

**STUDI REKAHAN PADA TEROWONGAN KERETA API DENGAN
METODE GROUND PENETRATING RADAR (GPR)
(STUDI KASUS DI DAERAH SASAKSAAT)
PADALARANG JAWA BARAT**

Syahril

*Laboratorium Pendidikan Fisika, Jurusan PMIPA FKIP
Universitas Riau, Pekanbaru 28293*

Abstract

Ground Penetrating radar (GPR) is a geophysical method that uses electromagnetic wave propagation and has a high resolution towards dielectric contrast in rocks. In this paper, the method is radar reflection profiling and data processing by using software Reflex W Test Version. In situ measurement of electromagnetic was carried out by georadar method using Ramac GPR at frequency of 200 MHz in side of tunnel. The result of the measurement indicate there are many joint in the concrete of tunnel wall it trade mark carbonate calsite in the stone.

Key words: joint, GPR, tunnel

Pendahuluan

Perkembangan metode geofisika dewasa ini sangat pesat dan salah satu metode yang terus berkembang adalah *Ground Penetrating Radar* (GPR). GPR merupakan teknik eksplorasi geofisika yang menggunakan gelombang elektromagnet, bersifat non destruktif dan mempunyai resolusi tinggi terhadap kontras dielektrik material bumi dan mampu melakukan pendeteksian formasi geologi yang relatif dangkal dengan resolusi tinggi seperti dalam menganalisa rekahan. Pendeteksian tersebut ditandai dengan adanya perubahan konstanta dielektrik yang disebabkan karena batuan tersaturasi fluida, yaitu akan menghasilkan kontras impedansi elektromagnet antara bagian yang tersaturasi dan yang tidak tersaturasi, yang menyebabkan refleksi pulsa GPR. Sedang pada rekahan, bila terisi oleh lempung atau air akan menjadi reflektor, sehingga gelombang elektromagnetik semakin kuat karena kontras cepat rambat antara rekahan dan batuan di sekelilingnya.

Pada kebanyakan kondisi geologi, faktor yang paling dominan mempengaruhi respon sinyal GPR adalah *sifat listriknya*,

sedangkan variasi magnetnya sangat kecil. Medan listrik yang merambat pada material ditentukan oleh pergerakan muatan listrik (arus listrik) yang terdiri dari arus konduksi dan arus pergeseran. Persamaan Maxwell yang digunakan untuk membangkitkan medan listrik oleh suatu radiasi antena frekuensi radio adalah sebagai berikut:

$$\nabla^2 E + \omega^2 \epsilon \mu E + i \omega \mu \sigma E = 0 \dots\dots\dots (1)$$

Untuk gelombang bidang yang merupakan karakteristik bentuk muka gelombang (*wavefront*) radar mempunyai solusi:

$$E = E_0 e^{-ikz} \dots\dots\dots (2)$$

dengan :

$$k = (\omega^2 \epsilon \mu + i \omega \mu \sigma)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

dengan k adalah parameter propagasi atau bilangan gelombang. Bagian riil dari k berkaitan dengan faktor fasa β dan bagian imajiner berkaitan dengan koefisien atenuasi α gelombang. Bagian riil dan imajiner bilangan

^{*)} Komunikasi penulis

gelombang k dapat dituliskan kembali yang diungkapkan dalam bentuk faktor fasa dan koefisien atenuasi: $k = \beta + i\alpha$

$$\beta = 2\pi / \lambda = \omega \left\{ \frac{\epsilon\mu}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha(\omega) = 1/\delta = \omega \left\{ \frac{\epsilon\mu}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

Keberhasilan dari metode GPR bergantung pada variasi bawah permukaan yang dapat menyebabkan gelombang tertransmisikan. Perbandingan energi yang direfleksikan disebut koefisien refleksi (R) yang ditentukan oleh perbedaan cepat rambat gelombang elektromagnetik dan lebih mendasar lagi adalah dari konstanta dielektrik relatif dari media yang berdekatan (Annan, 1992). Hal ini dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \text{ atau } R = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (6)$$

dimana : V_1 dan V_2 adalah cepat rambat gelombang elektromagnet pada lapisan 1 dan lapisan 2 dan $V_1 < V_2$, ϵ_1 dan ϵ_2 adalah konstanta dielektrik relatif lapisan 1 dan lapisan 2.

Dalam semua kasus, besaran R terletak -1 dan 1. Bagian dari energi yang di transmisikan sama dengan $1-R$. Persamaan (18), (19) diaplikasikan untuk keadaan normal pada permukaan bidang datar. Dengan asumsi tidak ada sinyal yang hilang sehubungan dengan amplitudo sinyal. Untuk menyatakan proses melemahnya energi gelombang elektromagnet akibat penyerapan di kenal dengan istilah *Skin depth*, dimana *Skin depth* adalah kedalaman dimana sinyal telah berkurang menjadi $1/e$ (37 %) dari nilai awal dan berbanding terbalik dengan faktor atenuasi ($\delta = 1/\alpha$). Secara matematis hubungan atenuasi dan *skin depth* diberikan oleh persamaan :

$$\frac{E_0}{E_x} = \exp(-\alpha x) \quad (7)$$

Kekuatan medan listrik maksimum pada saat transmisi adalah E_0 dan pada jarak x dari titik awal akan berkurang menjadi E_x , persamaan diatas adalah rasio dari kedua amplitudo ini.

$$\delta = 1/\alpha = \frac{c}{\omega \left\{ \frac{\epsilon\mu}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{1}{\alpha}$$

$$\delta = \left(\frac{2}{\sigma} \right) \left(\frac{\epsilon}{\mu} \right)^{1/2}, \text{ pada saat } \tan D \ll 1$$

$$\delta = \frac{(5,31\sqrt{\epsilon_r})}{\sigma}, \text{ dimana } \sigma \text{ dalam mS/m}$$

bentuk lain persamaan *skin depth* adalah :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (9)$$

dimana semakin tinggi ω atau f maka δ kecil.

Kecepatan gelombang radar melalui bahan tergantung kepada jenis bahan dan merupakan fungsi dari permitivitas relatif bahan dengan persamaan:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\left\{ \frac{\epsilon\mu}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

Jika frekuensi yang digunakan besar maka bentuk persamaan di atas akan berubah menjadi lebih sederhana seperti persamaan berikut :

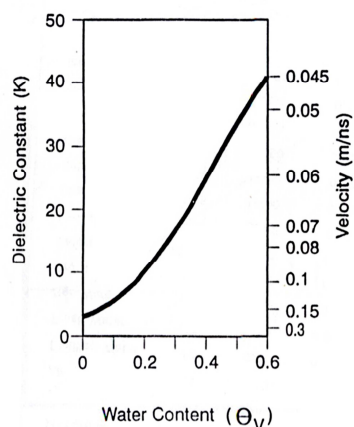
$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

Penjalaran gelombang elektromagnetik yang melalui medium ditentukan oleh tiga sifat material, yaitu konstanta: permitivitas ϵ , permeabilitas μ dan konduktivitas σ . Permitivitas dielektrik berkaitan dengan kemampuan medium untuk mempolarisasikan dan mengontrol kecepatan gelombang elektromagnetik yang berjalan melalui medium tersebut (Syukri, 2000).

Untuk frekuensi radar antara 1 MHz dan 1 GHz, pengaruh yang terbesar adalah adanya kandungan air (fluida), sedangkan pengaruh lain kecil sekali dan dapat diabaikan (Theimer et al., 1994). Jika suatu material atau batuan yang tersaturasi air maka harga permitivitas ϵ akan cenderung meningkat sesuai dengan kandungan air dalam batuan, hal inilah yang menyebabkan meningkatnya amplitudo sinyal radar, sementara harga kecepatan akan semakin kecil. Banyak rumusan yang telah diajukan untuk menunjukkan hubungan harga permitivitas dan kandungan fluida, salah satu rumusan dengan pendekatan yang cukup baik diberikan oleh Theimer (1994), dan Reynold (1997) :

$$\epsilon_{R=\epsilon_m(1-\Phi)+\epsilon_p\Phi} \dots\dots\dots (11)$$

Kemampuan penetrasi GPR bergantung pada frekuensi sinyal sumber, efisiensi radiasi antena dan sifat dielektrik material. Sinyal radar dengan frekuensi yang tinggi akan menghasilkan resolusi yang tinggi, tetapi kedalaman penetrasinya terbatas, dimana besaran frekuensi dengan dimensi dan kedalaman target di tunjukkan oleh tabel 1. Konstanta dielektrik relatif dan cepat rambat gelombang dari beberapa material geologi diberikan dalam Tabel 2, dan variasi konstanta dielektrik pada gambar 1.



Gambar 1. Variasi Konstanta Dielektrik dan Kecepatan Terhadap Kandungan air (Annan,1992)

Umumnya material kering mempunyai atenuasi sinyal yang lebih kecil daripada material basah. Material dengan konduktivitas listrik yang tinggi akan mengurangi

kedalaman penetrasi. Faktor penting lain yang mempengaruhi konduktivitas listrik adalah porositas, mineralisasi, struktur, dispersi dan heterogenitas.

Dikarenakan konduktivitas bawah permukaan lebih sulit untuk diprediksi, karena bergantung pada konduktivitas fluida dan pori tanah serta mekanisme kondisi pada permukaan matrik. Oleh sebab itu untuk melihat fenomena ini dikembangkan sebuah model yang dikenal dengan model Cole-cole (cole dan cole, 1941) yang akan menjelaskan sifat material yang diobservasi secara kualitatif. Model Cole-Cole tersebut terdiri dari konduktivitas kompleks (σ^*) dan permitivitas kompleks (ϵ^*) yaitu :

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_v + \sigma_{q0} [1 + (i\omega\tau)^{1-\zeta}] + i\omega\epsilon_\alpha \dots\dots\dots (12)$$

$$\epsilon^* = \epsilon_\alpha - \frac{\epsilon_\alpha - \epsilon_R}{1 + (i\omega\tau)^{1-\zeta}} + i \frac{\sigma_v}{\epsilon_o\omega} \dots\dots\dots (13)$$

Geologi Regional

Terowongan Sasaksaat dibangun pada tahun 1903 oleh kolonial Belanda. Terletak di sebelah Utara kota Padalarang Jawa Barat, tepatnya berada antara stasiun Maswati dan stasiun Sasaksaat pada lintasan Jakarta–Cikampek–Purwakarta–Bandung (Gambar 2). Terowongan ini memiliki panjang 950 m, tebal 0,75 sampai 1 m dan memiliki ketinggian 541 m dari permukaan air laut. Pada bagian atas dinding terowongan banyak terjadi rembesan air yang diakibatkan oleh banyaknya kandungan air yang berada pada lapisan batuan yang terletak pada bagian atas terowongan, hal ini juga bisa dilihat pada bagian bawah terowongan yang mana terjadinya kristalisasi kalsit-karbonatan. Kristal ini berasal dari rembesan air yang melarutkan karbonat yang terdapat dalam batuan, oleh karena itu jika semakin lama rembesan ini terjadi maka akan semakin memperburuk kondisi terowongan.

Untuk menyelidiki keadaan di sekitar terowongan peneliti menerapkan teknologi ‘GPR’. Dengan teknologi ini dapat diantisipasi runtuhnya bangunan sipil di bawah tanah yang bisa disebabkan oleh melemahnya daya dukung terowongan.

Tabel 1. Besaran Frekuensi dengan Dimensi Kedalaman Target (Sanny et al, 2000)

Frekuensi antena (MHz)	Ukuran Target (m)	Jangkauan Penetrasi (m)	Penetrasi maks. (m)	Jarak antena (m)	Interval trace (m)
25	$\geq 1,0$	5 – 30	35 – 60	4	0,30-0,75
50	$\geq 0,5$	5 – 20	20 – 30	2	0,20-0,50
100	0,1– 0,5	2 – 15	15 – 25	1	0,10-0,30
200	0,05-0,50	1 – 10	5 – 15	0,6	0,03-0,10
400	$\approx 0,05$	1 - 5	3 – 10	0,6	0,02-0,10
1000	cm	0,05 -2	0,5 – 4	0	0,01-0,05

Tabel 2. Konstanta dielektrik relatif dan cepat rambat gelombang elektromagnetik untuk material geologi (Rusyanti. I, 2004)

Material	ϵ_r	V (m/ μ s)
Air	1	300
Water (fresh)	81	33
Polar Snow	1,4 -3	195 - 252
Polar ice	3 -3,15	168
Temperate ice	3,2	167
Pure ice	3,2	167
Freshwater lake ice	4	150
Sea ice	2,5 – 8	78 - 157
Permafrost	1 8	106 - 300
Coastal sand (dry)	10	95
Sand (dry)	3 – 6	120 -170
Sand (wet)	25 – 30	55 - 60
Silt (wet)	10	95
Clay (wet)	8 – 15	86 - 110
Clay soil (dry)	3	173
Marsh	12	86
Agriculture land	15	77
Postoral land	13	83
Avarage 'soil'	16	75
Granite	5 – 8	106 - 120
Limstone	7 – 8	100 - 113
Dolomite	6,8 – 8	106 - 115
Basalt (wet)	8	106
Shale (wet)	7	113
Sandstone (wet)	6	112
Coal	4 – 5	134 - 150
Quartz	4,3	145
Concrete	6 – 30	55 - 112
Asphalt	3 – 5	134 - 173
PVC, Expoxy, Polyster	3	173

Berdasarkan peta geologi pada daerah penelitian gambar 3, litologi daerah ini dibagi dalam beberapa satuan batuan seperti :

- Satuan batupasir serpih lempung
- Satuan batulempung
- Satuan napal
- Satuan endapan vulkanik

Morfologi

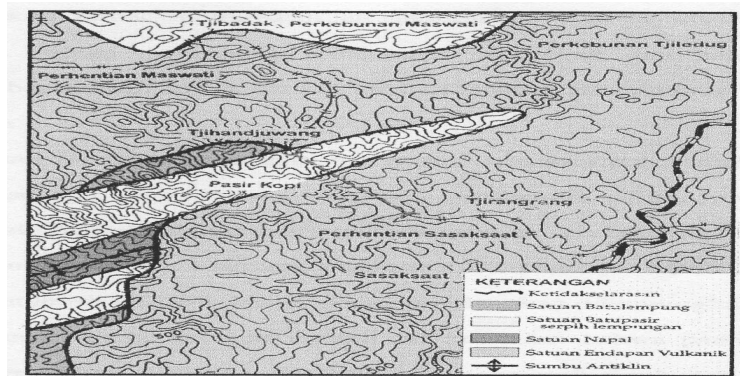
Daerah penelitian berada pada daerah perbukitan yang di tandai oleh adanya sumbu antiklin pada penampang geologi, bukit ini memiliki bentuk memanjang dengan arah Timur laut - Barat daya – Tenggara yang terdiri dari beberapa puncak seperti Pasir Gadung, Pasir kopi, Pasir Gombang, dan Pasir Lembang, dimana terowongan ini menembus hampir tegak lurus perbukitan yang ada pada daerah antiklin. Ketinggian terowongan adalah 541m dari permukaan laut, sudut lereng bisa mencapai 450 yang bisa ditemukan di berbagai tempat. Kebanyakan sudut lereng mencapai $50^0 - 200^0$. Pada bagian atas permukaan terdapat pohon jati, karet dan teh yang merupakan daerah vegetasi, erosi yang terjadi pada daerah ini kebanyakan terjadi pada daerah yang memiliki vegetasi sedikit.

Struktur

Pada daerah ini terdapat tiga struktur yaitu antiklin, kekar (joint) dan perlapisan. Kekar (joint) dapat dikenali dengan mudah pada batuan yang relatif kompak serta kasar, joint ini dapat ditemukan pada lapisan batupasir, sedangkan pada lapisan napal, serpih ataupun lempung struktur kekar ini memperlihatkan bidang belah (fisility) yang tidak beraturan. Pada saat proses deformasi berlangsung yaitu pada saat pembentukan antiklin terjadi maka joint dapat terjadi atau dapat juga terjadi setelah proses deformasi tersebut berhenti dimana gaya-gaya penyebab deformasi sudah berhenti maka pada batuan dapat terjadi kekar (joint).



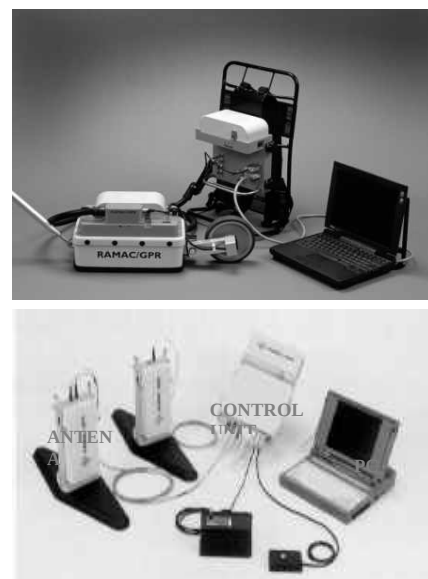
Gambar 2. Lokasi Daerah Penelitian (Sanny, 2000)



Gambar 3. Peta Geologi Daerah Penelitian (Budiyo, 2001)

Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan seperangkat alat ukur GPR (Gambar 4), pengambilan data dalam penelitian ini menggunakan *Radar Reflection Profiling*, dimana antena radar bergerak sepanjang permukaan, lalu travel time yang terukur diprofilkan pada koordinat vertikal sedangkan jarak yang telah ditempuh antena diprofilkan pada koordinat horizontal. *Radar Reflection Profiling* yang disebut juga *Common Offset Survey (COS)* memiliki jarak offset yang sama pada setiap pengukuran. Jarak antena antara *transmitter* dan *receiver* tergantung dari frekuensi yang digunakan. Konfigurasi antena dalam metode ini ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 4 Alat Ukur GPR, yang Terdiri dari Antena, Control Unit dan PC (Sanny et al, 2000)

Hasil dan Pembahasan

Dilihat dari hasil penampang radar (radargram) menunjukkan adanya zona – zona lemah di setiap titik terowongan dimana zona lemah ini ditandai dengan daerah rembesan yang terjadi pada bagian dinding terowongan, hal ini juga bisa kita lihat pada bagian dalam terowongan dimana banyak sekali rembesan air yang menembus dinding terowongan (tetesan air).

Dikarenakan terowongan ini menembus sumbu antiklin dimana pada daerah antiklin ini banyak sekali terjadi *keretakan* yang mengakibatkan terjadinya rembesan air dari permukaan. Hal ini juga bisa kita lihat dari kontak antara satuan vulkanik (lapisan tanah yang hampir menutupi seluruh daerah penelitian) dan satuan batupasir serpih lempungan yang merupakan daerah yang paling banyak mengandung air karena kemampuan dari batuan tersebut untuk menyerap air sehingga daerah ini merupakan daerah peresapan paling tinggi (infiltrasi). Sanny (2000), menjelaskan dari hasil survey yang pernah dilakukan, diketahui ternyata terdapat beberapa patahan minor yang menjadi tempat terjadinya rembesan air.

Selain terowongan ini berada pada jalur patahan yang mengakibatkan

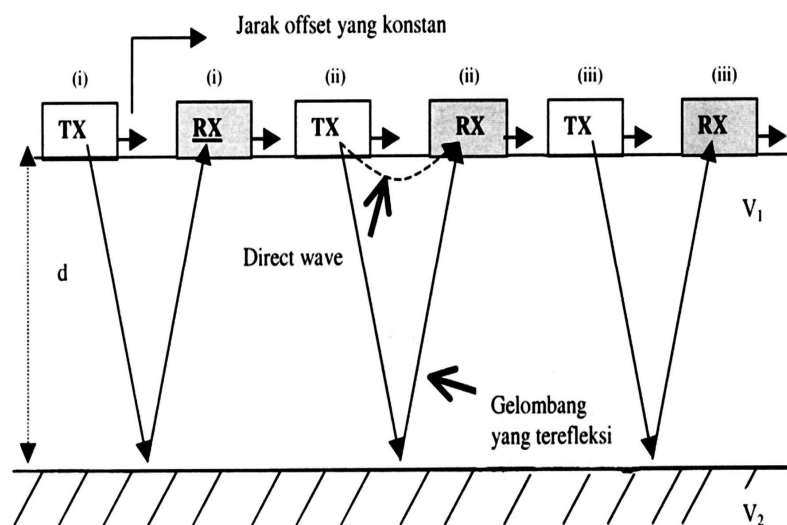
melemahnya daya dukung terowongan, pada bagian permukaan banyak terjadi pelapukan yang disertai dengan erosi akibat berkurangnya vegetasi.

Interpretasi Penampang

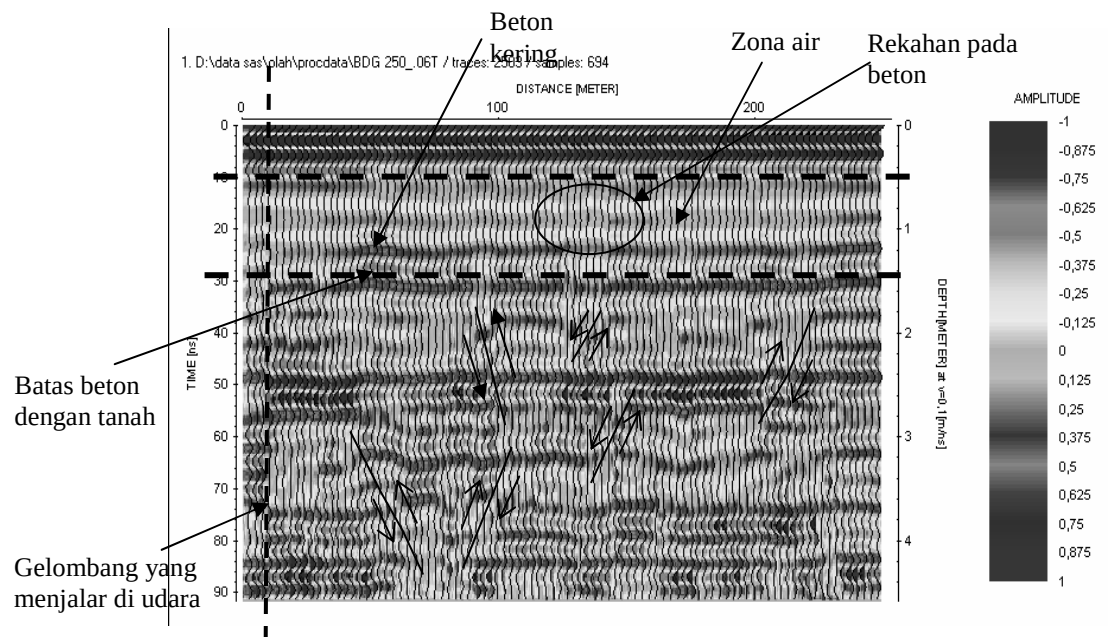
Tahap awal dari pekerjaan interpretasi data *radar* yang harus dilakukan adalah mengidentifikasi zona-zona lemah berdasarkan pengambilan data di lapangan yang terekam pada alat *Radargram Ramac* atau dengan kata lain menentukan daerah *interes* yang diinginkan. Langkah ini penting agar dalam melakukan pemerosesan bisa lebih cepat. Penampang radar yang diukur (Raw data) terdiri dari 4 lintasan.

Lintasan 1

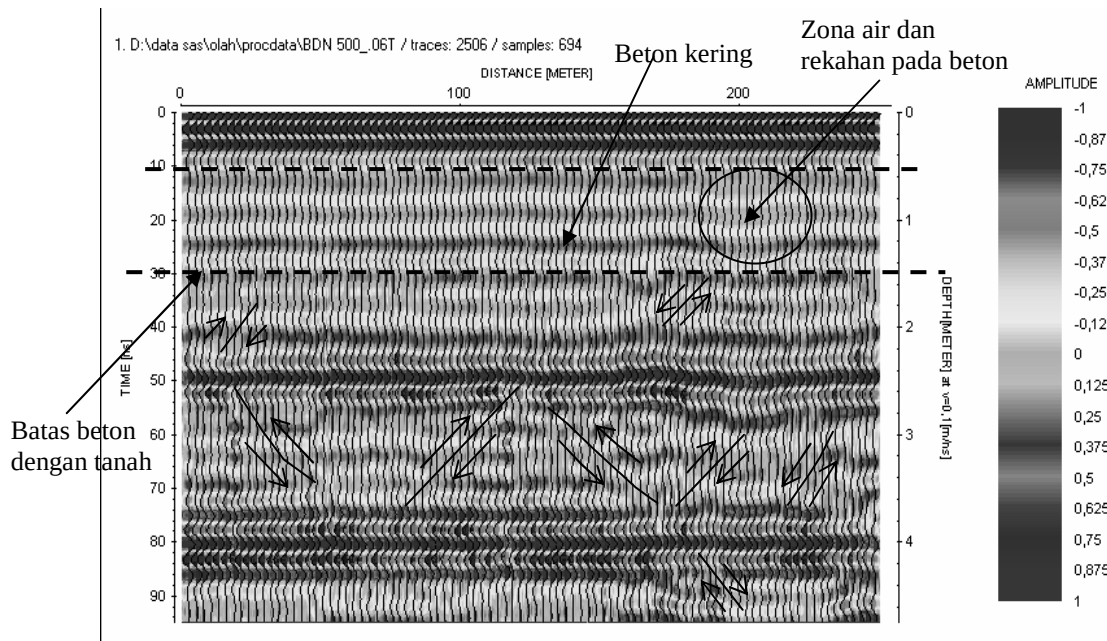
Lintasan ini memperlihatkan adanya kekar, berdasarkan data geologi kekar ini terjadi hampir diseluruh daerah penelitian dimana kekar ini bisa terjadi pada saat proses deformasi berlangsung atau pada saat pembentukan antiklin. Adanya kekar atau rekahan ini memungkinkan tempat terjadinya rembesan air sehingga rembesan tersebut bisa sampai ke terowongan bahkan menembus dinding terowongan yang ditandai dengan tetesan air pada bagian dalam terowongan.



Gambar 5. Metode Pengukuran Reflection Profiling (Sanny et al, 2000)



Gambar 6. Hasil Prosesing Lintasan 1



Gambar 7. Hasil Prosesing Lintasan 2

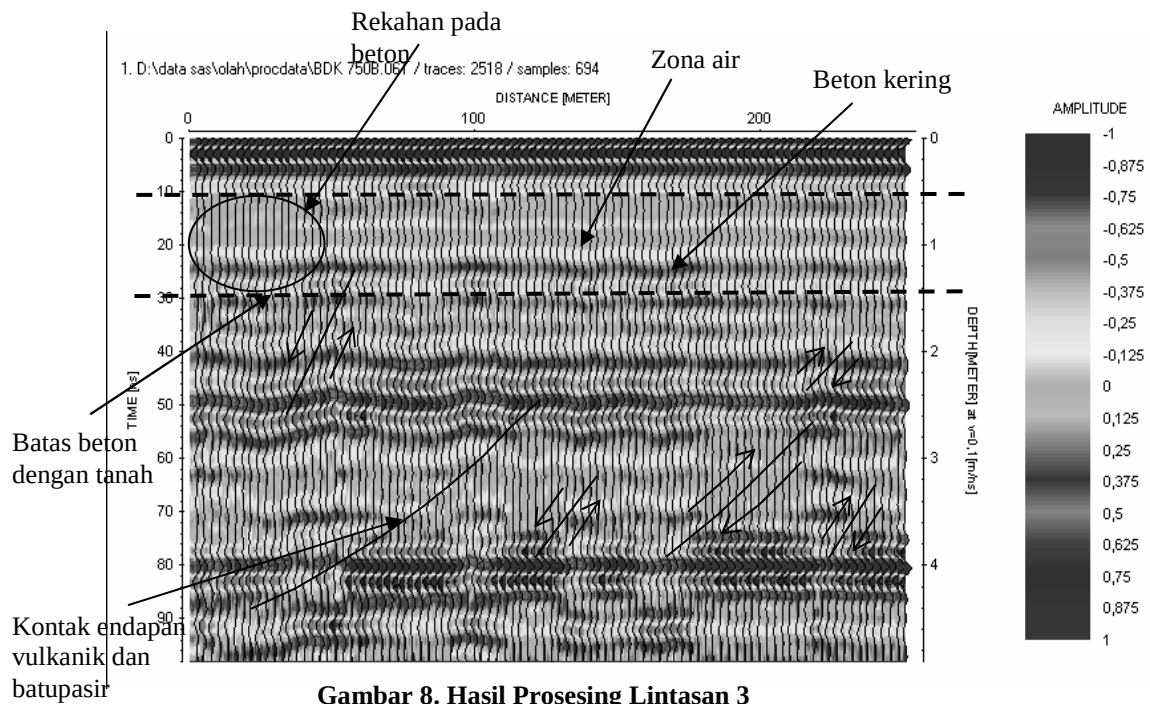
Retakan yang terjadi pada lintasan ini berada pada kedalaman 2 – 4 m, pada beton juga memperlihatkan adanya retakan namun kecil sekali yang ditandai dengan amplitudo sinyal yang rendah yang merupakan daerah air sehingga gelombang radar yang melewati zona tersebut akan mengalami atenuasi.

Lintasan 2

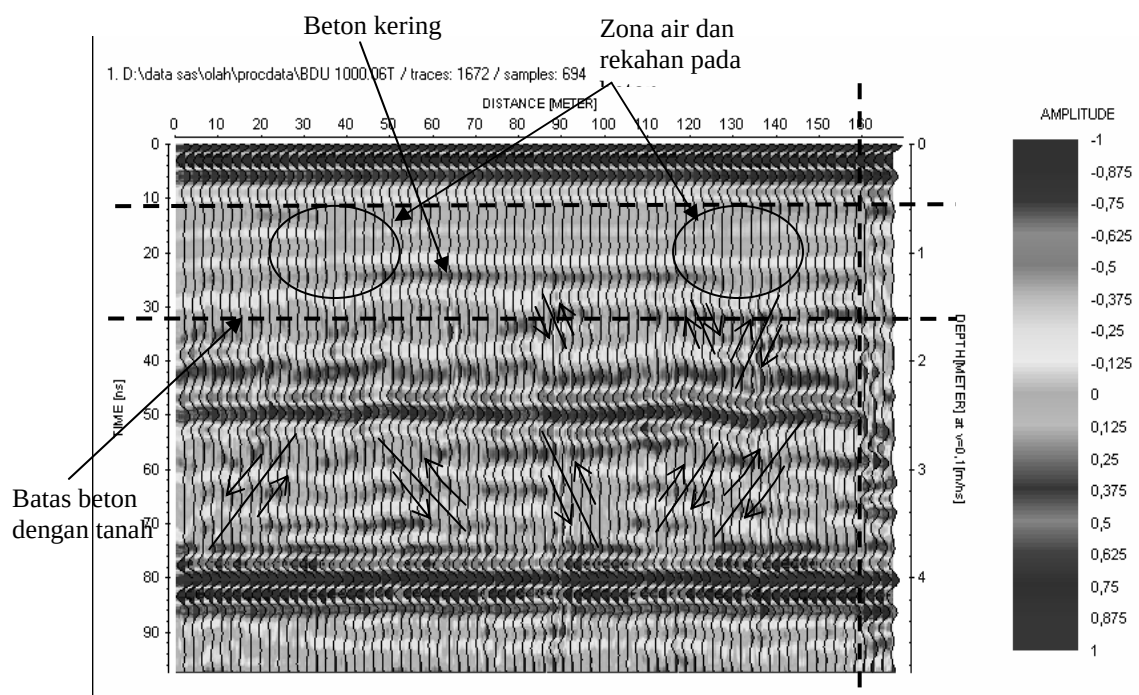
Retakan yang terjadi pada lintasan ini cukup banyak, lintasan ini masih berada pada satuan endapan vulkanik dan banyak sekali memperlihatkan adanya batuan yang kompak yang ditunjukkan dengan amplitudo yang kuat, namun diantara batuan yang kompak ini yaitu

pada kedalaman 3 m memperlihatkan adanya rekahan yang sangat jelas. Rekahan ini juga merupakan salah satu media yang sangat mudah untuk meloloskan air sehingga pada

lintasan ini tepatnya pada zona beton akan terdapat zona air namun pada beton tidak semuanya tersaturasi air.



Gambar 8. Hasil Prosesing Lintasan 3



Gambar 9. Hasil Prosesing Lintasan 4

Lintasan 3

Dibandingkan dengan lintasan lain, pada lintasan ini saturasi air pada beton lebih banyak dikarenakan pada lintasan ini sudah berada pada satuan batupasir (data geologi) yang mempunyai resapan yang cukup baik.

Lintasan 4

Sama halnya dengan lintasan 3, lintasan ini juga berada pada satuan batupasir. Dikarenakan pada lintasan ini merupakan daerah yang memiliki vegetasi yang kecil serta berada pada sumbu antiklin dan kontak antara endapan vulkanik dan batupasir sisipan lempungan, maka daerah ini merupakan daerah resapan air yang tinggi. Hampir disepanjang lintasan tersebut memperlihatkan adanya zona air yang ditandai dengan melemahnya amplitudo gelombang akibat terjadinya atenuasi dan absorpsi gelombang terutama pada beton yang memiliki daerah resapan yang cukup baik. Radargram pada lintasan ini memperlihatkan selain rekahan yang terjadi pada lapisan batuan, dimana pada bagian dalam beton terdapat dua daerah yang memperlihatkan adanya rekahan yang sangat jelas. Ini mengidentifikasi bahwa pada lintasan ini kerusakan yang terjadi pada beton cukup mengkhawatirkan. Pada lintasan 1 dan lintasan 4 memperlihatkan adanya gelombang udara hal ini dikarenakan sewaktu melakukan pengukuran dimulai dari bagian luar terowongan kira-kira 50 cm sehingga efek udara ini terekam pada setiap lintasan.

Kesimpulan dan Saran

Observasi langsung di lapangan menunjukkan, disekitar dinding terowongan memperlihatkan adanya tetesan air yang diakibatkan oleh rekahan pada dinding terowongan yang ditandai adanya kristalisasi *kalsit-karbonatan*, dimana permukaan daerah penelitian banyak terjadi pelapukan dan erosi yang juga merupakan penyebab melemahnya daya dukung terowongan sehingga

memungkinkan terjadinya rembesan air akibat hujan. Selain zona lemah yang terdapat pada dinding terowongan untuk semua lintasan, dimana daerah tempat dibangunnya terowongan memang sudah berada pada zona lemah (berdasarkan data geologi) terutama daerah yang melewati sumbu antiklin (lintasan 3). Rekahan yang terjadi tidak hanya pada struktur lapisan batuan, tetapi rekahan ini terjadi juga pada bagian dalam beton.

Daftar Pustaka

- Annan A.P., 1992. *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Canada.
- Budiyono A., 2001. *Aplikasi Ground Penetrating Radar untuk Penyelidikan Terowongan, Pemodelan dan Studi Kasus Pada Terowongan Sasaksaat*. Padalarang, Jawa Barat.
- Cole K.S., Cole R.H., 1941. Dispersion and Absorption in Dielectric. *J. Chem. Phys.*, 9, 341-351.
- Reynolds, J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley dan sons, New York.
- Rusyanti I., 2004. *Penentuan Kecepatan Gelombang Elektromagnetik pada Pasir Besi*. Tesis Magister Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Sanny, T.A., 2000. *Penyelidikan Geotomografi Sebagai Alternatif Baru Dalam Perencanaan Terowongan untuk Transportasi Bawah Permukaan (Underground Transportation)*. Laporan Riset Unggulan Terpadu V Bidang Rancang Bangun (1997-2000) Dewan Riset Nasional, Bandung.
- Sanny, T.A., Gunawan. H, Sitorus. J. E.B. H., 2000. *Aplikasi Ground Penetrating Radar (GPR) dan Pemodelan Kedepan Untuk Eksplorasi Emas*. Bandung.
- Syukri M., Satria.B., 2000, *Pendeteksian Kontaminasi di Bawah Permukaan Dengan Metode GPR*, Bandung.
- Theimer, B. D., David, C.N. dan Barry, G.W., 1994. A Study of Geoelectrical Properties of Peatlands and Their Influence on Ground Penetrating Radar Surveying. *Geoph. Prospecting*, 42, 179-209.