tanah adalah sangat penting dalam pembinaan terowong. Kebocoran air ke dalam terowong atau syaf menegak akan mengurangkan tempoh masa bertahan tanpa sokongan dengan ketara. Ini akan mengakibatkan penggalian untuk menjadi tidak stabil dan berisiko untuk runtuh. Cara yang paling biasa digunakan untuk mengawal air bawah tanah ialah dengan memasang paip penyahairan ke dalam bumi dan mengepam keluar air (Powers *et al.*, 2007).
- Bentuk keratan rentas terowong juga amat penting dalam menentukan tempoh masa bertahan tanpa sokongan. Jika penggalian terowong adalah lebih lebar berbanding tinggi, ia akan lebih susah untuk menampung dengan sendiri, justeru, mengurangkan tempoh masa bertahan tanpa sokongan. Penggalian secara segi empat sama atau segi empat tepat adalah lebih susah untuk dibuat sokongan sendiri disebabkan oleh penumpuan tekanan di penjuru (United States Army Corps of Engineers, 2007).

Terowong digali pada bahan bumi yang berlainan, dari lempung yang lembut kepada batuan yang keras. Kaedah pembinaan terowong bergantung kepada faktor-faktor seperti keadaan bumi, keadaan air bawah tanah, panjang dan diameter terowong pandu, kedalaman terowong, logistik yang membantu penggalian terowong, kegunaan akhir dan bentuk terowong serta pengurusan risiko yang mencukupi.

Ada tiga jenis asas pembinaan terowong yang menjadi kebiasaan untuk digunakan. Terowong potong-dan-tutup (*cut-and-cover*) dibina di parit cetek dan seterusnya ditutupi. Terowong gerudi dibina *in situ* tanpa mengalihkan tanah di atasnya. Akhir sekali, sebuah tiub ditenggelamkan ke dalam sesuatu badan air, yang mana terowong ini dipanggil sebagai terowong tenggelam. Contoh pembinaan terowong menerusi kaedah penggerudian ialah seperti di dalam Rajah 2.

PENILAIAN KESTABILAN TEROWONG

Setelah penggunaan selama beberapa dekad, setiap terowong harus menjalani penilaian kestabilan yang menyeluruh di samping penyenggaraan berkala agar dapat dipastikan tahap kesesuaian dan keselamatannya untuk terus digunakan. Jika didapati tidak selamat, langkah-langkah pemulihan boleh dilakukan untuk mengelak daripada berlakunya kemalangan.

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 (Rajah 3). Pendekatan integrasi melibatkan pelbagai kaedah seperti pemetaan lapangan, tafsiran imej satelit, survei tomografi keberintangan geoelektrik dan yang sepertinya boleh digunakan.

Penggunaan imej satelit semakin berkembang dan digunakan secara meluas dalam bidang geologi. Imej satelit yang berkualiti dan beresolusi tinggi boleh memberi maklumat penting seperti kehadiran lineamen. Tafsiran

lineamen bertujuan untuk mendapatkan maklumat rantau taburan, orientasi dan ketumpatan struktur dalam kawasan kajian (Rajah 4).

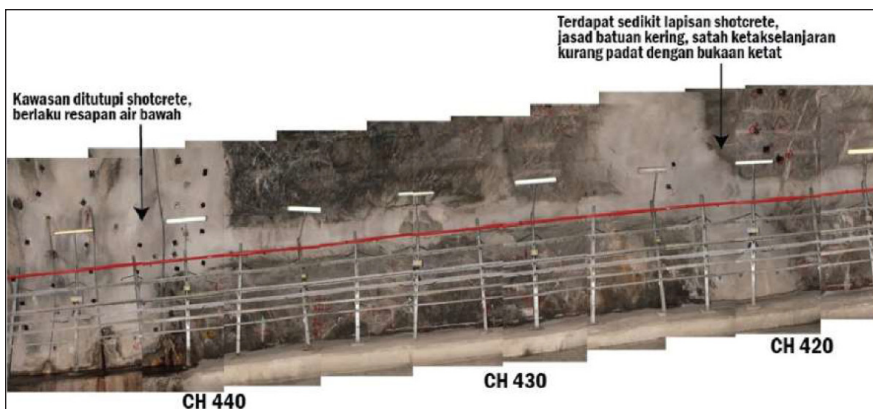
Pemetaan lapangan pula menekankan kepada lokasi resapan air bawah tanah dan struktur tektonik utama seperti sesar, kekar dan zon ricih. Sepanjang garis survei, catatan lapangan pada bahagian dinding terowong dilakukan untuk melihat sebarang fitur atau maklumat penting yang boleh membantu dalam proses tafsiran (Rajah 5).

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. Survei tomografi keberintangan geoelektrik dijalankan pada bahagian dinding terowong (Rajah 6). Analisis data akan 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). Zon mengandungi air adalah zon kelemahan yang menyumbang kepada ketidakstabilan sesebuah terowong.

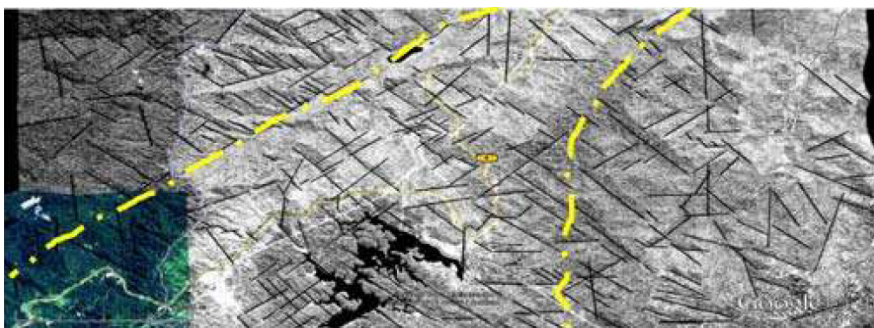
Bagi kawasan-kawasan yang mempunyai aliran air, sistem saluran air perlu dipasang di bahagian tepi bukaan



Rajah 2: Pembinaan terowong Kuantan sepanjang 2.86 km oleh Syarikat China Communications Construction Sdn Bhd (CCC) untuk projek Laluan Rel Pantai Timur (ECRL).
Sumber: Foto Arkib NSTP.



Rajah 3: Keadaan jasad batuan di lapangan (selepas pembinaan) menunjukkan keadaan jasad batuan granit yang mempunyai nilai keberintangan tinggi.
Sumber: Hussin *et al.*, 2020.



Rajah 4: Peta surihan lineamen yang ditafsirkan daripada imej satelit Google Earth.
Sumber: Arifin *et al.*, 2016.

untuk menyalurkan air ke luar daripada belakang sistem sokongan, iaitu di antara jasad batuan dan sistem sokongan. Bagi kawasan-kawasan di mana runtuh berskala kecil telah berlaku, pengisian semula (*back filling*) perlu dilaksanakan semasa kerja pemulihan supaya keratan bukaan adalah seragam.

Kawasan di mana runtuh besar telah berlaku memerlukan pemasangan kerangka konkrit berterusan (*continuous cast concrete lining*) bersama dengan sistem saluran air, selepas pengisian semula dilaksanakan.

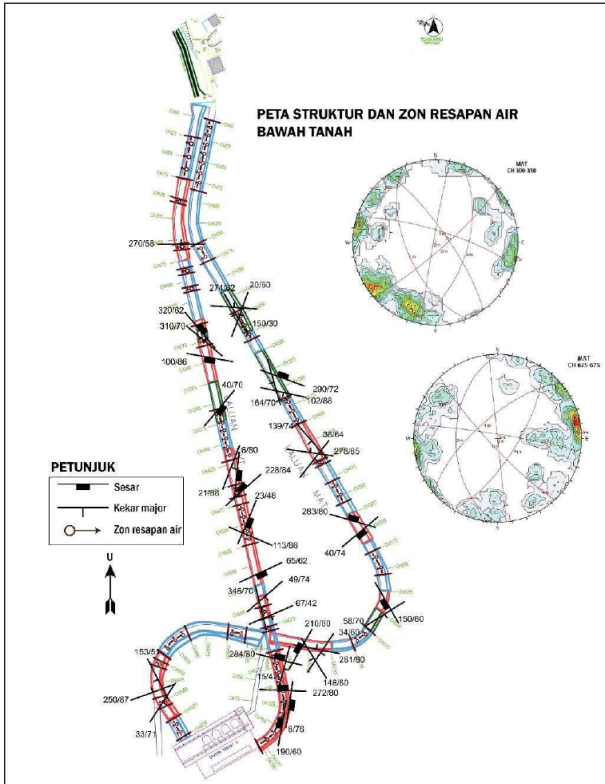
Semasa kerja-kerja pembaikan dijalankan, penggunaan bahan letupan perlu dielakkan sama sekali. Penggunaan alat pemotong dan kerja pembersihan perlu dijalankan menggunakan mesin dengan tahap gegaran yang minima untuk mengelak dari berlaku runtuh akibat daripada gegaran.

PENUTUP

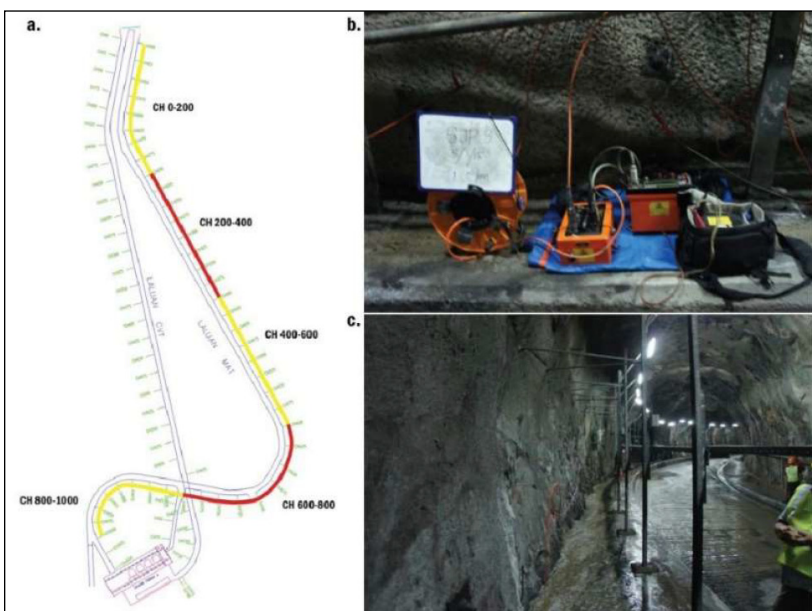
Dapat dilihat daripada penjelasan di atas bahawa bidang geofizik amat penting dalam projek terowong. Ahli geofizik bertanggungjawab dalam penyiasatan keadaan bumi dan air bawah tanah, penyeliaan lubang gerudi, perancangan reka bentuk terowong, penentuan tempoh masa bertahan tanpa sokongan, pengurusan risiko dan penilaian kestabilan terowong. Pendek kata, ahli geofizik akan memainkan peranan daripada mula peringkat perancangan dan berterusan sehinggalah ke peringkat pemulihan.

PENGHARGAAN

Pengarang ingin memberikan sekalung penghargaan kepada pengarang-pengarang terdahulu yang menjadi sumber rujukan kepada penulisan ini. Segala maklumat-maklumat penting dan terkini di dalam artikel ini datangnya daripada hasil kajian mereka. Pengarang juga ingin menyatakan penghargaan kepada para pewasit diatas semakan dan cadangan tambah baik artikel. Turut dizahirkan penghargaan kepada penyunting dan penerbit artikel ini di atas bantuan dalam membentuk dan menerbitkan artikel ini.



Rajah 5: Ringkasan struktur sesar dan kekar major serta lokasi resapan air di sepanjang dinding-dinding terowong. Sumber: Hussin *et al.*, 2020.



Rajah 6: a) Peta lokasi survei tomografi keberintangan geoelektrik dilakukan (garisan warna kuning); b) sistem ABEM SAS 4000 dalam kajian; c) Pengukuran data di lapangan.

REFERENCES / RUJUKAN

- Arifin, M.H., Rafek, A.G., Abdullah, I. & Umor, M.R., 2010. Geologi pemeliharaan dan pemuliharaan bekas terowong Sungai Lembing, Kuantan, Pahang sebagai tapak warisan geologi. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 56, 61 – 66.
- Arifin, M.H., Jamaluddin, T.A., Husin, H., Ismail, A., Abbas, A. A., Nordin, M.N.M. & Othman, N.A., 2016. Comparison of geological mapping with electrical resistivity and ground penetration radar methods for rock fractured system study. Chiang Mai Journal of Science, 43(6), 1346 – 1357.
- Hussin, H., Arifin, M.H., Jamaluddin, T.A., Fahmi, A.G.M., Ismail, N. & Manan, A.A., 2020. Integrasi pemetaan lapangan, tafsiran lineamen dan survei tomografi keberintangan geoelektrik dalam pencirian jasad batuan granit terlindung shotcrete. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 69, 39 – 51.
- <https://www.hmetro.com.my/mutakhir/2021/01/666929/tahap-kemajuan-cerl-seksyen-b-melepasi-sasaran>
- Powers, J.P., Corwin, A.B., Schmall, P.C. & Kaeck, W.E., 2007. Construction dewatering and groundwater control. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ. 623 p.
- Sutcliffe, H., 2004. Tunnel Boring Machines. In: John O. Bickel, Thomas R. Kuesel & Elwyn H. King, (Eds.), Tunnel Engineering Handbook (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London. 210 p.
- United States Army Corps of Engineers, 1978. Tunnels and shafts in rock. Department of the Army, Washington DC.

*Manuscript received 10 June 2021;
Received in revised form 7 November 2021;
Accepted 9 November 2021
Available online 29 December 2021*