

ANALISIS EKSPERIMEN DETEKSI STRUKTUR RONGGA DI BAWAH PERMUKAAN TANAH DENGAN GPR

Nabilla Putri Ariska¹, Dharu Arseno²

^{1, 2}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹nabillaariska@telkomuniversity.ac.id, ²darseno@telkomuniversity.co.id,

Abstrak

Peningkatan jumlah penduduk di Indonesia mempengaruhi kebutuhan perluasan wilayah dan pembangunan infrastruktur. Proses pembangunan infrastruktur perlu melalui banyak tahapan, terutama bagi wilayah yang tidak adanya pendataan dengan baik sebelumnya. Banyak sekali kasus penanaman saluran gas PGN, jaringan kabel PLN, dan gorong-gorong yang tidak sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Untuk mencegah terjadinya kerusakan saluran pada proses pembangunan dapat diatasi dengan mengidentifikasi infrastruktur wilayah. Diharapkan dengan adanya proses identifikasi infrastruktur wilayah dapat membantu pihak terkait agar menjalankan pembangunan lebih efektif. Proses identifikasi dapat dibantu menggunakan Ground Penetrating Radar (GPR) yang dapat mendeteksi objek di bawah permukaan tanah.

Pada eksperimen ini akan dilakukan analisis eksperimen dengan memodelkan kondisi yang menyerupai situasi di lapangan. Pengambilan data akan menerapkan frekuensi *Ultra Wideband* (UWB) yang memungkinkan pengukuran jarak secara presisi dan hasil citra dengan resolusi tinggi. GPR akan dimodelkan dengan sebuah alat yaitu *Vector Network Analyzer* (VNA) yang berfungsi untuk memancarkan serta mengolah sinyal yang ditransmisikan.

Metode A-scan digunakan untuk mendeteksi saluran dengan rongga sebesar 5 cm dan 15 cm. Pada metode A-scan, kedua pemodelan dapat terdeteksi sesuai dengan ukuran saluran yang dimodelkan. Metode B-scan yang digunakan dapat memperlihatkan batas penampang secara citra 2 dimensi.

Kata Kunci: GPR, UWB, VNA, Saluran Berongga.

Abstract

Population increase in Indonesia affects the needs for regional expansions and infrastructures development. The infrastructure development process needs to go through many stages, especially for areas where data was not properly collected beforehand. There are many cases of planting PGN gas lines, PLN cable networks, and culverts that do not comply with the established standards. To prevent damages to the channel in the development process, it can be anticipated by identifying regional infrastructure. It is hoped that the identification process of regional infrastructures can help related parties to carry out development more effectively. The identification process can be assisted using a Ground Penetrating Radar (GPR) which could detect objects below the ground surface.

In this experiment, an experimental analysis will be carried out by modeling conditions that resemble the situation in the field. Data collection will apply Ultra Wideband frequencies (UWB) that allows precise distance measurement and high-resolution imagery results. GPR will be modeled with a tool, namely Vector Network Analyzer (VNA) which functions to transmit and process the transmitted signal.

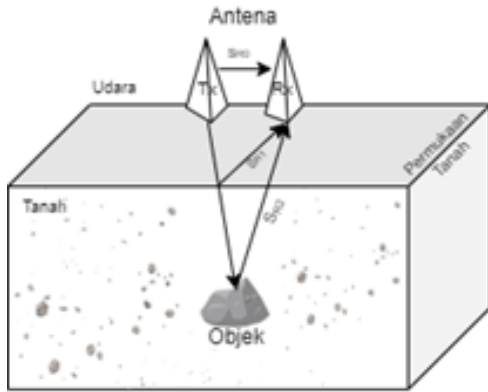
The A-scan method was used to detect channels with cavities of 5 cm and 15 cm. In the A-scan method, both models can be detected according to the size of the channel being modeled. The B-scan method used can show the boundaries of the medium in a 2-dimensional image.

Key Words: GPR, UWB, VNA, Hollow Channel.

1. Pendahuluan

Pembangunan Infrastruktur di Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, pertama faktor demografi karena peningkatan jumlah penduduk yang pesat setiap tahunnya sehingga mempengaruhi perluasan wilayah yang dibutuhkan. Kedua, pembangunan kawasan industri

yang ikut serta dalam pertumbuhan perekonomian di Indonesia. Ketiga, pembangunan jalur transportasi bawah tanah dengan tujuan meningkatkan layanan serta pemerataan pembangunan [1]. Proses pembangunan infrastruktur tersebut tentunya melalui banyak tahapan, terutama bagi wilayah-wilayah yang tidak adanya pendataan dengan baik sebelumnya. Banyak sekali kasus



Gambar 1. Ilustrasi Sistem GPR Deteksi Objek.

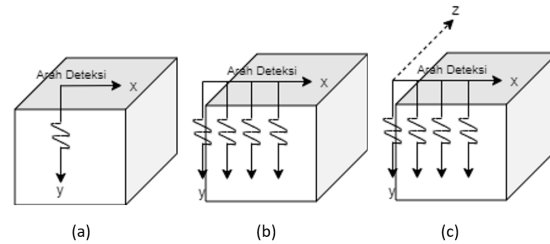
penanaman saluran gas PGN, jaringan kabel PLN, dan gorong-gorong yang tidak sesuai standar minimal yaitu 1,5 m di bawah permukaan tanah, hal seperti ini yang dapat merugikan proses pembangunan [2]. Dengan demikian diperlukan sebuah tahapan yang dapat menghindari terjadinya kerusakan saluran bawah tanah ketika proses pembangunan, yaitu melakukan pengecekan infrastruktur bawah tanah itu sendiri.

Pada penelitian sebelumnya GPR digunakan untuk mendeteksi kebocoran dalam sistem distribusi air [3], deteksi *voids* pada beton [4], selain itu ada deteksi bentuk objek di bawah tanah [5] yang lebih berfokus pada kemampuan GPR untuk mendeteksi berbagai bentuk objek, serta pada penelitian deteksi tunnel bawah tanah [6], membahas faktor apa saja yang sangat mempengaruhi ketepatan deteksi objek di bawah permukaan tanah. Eksperimen ini akan berfokus untuk mengetahui posisi, kedalaman, ukuran objek dan besarnya rongga saluran. Pengambilan data dilakukan dengan memodelkan objek menggunakan batako. Deteksi objek dilakukan dengan dua kondisi yaitu rongga saluran sebesar 5 cm dan 15 cm. Pengambilan data akan menerapkan frekuensi UWB yang memungkinkan pengukuran jarak secara presisi dan hasil citra dengan resolusi tinggi [7].

2. Dasar Teori dan Metodologi

2.1 Ground Penetrating Radar (GPR)

GPR merupakan sebuah metode geofisika yang dapat digunakan untuk mendeteksi objek, perubahan materi, rongga maupun keretakan yang berada di bawah permukaan. GPR dapat digunakan pada berbagai media seperti tanah, es, hingga batuan [8]. Pada eksperimen ini GPR akan dimodelkan menggunakan VNA [9]. Antena yang akan digunakan adalah antena vivaldi, hal ini dikarenakan antena dapat bekerja dengan bandwidth yang lebar, pola radiasi terarah dan side lobe yang rendah [10].



Gambar 2. Skema Metode Scanning (a) A-Scan, (b) B-Scan, dan (c) C-Scan.

Melalui Gambar 1 kita dapat mengetahui kedalaman objek dengan cara menghitung selang waktu yang dibutuhkan ketika sinyal S_T dipancarkan oleh antena pengirim dan ketika sinyal S_{R2} diterima oleh antena penerima [11]. Jika selang waktu dinyatakan dalam t , kecepatan gelombang elektromagnetik dalam tanah dinyatakan dengan v , dan kedalaman dinyatakan dalam d , maka kedalaman objek dapat diperoleh melalui persamaan berikut [12]:

$$d = \frac{1}{2}tv \tag{1}$$

Untuk mengetahui kecepatan medium, dapat diperoleh melalui persamaan berikut [6]:

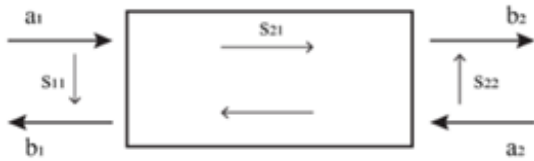
$$V_{medium} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2}$$

2.2 Metode Scanning

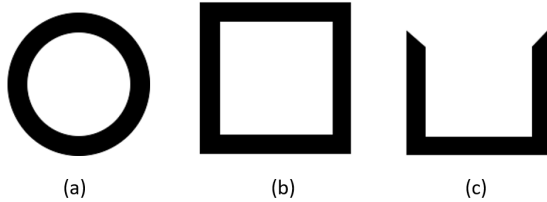
Secara umum metode *scanning* pada GPR diproses dan disajikan dalam beberapa bentuk yaitu A-Scan, B-Scan dan C-Scan. Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa A-Scan (a) merupakan pemrosesan citra sinyal dalam bentuk satu dimensi yang bertujuan untuk mendapatkan informasi pada titik tertentu, kemudian B-Scan (b) merupakan sebuah tahap lanjutan dari A-Scan, B-Scan memproses citra digital menjadi dua dimensi dengan memanfaatkan kumpulan data dari A-scan, sedangkan C-Scan (c) merupakan sebuah pemrosesan citra sinyal menjadi tiga dimensi yang memiliki bidang x, y dan z [11].

2.3 Vector Network Analyzer (VNA)

VNA adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur parameter medan jauh dan parameter medan dekat pada antena. Pengambilan data VNA menggunakan “S” parameter [13]. *Scattering* parameter yang akan digunakan pada eksperimen ini adalah S_{21} , hal ini dikarenakan parameter S_{21} merepresentasikan daya dari *port* 1 ke *port* 2 pada VNA. Frekuensi kerja yang akan digunakan pada eksperimen ini berada pada rentang 0,5 - 8000 MHz. Pengukuran “S” parameter dengan menggunakan 2 *port*, dapat dilihat pada Gambar



Gambar 3. S-Parameter VNA.



Gambar 4. Bentuk Gorong-gorong; (a) Buis Beton, (b) Box Culvert, dan (c) U ditch.

3 port 1 sebagai transmitter dan port 2 sebagai receiver di VNA.

Maka matriks scattering a_1 dan a_2 sebagai gelombang datang dan b_1 dan b_2 sebagai gelombang keluar, dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.4 Pulsa Monocycle

Pulsa *monocycle* merupakan pulsa yang digunakan pada sistem radar. Pulsa *monocycle* sering digunakan dalam sistem radar karena memiliki nilai DC yang rendah. Sinyal *monocycle* hanya memiliki satu siklus saja.

Pada dasarnya pulsa *monocycle* merupakan turunan pertama dari fungsi Gaussian, berikut persamaan pulsa *monocycle*.

$$x(t) = \frac{1}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} (t - \tau) e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Dengan t adalah waktu dalam detik. Sedangkan τ dan σ merupakan parameter pergeseran yang menunjukkan lokasi pulsa dan parameter penskalaan yang berfungsi untuk mengatur lebar pulsa [14].

2.5 Gorong-gorong

Gorong-gorong adalah saluran yang memungkinkan air untuk mengalir dari sisi jalan ke sisi lainnya. Gorong-gorong terletak di bawah jalan raya, jalur kereta api, atau konstruksi lain [15]. Berdasarkan material konstruksinya gorong-gorong dapat dibuat dari baja, PVC dan beton. Berdasarkan modelnya gorong-gorong beton memiliki beberapa macam bentuk, seperti pada Gambar 4 (a) Buis beton, (b) *Box Culvert*, (c) *U ditch*.

Tabel 1. Permittivitas medium

Nomor	Medium	ϵ_r
1	Udara	1
2	Tanah Kering	2-6
3	Beton Kering	4-10



(a) (b)

Gambar 5. Posisi penanaman pemodelan deteksi saluran berongga; (a) Pemodelan pertama, dan (b) Pemodelan kedua

2.6 Nilai Permittivitas Medium

Salah satu yang mempengaruhi gelombang elektromagnetik dalam medium adalah permittivitas medium. Permittivitas medium merupakan respon medium terhadap medan listrik. Tabel 1 menunjukkan nilai permittivitas medium yang akan digunakan pada eksperimen ini [11].

2.7 Skenario Eksperimen

Untuk mengetahui posisi, kedalaman, ukuran saluran serta besar rongga dari objek tersebut, maka *scanning* menggunakan GPR dilakukan menyeluruh di atas permukaan tanah media percobaan. Pemodelan objek bisa menggunakan berbagai alat yang dapat merepresentasikan gorong-gorong. Tentunya dengan mempertimbangkan material bahan yang akan digunakan. Pada penelitian ini akan dimodelkan saluran gorong-gorong dengan bentuk *box culvert* seperti pada Gambar 4 (b).

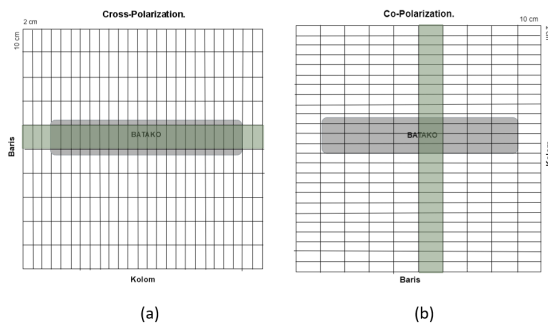
Pada Gambar 5 model saluran yang digunakan

Tabel 2. Kondisi Pemodelan Deteksi Saluran Berongga

Pemodelan ke-	Material	Dalam cm					
		P	L	T	R	TA	TB
1	Batako	40	25	15	5	5	5
2		40	15	25	15	5	5

Keterangan :

- P = Panjang Saluran
- L = Lebar Saluran
- T = Tinggi Saluran
- R = Rongga Saluran
- TA = Tebal lapisan atas
- TB = Tebal lapisan bawah



Gambar 6. Pemodelan Matriks; (a) Searah sumbu x, dan (b) Searah sumbu z

dalam pengujian adalah susunan batako yang dibuat sedemikian rupa agar menyerupai saluran berongga kemudian dikubur di bawah permukaan tanah. Ukuran saluran yang akan dibentuk memiliki dimensi dan kondisi seperti yang tertera dalam Tabel 2.

Berdasarkan pada Tabel 2, pemodelan batako yang diuji akan diambil dengan dua posisi tanam yang berbeda. Hal ini dilakukan untuk membuktikan apakah besar rongga dan dimensi batok yang berbeda dapat terdeteksi dengan baik pada eksperimen ini.

2.7.1 Memodelkan Matriks Pada Permukaan Media Eksperimen

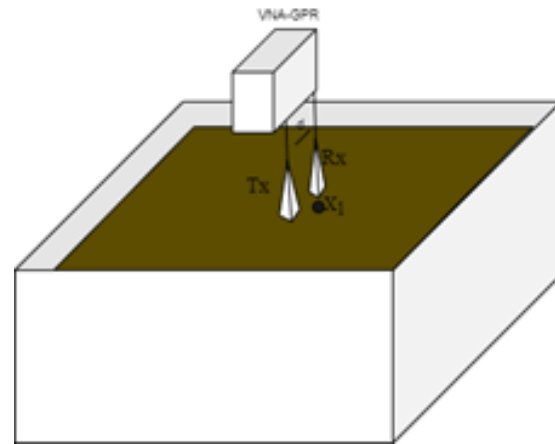
Pemodelan dilakukan agar memudahkan pengambilan data dan menganalisis hasil eksperimen. Permukaan eksperimen akan dibuat jalur untuk proses pendeteksian, pengujian ini permukaan tanah dimodelkan seperti pada Gambar 6 secara (a) Searah sumbu x dan (b) Searah sumbu z. Media eksperimen akan memiliki 10 baris dan 25 titik dari setiap barisnya.

Secara umum pengambilan data dilakukan diatas permukaan tanah. Posisi pengambilan data dilakukan dengan dua cara seperti pada Gambar 66. Hal ini agar hasil deteksi dapat menggambarkan bentuk dari objek yang ditanam dibawah permukaan tanah, baik melintang maupun sejajar dengan objek.

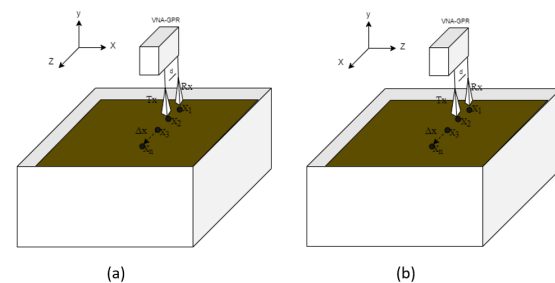
Pengambilan data dari samping akan mempengaruhi hasil deteksi. Karena media deteksi memiliki material berbeda dan ketebalan tertentu.

2.7.2 Metode Deteksi A-Scan

Pengukuran A-Scan dilakukan dengan membandingkan data A-Scan ruang hampa yang sudah dijelaskan pada tahap 1 dan Gambar 7 dengan A-Scan pada permukaan tanah seperti pada Gambar 7 untuk mengetahui sistem pengukuran sudah sesuai atau belum. Jarak yang akan digunakan antara antena Rx dan Tx (d) pada pengukuran adalah 20 cm, jarak antena dengan permukaan permukaan tanah (h) sebesar 20 cm.



Gambar 7. Skenario pengujian A-Scan pada permukaan tanah di satu titik



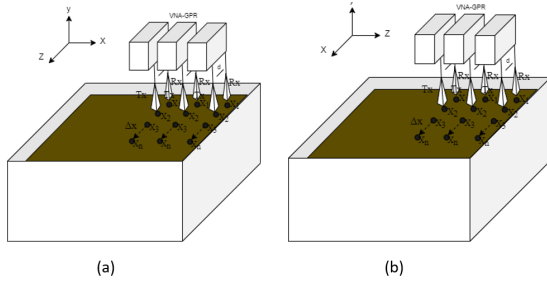
Gambar 8. Skenario pengujian B-Scan pada permukaan tanah di beberapa titik; (a) Searah sumbu z, dan (b) Searah sumbu x

2.7.3 Metode Deteksi B-Scan

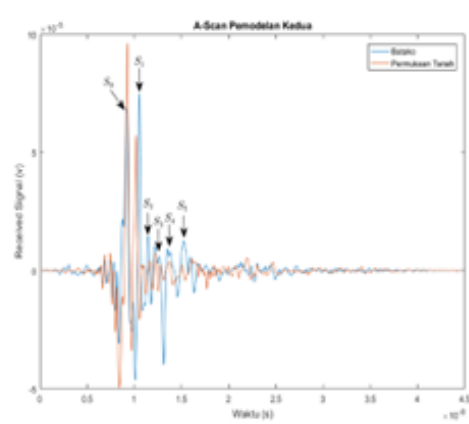
Secara aktual proses pendeteksian saluran gorong-gorong di bawah permukaan tanah memiliki dimensi tertentu sehingga diperlukan pengukuran di sepanjang luasan tersebut. Metode B-Scan dilakukan dengan menarik garis lurus sepanjang sumbu z (a) dan dilakukan dengan menarik garis lurus sepanjang sumbu x (b). Jumlah titik yang diambil sebanyak 15 titik. Pada Gambar 8 terdapat titik X_1 yang merepresentasikan pengukuran titik pertama, X_2 merepresentasikan pengukuran titik kedua, dan X_3 menunjukkan pada titik ketiga, dan seterusnya sampai X_{15} Jarak antara X_1 dan X_2 merupakan Δ_x sebesar 2 cm. Jarak yang digunakan konstan dari awal hingga akhir pengambilan data.

2.7.4 Metode Deteksi C-Scan

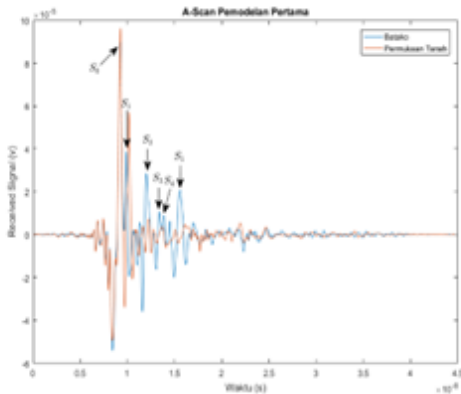
Untuk mengetahui visualisasi posisi objek dalam media deteksi, dapat menggunakan kumpulan data B-Scan yang diperoleh kemudian ditampilkan menggunakan metode C-scan. Metode C-scan yang digunakan akan menggunakan matriks. Nilai matriks diperoleh dari nilai *peak to peak* sinyal pantul.



Gambar 9. Skenario pengujian C-Scan pada permukaan tanah di permukaan media deteksi; (a) Searah sumbu z, dan (b) Searah sumbu x



Gambar 11. Respon sinyal dalam domain waktu A-scan pemodelan kedua.



Gambar 10. Respon sinyal dalam domain waktu A-scan pemodelan pertama.

Pengumpulan data dilakukan secara (a) Searah sumbu z dan (b) Searah sumbu x seperti pada Gambar 9.

3. Pembahasan

3.1 Pengambilan Data S21 dengan Metode A-Scan Pemodelan Pertama

Hasil data respon sinyal A-Scan pemodelan pertama dapat dilihat pada Gambar 10. Maka diperoleh titik puncak sebagai berikut:

- S0 = Coupling = $9,251 e^{-9}$
- S1 = Permukaan Tanah = $1,059 e^{-9}$
- S2 = L.A Batko = $1,202 e^{-8}$
- S3 = L.A Dalam Batako = $1,35 e^{-8}$
- S4 = L.B Dalam Batako = $1,386 e^{-8}$
- S5 = L.B Batako = $1,561 e^{-8}$

Melalui titik puncak maka bisa diketahui jarak dari tiap medium, pertama menghitung selisih dari tiap titik puncak, kemudian mencari nilai kecepatan di tiap medium menggunakan persamaan 2. Setelah itu menghitung jarak antar medium menggunakan persamaan 1. Maka akan diperoleh jarak antar medium

sebagai berikut :

- d Permukaan Tanah ke L.A Batako = $0,214/2 = 0,107 \approx 10,7\text{cm}$
- d L.A Batako ke L.A bg dalam Batako = $0,090/2 = 0,045 \approx 4,5\text{ cm}$
- d L.A bg dalam Batako ke L.B bg dalam Batako = $0,114/2 = 0,057 \approx 5,7\text{ cm}$
- d L.B bg dalam Batako ke L.B Batako = $0,107/2 = 0,053 \approx 5,3\text{cm}$

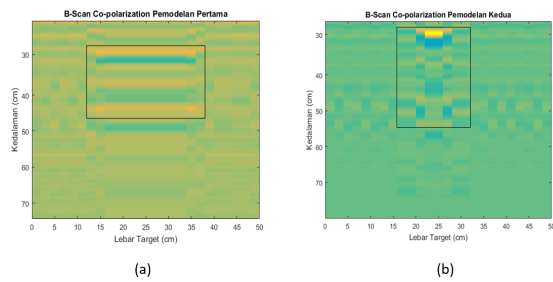
3.2 Pengambilan Data S21 dengan Metode A-Scan Pemodelan Kedua

Hasil data respon sinyal A-Scan pemodelan pertama dapat dilihat pada Gambar 11. Maka diperoleh titik puncak sebagai berikut:

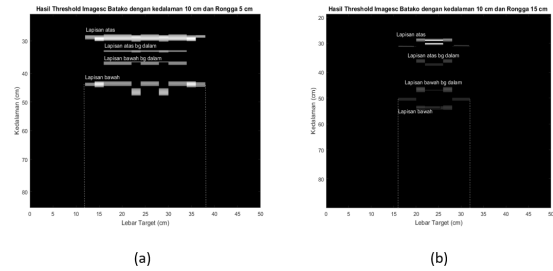
- S0 = Coupling = $9,12 e^{-9}$
- S1 = Permukaan Tanah = $1,047 e^{-9}$
- S2 = L.A Batko = $1,152 e^{-8}$
- S3 = L.A Dalam Batako = $1,283 e^{-8}$
- S4 = L.B Dalam Batako = $1,381 e^{-8}$
- S5 = L.B Batako = $1,527 e^{-8}$

Seperti proses yang sudah disebutkan pada pemodelan pertama, maka kita dapat mengetahui jarak antar medium sebagai berikut :

- d Permukaan Tanah ke L.A Batako = $0,1575/2 = 0,079 \approx 8\text{ cm}$
- d L.A Batako ke L.A bg dalam Batako = $0,08/2 = 0,04 \approx 4\text{ cm}$
- d L.A bg dalam Batako ke L.B bg dalam Batako = $0,294/2 = 0,147 \approx 14,7\text{ cm}$
- d L.B bg dalam Batako ke L.B Batako = $0,0893/2 = 0,0446 \approx 4,5\text{cm}$



Gambar 12. Tampilan B-scan Searah sumbu z



Gambar 13. Threshold B-Scan Searah sumbu z

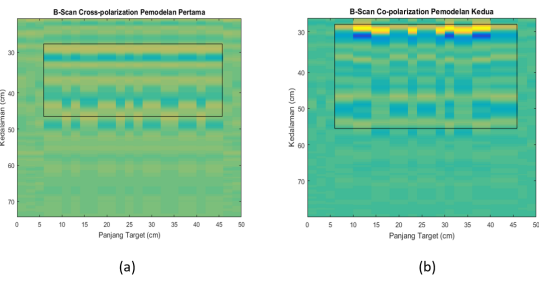
3.3 Pengambilan Data S₂₁ dengan Metode B-Scan Searah sumbu z

Pada Gambar 12 menunjukkan perintah imagesc B-scan pada baris ke-6 untuk pemodelan pertama (a) dan pemodelan kedua (b). Sumbu y menunjukkan kedalaman objek dibawah permukaan tanah, sedangkan sumbu x menunjukkan panjang objek yang dideteksi. Persegi hitam pada kedua gambar menunjukkan adanya perubahan bentuk sinyal yang diakibatkan oleh medium, karena memiliki konstanta dielektrik yang berbeda.

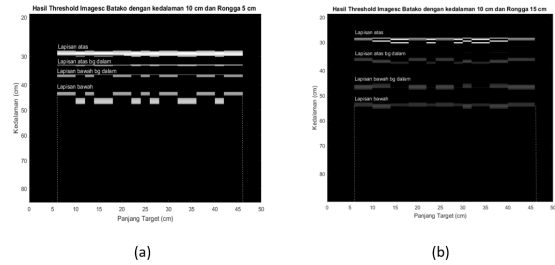
Untuk mengatasi *clutter* atau distorsi pada hasil b-scan maka dilakukan metode *threshold*, yaitu pembatasan pada nilai amplitudo pada keluaran b-scan sebelumnya, agar output hanya menampilkan data dengan nilai amplitudo yang diinginkan. Keluaran yang dihasilkan pada Gambar 13 memudahkan kita untuk mengetahui panjang dari objek, serta mengetahui jarak antar medium dari objek. Kedua pemodelan objek ditanam pada kedalaman 10 cm dari atas permukaan tanah. Pemodelan pertama pada Gambar 13 (a) menunjukkan tinggi objek sebesar 15 cm dengan lebar sebesar 25 cm dan rongga sebesar 5 cm, sedangkan pada pemodelan kedua Gambar 13 (b) menunjukkan tinggi objek sebesar 25 cm dengan lebar sebesar 15 cm dan rongga sebesar 15 cm.

3.4 Pengambilan Data S₂₁ dengan Metode B-Scan Searah sumbu z

Pada Gambar 14 menunjukkan perintah imagesc B-scan pada baris ke-5 untuk pemodelan pertama (a) dan pemodelan kedua (b). Persegi panjang hitam pada kedua gambar menunjukkan adanya perubahan bentuk sinyal



Gambar 14. Tampilan B-scan Searah sumbu x



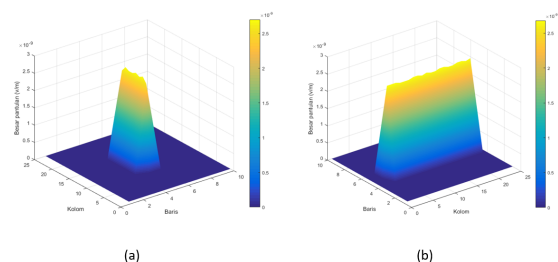
Gambar 15. Threshold B-Scan Searah sumbu x

yang diakibatkan oleh medium, karena memiliki konstanta dielektrik yang berbeda.

Seperti pembahasan sebelumnya, menerapkan metode *threshold* akan memudahkan dalam mengidentifikasi objek. Pada Gambar 15 kita dapat mengetahui panjang objek yang dideteksi pada kedua pemodelan yaitu sepanjang 40 cm. Pada pemodelan pertama objek memiliki tinggi sebesar 15 cm dengan rongga sebesar 5 cm, dan pemodelan kedua memiliki tinggi sebesar 25 cm dengan rongga sebesar 15 cm.

3.5 Rekonstruksi Data S₂₁ dengan metode C-Scan

Gambar 16 menunjukkan kumpulan nilai $\Delta S_1 S_2$ dari data yang telah diambil. Pengambilan data dilakukan sebanyak 10 baris, setiap baris memiliki 25 kolom. Perbedaan warna yang ditampilkan pada keluaran C-Scan menunjukkan adanya perbedaan nilai sinyal pantul pada titik tertentu. Warna kuning menunjukkan bahwa titik tersebut memiliki nilai sinyal pantul besar. Nilai pantulan menunjukkan adanya objek



Gambar 16. Tampilan C-scan data S₂₁.

yang terdeteksi. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan nilai permitivitas.

4. Kesimpulan

1. Deteksi saluran berongga di bawah permukaan tanah menggunakan GPR yang dimodelkan dengan VNA efektif untuk diterapkan.
2. Hasil deteksi yang diperoleh dapat mengidentifikasi ukuran dari pemodelan saluran berongga. Ketepatan deteksi terhadap jarak objek atau ukuran objek dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti latensi, jarak antena, kondisi media eksperimen, maupun jarak penanaman objek.
3. Batas kemampuan jarak deteksi objek dipengaruhi oleh frekuensi kerja yang digunakan. Semakin besar frekuensi yang digunakan maka semakin pendek jangkauan jarak deteksi objek, tetapi semakin baik resolusinya. Begitu sebaliknya.
4. Medium udara membutuhkan selang waktu yang lebih singkat untuk dilalui oleh gelombang elektromagnetik dibandingkan dengan medium lain yang ada pada eksperimen ini.
5. Nilai permitivitas yang berbeda dari setiap medium mempengaruhi kecepatan gelombang yang melaluinya.

Daftar Pustaka

- [1] R. Faradis and U. N. Afifah, "Indeks komposit pembangunan infrastruktur provinsi-provinsi di Indonesia," *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, vol. 20, no. 1, pp. 33–55, dec 2019.
- [2] Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, "Pembangunan Jaringan Gas Bumi Untuk Rumah Tangga", Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2013. [Online]. Available at: <https://migas.esdm.go.id/uploads/buku-jasrgas-isi.pdf> [Accessed 1 December 2020].
- [3] D. Ayala-Cabrera, M. Herrera, J. Izquierdo, S. Ocana-Levario, and R. Perez-Garcia, "GPR-based water leak models in water distribution systems," *Sensors*, vol. 13, no. 12, pp. 15 912–15 936, nov 2013.
- [4] N. Ramadianti, V. Deffian, D. Saragih, R. Nababan, and A. Pranatya Wardana, "Aplikasi ground penetrating radar untuk mengidentifikasi voids pada beton," 10 2019.
- [5] R. Alindra, H. Wijanto, and K. Usman, "Deteksi bentuk objek bawah tanah menggunakan pengolahan citra b-scan pada ground penetrating radar (GPR)," *TELKA - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 3, no. 1, pp. 73–83, may 2017.
- [6] M . Kuloglu and C.-C. Chen, "Ground penetrating radar for tunnel detection," in *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Jul 2010.
- [7] R. Wijaya, P. Adhi, A. Hercuadi, D. Muliawandana, and R. Sariningrum, "Radar penembus dinding uwb-fmcw 500-3000 mhz," *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 14, no. 1, 2016
- [8] S. A. Rahayu, "Stepped frequency continuous wave (sfcw) radar," vol. 10, no. 4, pp. 13–16, 2015.
- [9] S. Y. Nur Wijayanto, Folin Oktafiani, "Sistem ground penetrating radar untuk mendeteksi benda-benda di bawah permukaan tanah," pp. 1–5, 2016.
- [10] E. S. Baso Maruddani and F. Naufal, "Perancangan dan optimasi antena vivaldi pada sistem radar penembus permukaan (ground penetrating radar)." *Itenas*, jan 2019.
- [11] D. J. Daniels, Ed., *Ground Penetrating Radar*. Institution of Engineering and Technology, jan 2004.
- [12] M. A. N. Jufri, Lantu, "Batubara, aplikasi metode ground penetrating radar (gpr) untuk identifikasi seam," 2015.
- [13] Burki, T. Ali, and S. Arshad, "Vector network analyzer (VNA) based synthetic aperture radar (SAR) imaging," in *INMIC*. IEEE, dec 2013.
- [14] E. Ali, A. A. Pramudita and D. Arseno, "Concrete Thickness Measurement Model for GPR," 2019 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2019, pp. 125-128, doi: 10.1109/CAMA47423.2019.8959534.
- [15] I. A. Touselak, D. S. Krisnayanti, P. H. Simatupang, and R. Ramang, "Analisis atas gorong-gorong jalur lingkaran luar bendungan raknamo," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 91–104, 2019.