

JURNAL LINGKUNGAN DAN BENCANA GEOLOGI

Journal of Environment and Geological Hazards

ISSN: 2086-7794, e-ISSN: 2502-8804 Akreditasi KEMENRISTEKDIKTI: 21/E/KPT/2018 Tanggal 9 Juli 2018 e-mail: perpustakaan.pag@esdm.go.id - http://jlbg.geologi.esdm.go.id/index.php/jlbg

Pemodelan *Ground Penetrating Radar* menggunakan *Split Step* dan *Finite Difference Time Domain (FDTD) Modelling* pada Saluran Air Sungai Cikapayang

Ground Penetrating Radar Modelling Using Split Step and Finite Difference Time Domain (FDTD) on Water Channel of Cikapayang River

Willy Hermawan¹ dan Acep Ruchimat²

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung, Jawa Barat - Indonesia

²Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan
Jalan Diponegoro No 57 Bandung, Jawa Barat - Indonesia

Naskah diterima 14 Agustus 2018, selesai direvisi 16 April 2019, dan disetujui 29 April 2019 *e-mail*: terrawilly@gmail.com; acep_tg@yahoo.co.id

ABSTRAK

Pemodelan *Ground Penetrating Radar* (GPR) diperlukan untuk membantu saat interpretasi data dari profil GPR. Pemodelan ini bertujuan untuk melihat respon GPR dan penjalaran gelombang medan listrik ketika menjalar pada saluran air dan melihat pengaruh ada tidaknya air dari saluran air. Pemodelan ini menggunakan software MATGPR buatan Tzanis dengan berbasis matlab. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan berdasarkan algoritma metode *split step modelling* (Bitri dan Grandjean, 1998) dan *Finite Difference Time Domain (FDTD) modelling* (Irving dan knight, 2006). Pemodelan ke depan menggunakan 2 model kasus yaitu saluran air berisi air dan saluran air tidak berisi air. Pengukuran data dilaksanakan pada tanggal 16 Februari 2014. Lokasi pengukuran dilakukan di bagian barat kompleks gedung perkantoran Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan (PATGTL) - Badan Geologi, Bandung Jawa Barat. Pada lokasi tersebut tersingkap saluran air Sungai Cikapayang yang tersingkap akibat amblesan tanah. Dari hasil pemodelan dengan menggunakan algoritma *split step modelling* dapat memperlihatkan pola refleksi hiperbola dari batas atas dan batas bawah saluran air masing – masing pada waktu *t* = 20 ns dan *t* = 50 ns, keberadaan air ditunjukan dengan perlambatan waktu sebesar 5 ns sedangkan pada pemodelan algoritma FDTD dari Irving dan Knight dapat memperlihatkan batas-batas saluran air dari medan listrik *E_y* yang menjalar di dalam saluran air. Selain itu, keberadaan air dapat dibedakan dengan melihat penurunan amplitudo medan listrik.

Kata-kata kunci: FDTD modelling, GPR, Pemodelan ke depan, Split – step modelling

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar (GPR) forward modelling is required to help interpretation of the GPR data profiles. The aim of this research is to determine GPR response due to water channel and influence of presence of water filled and not filled in the water channel. This modeling using MATGPR software's by Tzanis, which based on matlab code. In this research, the modelling method based on the split-step modeling algorithms (Bitri and Grandjean, 1998) and Finite Difference Time Domain (FDTD) modeling (Irving and Knight, 2006). Forward modeling uses the two case

models. The first case of water channel filled with water and the second case is not filled water. Data acquisition is held on February 16, 2014. Location measurements conducted in the western part of the office building Center of Groundwater and Environmental Geology (PATGTL) - Geological Agency, Bandung, West Java. At those locations there is Cikapayang water channel expose due to ground subsidence. The results of split-step algorithm show the hyperbole reflection pattern on top and bottom of water channel at t=20 ns and t=50 ns respectively. In addition, the presence of water filled in the water channel is determined by delay time 5 ns. From the results of the FDTD algorithm can determine boundaries of water channel from propagating the electric field E_y in the water channel. In addition, the presence of water can be distinguished by the reduction in electric wavefield amplitude.

Keywords: FDTD modelling, GPR, Forward modelling, split – step modelling

PENDAHULUAN

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan salah satu metode geofisika yang menggunakan penjalaran gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tinggi (10 MHz–1 GHz). Resolusi metode GPR sangat tinggi tetapi penetrasi kedalamannya relatif dangkal. Metode ini banyak sekali digunakan dalam bidang geologi, geologi lingkungan, geologi teknik dan geoteknik (Reynolds, 1997). Karena kompleksitas dari sifat penjalaran gelombang GPR pada medium bawah permukaan maka untuk melakukan interpretasi data yang tepat dan akurat diperlukan mekanisme pengolahan data yang tepat yaitu dengan pemodelan ke depan.

Pemodelan GPR terus berkembang mengikuti perkembangan kemampuan komputasi, jenis pemodelan yang sering digunakan antara lain *Ray Tracing*: pendekatan dari variasi kecepatan gelombang (Goodman, 1994; Cai dan McMechan, 1995), *pseudospectral*: pendekatan dari variasi lateral pada suatu medium (Carcione, 1996; Casper dan Kung 1996; Bitri dan Grandjean, 1998), *Finite Difference Time Domain (FDTD)*: pendekatan komponen *spatial* dan *temporal* dari diskritisasi domain frekuensi dan waktu (Irving dan Knight, 2006).

Amblesan tanah yang terjadi di atas saluran air kantor Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan (PATGTL) menjadi salah satu hal yang melatarbelakangi kegiatan penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk melihat respon GPR dan penjalaran gelombang medan listrik ketika menjalar pada saluran air dan melihat pengaruh ada tidaknya air dari saluran air. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan rujukan apabila kejadian yang sama terjadi baik pada area kantor lainnya maupun area lain yang lebih luas.

METODE PENELITIAN

Pemodelan ke depan adalah proses pemodelan untuk melihat respon kondisi bawah permukaan yang dibuat dengan memasukkan parameter model ke dalam sebuah program algoritma. Pada penelitian ini pemodelan ke depan dibuat pada data GPR sintetik untuk membantu interpretasi dalam memperlihatkan pola refleksi yang timbul akibat adanya saluran air dangkal di bawah permukaan. Pemodelan dibuat menggunakan software MATGPR (Tzanis, 2010) yang berbasis matlab. Dalam pemodelan pemrograman diharapkan dapat memperlihatkan respon saluran air dan pengaruh ada tidaknya air dalam saluran pada penampang GPR sintetik menggunakan metode *split step modeling*. Untuk mengambarkan penjalaran kuat medan listrik $E_{_{\scriptscriptstyle V}}$ sejalan dengan waktu dan pengaruh keberadaan air dalam saluran digunakan FDTD modelling. Beberapa nilai parameter material geologi yang dijadikan acuan diperlihatkan pada Tabel 1.

Konsep *Split – step Modelling* pada prinsipnya adalah mengekstrapolasi medan gelombang dalam domain frekuensi – bilangan gelombang (*f* - *k*) dari solusi persamaan Maxwell, di mana fenomena ini terjadi karena proses relaksasi yang dijelaskan oleh mekanisme Debye (Bitri dan Grandjean, 1998).

Faktor kualitas Q, didefinisikan sebagai inversi dari *loss tangent*, jika ditinjau permitivitas dalam bentuk kompleks , persamaan adalah:

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\epsilon'}{\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}}$$

pada permitivitas dielektrik maka menghasilkan atenuasi dan dispersi gelombang sejalan dengan

Tabel 1. Nilai permitivitas relatif, konduktivitas, dan sifat penjalaran gelombang elektromagnet beberapa material geologi pada frekuensi 100 MHz (Reynolds, 1997)

Material	Permitivitas relatif	Konduktivitas (mS/m)	Kecepatan ∨ (m/ns)	Koefisien atenuasi α (dB/m)
Udara	1	0	0,3	0
Air terdistilasi	80	0,01	0,033	$2x10^{-3}$
Air segar	80	0,5	0,033	0,1
Air laut	80	$3x10^{3}$	0,01	10^{3}
Pasir kering	3 - 5	0.01	0,15	0,01
Pasir jenuh	20 - 30	0,1 - 1	0,08	0.03 - 0.3
Batugamping	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Serpih	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Lanau	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Lempung	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granit	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Garam kering	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Es	3 - 4	0,01	0,16	0,01

waktu. Pada frekuensi tinggi, proses ini dijelaskan oleh penjalaran dari model faktor kualitas Q yang

konstan di mana pada tahap ini frekuensi tergantung pada atenuasi secara linier dan dapat didekati pada *bandwidth* yang sempit (Turner dan Siggins, 1994). Pada GPR *bandwidth* Δf memiliki frekuensi sekitar frekuensi tengah antena fc, di mana $\Delta f = fc$ (Davis dan Annan, 2001) Akibatnya konstanta Q akan tetap *valid*. Bano (1996) menunujukkan bahwa kecepatan fasa $V(\omega)$ dan koefisien atenuasi $\alpha(\omega)$ berhubungan dengan kecepatan nondispersi dan eksponen n, di mana:

$$V_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu K \epsilon_0 cos \left[\frac{\pi}{4}(1-n)\right]}} \qquad (2)$$

Dengan

$$n = \frac{2}{\pi} tan^{-1}(Q)$$
(3)

Sehingga kecepatan fasa dan koefisien atenuasinya menjadi:

$$V(\omega) = V_0 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{\frac{1-\pi}{2}} \qquad (4)$$

dan

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{V(\omega)} \tan \left[\frac{\pi}{4} (1 - n) \right] \dots (5)$$

Akurasi perlu ditingkatkan dengan cara membuat ekstrapolasi *grid* dari konstanta permitivitas relatif *K* dan faktor kualitas *Q*. Pada medium lateral heterogen, ekstrapolasi menggunakan algoritma *split- step* metode Fourier dari Stoffa, dkk (1990) di mana prosedur ekstrapolasi terdiri dari 2 tahap yaitu tahap pertama adalah medan gelombang diekstrapolasi oleh pergeseran fasa yang merupakan algoritma dari frekuensi – bilangan gelombang untuk migrasi dari komponen medan listrik, analog dengan teknik dari migrasi pergeseran fasa (Gazdag, 1978) sehingga untuk ekstrapolasi maka dilakukan diskritisasi vertikal dengan persamaan:

$$E(k_x, z, \omega) = E(k_x, z = z - \Delta z, \omega)e^{-k_z^2}z^{ik_z^2}z^{ik_z^2}$$
.... (6)

Tahap kedua koreksi dari pergeseran fasa digunakan untuk mengoreksi ekstrapolasi dari medan gelombang pada tiap poin (x,z) menggunakan nilai rata-rata pada K_m dan Q_m dengan interval Δz . Koreksi tersebut dirumuskan oleh:

$$exp\left[i\left(\sqrt{k_m^2-k_x^2}-\sqrt{k_{xz}^2-k_x^2}\right)\Delta z\right].....\ (7)$$

dengan

$$k_m = \frac{\omega}{V_m(\omega)} + i \propto_m (\omega) \quad(8)$$

dan

$$k_{xz} = \frac{\omega}{v_{xz}(\omega)} + i \propto_{xz} (\omega) \dots (9)$$

 $V_m(\omega)$ dan $\propto_m(\omega)$ adalah paramater kecepatan rata-rata dan atenuasi, sehingga dan adalah parameter kecepatan medium dan atenuasi pada posisi (x,z).

Pemodelan FDTD yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan konsep dari Irving dan Knight (2006). Model ini menerapkan refleksi profiling GPR untuk antena tegak lurus bidang x - z (Mode *Tranverse magnetic* (TM)) yang menerapkan batas penyerapan *Perfectly Matched Layer* untuk mencegah refleksi dari tepi model pada screcth koordinat.

Pada kasus mode TM maka gelombang medan yang bekerja adalah medan magnet arah - x (H_x) , medan magnet arah - z (H_y) dan medan listrik arah -y (Ey) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa_z} \frac{\partial E_y}{\partial z} - \zeta_z(t) * \frac{\partial E_y}{\partial z} \qquad (10)$$

$$\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{1}{\kappa_x} \frac{\partial E_y}{\partial x} - \zeta_x(t) * \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad(11)$$

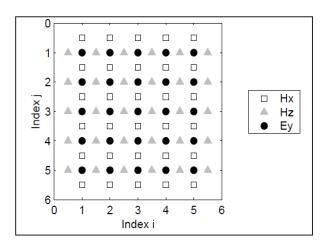
$$\sigma E_y + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\kappa_x} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{\kappa_z} \frac{\partial H_x}{\partial z} +$$

$$\zeta_x(t) * \frac{\partial H_z}{\partial x} - \zeta_z(t) * \frac{\partial H_x}{\partial z}$$
(12)

 ε , μ , σ , adalah masing – masing parameter permitivitas atau konstanta dielektrik (K), permeabilitas magnetik dan konduktivitas listrik, dan κ (x,y,z) adalah arah pada *scretching* koordinat.

Persaman di atas dimodelkan dengan menggunakan *finite difference* menggunakan *leap – frog*, pendekatan grid *staggered* (Gambar 1). Dengan pendekatan tersebut, medan listrik dan medan magnet menjadi berimbang seperti pendekatan turunan pasial pada *grid* yang sama. Penerapannya

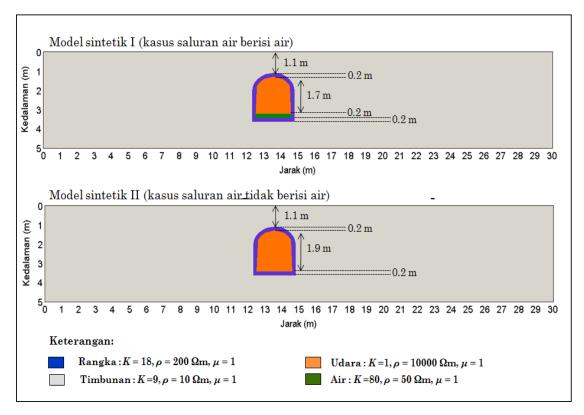
menggunakan *finite difference* orde keempat pada ruang dan orde dua pada waktu.



Gambar 1. Pengaturan ruang untuk komponen H_x , H_y dan E_y dengan $\Delta t/2$ pada pemodelan GPR mode TM (Irving dan Knight, 2006)

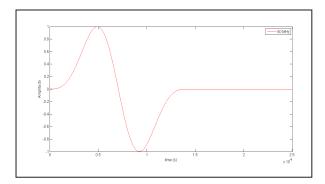
Pemodelan ke depan GPR pada penelitian kali ini dibuat dengan 2 model sintetis dari 2 buah kasus. Model sintetis I dengan kasus berupa model saluran berisi air dan Model sintetis II dengan kasus berupa model saluran tidak berisi air. Model dibuat mendekati kondisi saluran air yang tesingkap di bagian barat kompleks perkantoran PATGTL.

Pembuatan parameter sintetik dibuat dengan memperhitungkan geometri saluran air yang mendekati setengah lingkaran. Saluran air tersebut memiliki tinggi 2.3 meter, lebar 2.5 meter dan tebal rangka 0.2 meter (Gambar 2). Paramater fisis untuk pembuatan model sintetik GPR adalah konstanta dielektrik K, permeabilitas magnetik μ. Nilai konstanta dielektrik dan permeabilitas magnetik batuan diambil dari Reynolds, 1997, serta perkiraan berdasarkan pengalaman penulis. Rangka saluran air terbuat dari bata merah yang telah disemen dengan nilai tahanan jenis ρ_{rangka} = 200 Ω m; K_{rangka} =18, dan μ_{rangka} = 1 dalam saluran air tersebut berisi udara nilai tahanan jenis ρ_{udara} = 10000 Ω m; $K_{udara} = 18$, dan $\mu_{rangka} = 1$ dan ada juga air yang mengalir dengan ketebalan sekitar 0.2 meter dan nilai tahanan jenis jenis $\rho_{air} = 50 \Omega m$; K_{air} = 80, dan μ_{air} = 1. Kemudian timbunan yang berada pada saluran air, dimana lapisan yang dominan berupa lapisan lempung, lempung pasiran serta sedikit mengandung kerikil dan kerakal dengan nilai tahanan jenis $\rho_{timbunan} = 10 \Omega m; K_{timbunan} = 9$ dan $\mu_{timbunan} = 1$.



Gambar 2. Model sintetik untuk kasus saluran air berisi air (atas) dan tidak berisi air (bawah).

Proses input parameter dari *split step modelling* penulis memasukkan nilai parameter yang diekstrak dari parameter saat akusisi data yakni dengan nilai *velocity gridnya* 38 x 149 dan ukuran radargram 160 x 149. Program ini mengimpor struktur model sintetik yang disiapkan oleh *build2dmodel.m* kemudian menghasilkan matriks konstanta dielektrik, permeabilitas magnet dan faktor kualitas. Kemudian dilakukan perhitungan matrik



Gambar 3. Wavelet Blackman - Harris yang diinputkan sebagai *wavelet source* pada pemodelan FDTD

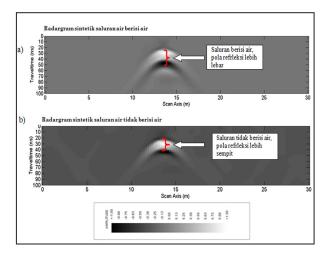
berdasarkan velocity grid.

Proses pemodelan *FDTD* menggunakan jarak spasi trace = 0.029 meter, jarak spasi kedalaman 0.014 meter, sampling interval dt = 0.036 ns dan jendela waktu 126 ns. Wavelet yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan wavelet Blackman-Haris dengan frekuensi dominan 80 Hz (Gambar 3).

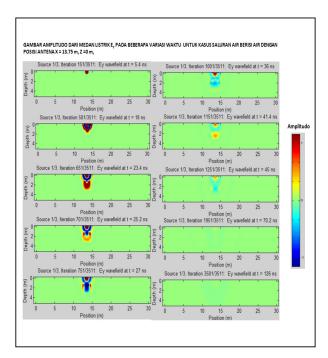
Model sintetik ini dilakukan untuk melihat respon GPR dan penjalaran gelombang medan listrik ketika menjalar pada saluran air dan melihat pengaruh ada tidaknya air dari saluran air. Respon yang diperoleh dari hasil pemodelan sintetik digunakan sebagai acuan dalam pengambilan data di lapangan. Respon yang dihasilkan pada akuisisi data seharusnya dapat menggambarkan pola yang tidak jauh dengan hasil pemodelan sintetik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Batas bawah model saluran yang berisi air dan tidak berisi air memiliki waktu tempuh yang berbeda sebesar 5 ns. Hal ini dikarenakan gelombang elektromagnetik merambat lebih lambat ketika melewati air pada saluran yang berisi air. Batas bawah saluran berisi air ditunjukkan pada t = 55 ns sedangkan pada kasus saluran tidak berisi air, batas bawah saluran air ditunjukkan pada t = 50 ns. Batas bawah saluran air memiliki nilai amplitudo negatif (warna hitam). Hal ini dikarenakan gelombang menjalar dari rangka yang memiliki nilai konstanta dielektrik yang lebih besar ke timbunan yang



Gambar 4. Hasil pemodelan kedepan GPR menggunakan *split step modelling*. a) Radargram sintetik saluran berisi air b) Radargram sintetik saluran tidak berisi air. Saluran air ditunjukan oleh pola refleksi hiperbola, keberadaan air pada saluran air ditunjukan dengan adanya perlambatan dari batas bawah pola refleksi hiperbola sebesar 5 ns.



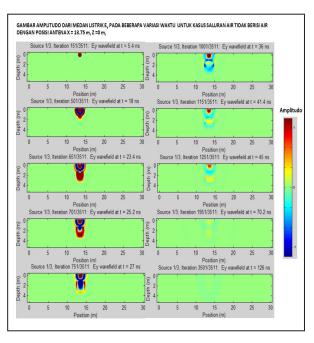
Gambar 5. Gambar amplitudo dari medan listrik Ey pada beberapa variasi waktu pada model saluran air berisi air. Pada posisi antena di x = 13.75 meter dan z = 0 meter.

memiliki nilai konstanta dielektrik yang lebih kecil sehingga memiliki nilai koefisien refleksi negatif.

Pemodelan menggunakan simulasi FDTD, mode TM bertujuan untuk melihat penjalaran gelombang medan listrik E_y yang melewati saluran air baik untuk kasus model saluran berisi air (Gambar. 5) maupun model saluran tidak berisi air (Gambar 6). Posisi antena diletakkan di atas saluran air x = 13.75 dan z = 0. Pada waktu t = 5.4 ns untuk kedua kasus model, medan gelombang menjalar menyebar, nilai amplitudo terlihat masih tinggi karena tidak adanya heterogenitas dibawah permukaan. Kemudian pada waktu t = 18 ns terlihat medan gelombang mengalami refleksi diduga pada waktu tersebut medan gelombang melewati batas atas dari saluran.

Pada waktu t = 23.4 ns terlihat medan gelombang menjalar di dalam saluran air, terlihat pada model saluran berisi air, amplitudo gelombang lebih kecil pada batas luar dibandingkan dengan model saluran tidak berisi air. Kemudian pada waktu t = 25.2 ns terlihat medan gelombang pada model saluran berisi air memiliki amplitudo lebih kecil pada batas luar dibandingkan dengan model saluran tidak berisi air.

Medan listrik menjalar di dalam saluran air pada waktu t = 27 ns, terlihat pada model



Gambar 6. Gambar amplitudo dari medan listrik Ey pada beberapa variasi waktu, untuk kasus saluran air tidak berisi air. Pada posisi antena di x = 13.75 meter dan z = 0 meter.

saluran berisi air, amplitudo gelombang lebih kecil pada batas bawah dan mendekati nol dibandingkan dengan model saluran tidak berisi air, diperkirakan energi gelombang terserap oleh keberadaan air. Pada waktu t = 36 ns, model saluran berisi air terlihat seperti refleksi sedangkan model saluran tidak berisi air tidak terlihat.

Pada waktu t = 41.4 ns, model saluran berisi air memperlihatkan amplitudo gelombang makin membesar di kedalaman 2-3 meter sedangkan pada model saluran tidak berisi air hal itu tidak ditemukan, kemungkinan gelombang sedang menjalar di air pada saluran air tersebut. Kemudian, pada waktu t = 45 ns, model saluran berisi air memiliki penampakan hampir sama hanya nilai amplitudo nya bernilai negatif tetapi besarnya hampir sama. Kemudian setelah waktu t = 47 ns, amplitudo medan gelombang hampir tidak terlihat lagi pada kedua kasus model (literatur yang bisa diacu berapa amplitudo jika ada air/tidak).

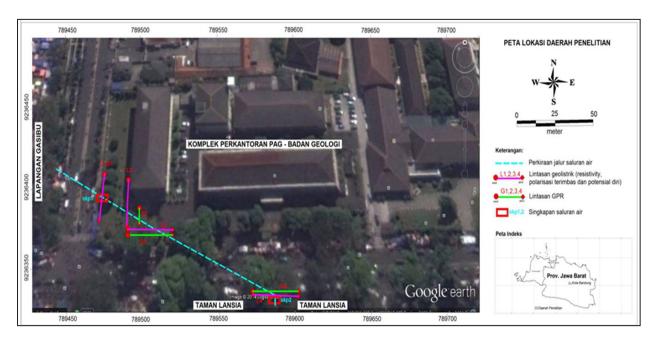
Dari hasil pengukuran lapangan dapat dijelaskan bahwa lokasi singkapan 1 terletak di sebelah barat kompleks perkantoran PATGTL koordinat x = 789473 dan y = 9236396. Dari peta lokasi (Gambar 7) dan pengamatan singkapan 1 (Gambar 8) terlihat bahwa saluran air yang tersingkap akibat amblesan tanah oleh akar pohon yang menembus saluran air

ini memiliki diameter sekitar ± 5 meter.

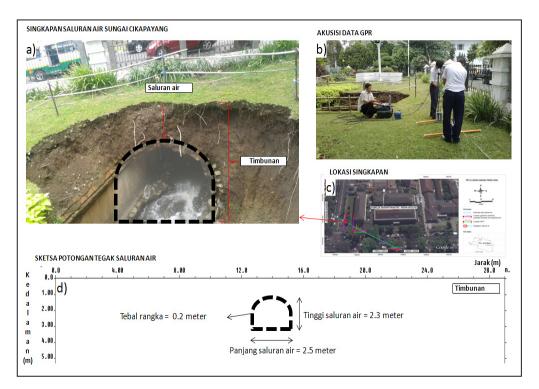
Terlihat bahwa saluran air ini memiliki tinggi 2.3 meter dan lebar 2.5 meter dengan material berupa batu bata merah yang disusun dengan rapi setebal 20 cm menyerupai bentuk setengah lingkaran sedangkan bagian tegaknya disusun oleh pecahan batuan andesit yang sudah disemen rapi dengan tebal 20 cm. Lapisan tanah yang ada di sekitar lokasi berupa timbunan dengan material penyusun berupa lapisan lempung, lempung pasiran, serta sedikit mengandung kerikil dan kerakal. Pada lintasan pengukuran geofisika terpadu lokasi amblesan dicitrakan oleh lintasan 1.

Akusisi data GPR menggunakan instrumen SIR-20 buatan GSSI, antena *unshielded* dengan frekuensi tengah 80 MHz. Software akuisisi data GPR menggunakan software RADAN. Parameter akuisisi data GPR untuk semua lintasan sebagai berikut: frekuensi tengah antena 80 MHz, jarak geser antena 20 cm, jarak antena *transmiter* dan *receiver* 1 meter, jendela waktu 200 ns, jumlah cuplikan 512 dan arah antena PR-BD, dengan panjang bentangan 29 meter.

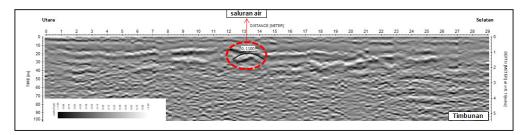
Parameter pengolahan data GPR menggunakan jendela waktu 6 ns, *Gain* yang digunakan adalah *Spherical exponential Compensation*



Gambar 7. Peta lokasi daerah penelitian.



Gambar 8. a). Foto singkapan saluran air terletak pada sebelah barat komplek perkantoran PAG – Badan Geologi (koordinat x = 789473 dan y = 9236396 b). Foto akusisi data GPR c). Lokasi singkapan dan d) Sketsa potongan tegak saluran air.



Gambar 9. Radargram yang memotong saluran air pada bagian barat kompleks perkantoran PATGTL.

(SEC) dengan menggunakan nilai skala=1 dan penggunaan filter *background removal* untuk mempertajam refleksi hiperbola dari saluran air dan menghilangkan refleksi yang sejajar. Filter tersebut menggunakan parameter jarak sepanjang jarak lintasan disesuaikan dengan masing-masing lintasan dan jendela waktu dari 0 - 100 ns.

Hasil radargram pada Gambar 9 terlihat pola refleksi hiperbola akibat saluran berisi air sekitar 20 cm terdapat pada x=13.45 meter, dengan batas atas dan batas bawah masing-masing pada t=19.25 ns dan batas bawah t=23.75 ns. Hasil pemodelan dengan menggunakan algoritma FDTD dari Irving dan Knight memiliki kelebihan dalam membedakan batas-batas saluran air, bisa dilihat

dari medan listrik yang menjalar didalam saluran air. Selain itu, keberadaan air dapat dibedakan dengan melihat penurunan medan listrik Ey. Sedangkan kekurangannya adalah tidak memperlihatkan pola refleksi hiperbola dari saluran air seperti pada radargram umumnya.

Sedangkan hasil pemodelan dengan menggunakan algoritma split step dari Bitri dan Grandjean memiliki kelebihan dalam memperlihatkan penjalaran medan listrik Ex, sehingga hasilnya berupa penampang, di mana keberadaan saluran air ditunjukan oleh pola refleksi hiperbola seperti pada radargram umumnya. Sedangkan kekuranganya adalah tidak bisa memperlihatkan batas samping kiri dan kanan saluran air. Selain itu keberadaan air

pada saluran pun sulit terlihat.

KESIMPULAN

Pemodelan ke depan GPR untuk studi kasus saluran berisi air dan saluran tidak berisi air pada penelitian ini dapat disimpulkan beberapa diataranya hasil pemodelan dengan menggunakan algoritma *split step* dari Bitri dan Grandjean (1998) dapat memperlihatkan pola refleksi dari saluran air yang berupa refleksi hiperbola dengan batas atas saluran air t = 20 ns dan batas bawah saluran air t = 50 ns. Selain itu, keberadaan air pada saluran air diperlihatkan dengan adanya perlambatan waktu dari batas bawah saluran air sebesar 5 ns.

Selain itu hasil pemodelan dengan menggunakan algoritma FDTD dari Irving dan Knight (2006) dapat memperlihatkan batas-batas saluran air dari medan listrik yang menjalar di dalam saluran air. Selain itu keberadaan air dapat dibedakan dengan melihat nilai penurunan amplitudo medan listrik E_y . Kesimpulan terakhir adalah hasil pengukuran GPR dan pemodelan *split-step* modelling cukup baik dalam menggambarkan pola refleksi hiperbola dari saluran air, tetapi tidak mampu menunjukkan keberadaan air, sedangkan dari hasil pemodelan FDTD keberadaan air dan fitur dari saluran air bisa ditunjukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Bapak Wahyudin dan Bapak M. Luthfi dari PATGTL serta Bapak Wahyudi dari ITB untuk dukungannya sehingga paper ini bisa selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- Bano, M.,1996. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. Geophysical Journal Int., 124, 279 288.
- Bitri, A. and Grandjean, 1998. Frequency wavenumber modelling and migration 0f 2D GPR data moderately heterogeneous dispersive media. Geophysical Prospecting, 46, 287 301.
- Cai, J. and McMechan, G.A., 1995. *Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. Geophysics*, **60**, 87 96.
- Casper, D. and Kung, K.S., 1996. Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2-D soil model. Geophysics, **61**, 1034 1049.

- Carcione, J.M., 1996. Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. Geophysics, 61, 1664 1677.
- Davis, J.L. and Annan A.P., 1989. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37, 531 551.
- Gazdag, J., 1978. Wave equation migration with the phase-shift method. Geophysics, 43, 1342 1351.
- Irving, J. and Knight, R., 2006. Numerical Modeling Of Ground Penetrating Radar in 2-D Using MATLAB. Computer and Geoscience, 32, 1247 1258.
- Reynolds, J.M., 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.
- Schneider, John B., 20017. *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method.*
- Sheng Zang and Juncai Xu., 2011. Concrete Pavement Forward Computation of GPR with FDTD. http://www.paper.edu.cn.
- Stoffa, P.L., Fokkema, J.T., de Luna Freire, R.M. and Kessinger, W.P., 1990. *Split-step Fourier migration*. *Geophysics*, **55**, 410 421.
- Turner, G. and Siggins, A.F., 1994. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses. Geophysics, **59** (8), 1192 1200.
- Tzanis, A., 2010. MATGPR Realease 2. Manual and Technical Reference. Department of Geophysics. University of Athens.
- Tzanis, A., 2010. MATGPR Realease 2: A freeware MATLAB package for the analysis and interpretation of common and single offset GPR data. Fast Times, 15(1), 17 43.