

Deteksi Kebocoran Pipa Air Dengan Stepped Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar

Kevin Aria Nugraha
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

kevinariangrh@student.telkomuniversity.ac.id

Sahira Dwi Nafisa
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

sahiradnn@student.telkomuniversity.ac.id

Shafiyah Putri Riyanto
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

shafiyahptr@student.telkomuniversity.ac.id

Fatwa Mulhan Nabila
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

Fatwamulhan@student.telkomuniversity.ac.id

Aloysius Adya Pramudita
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id

Vinsensius Sigit Widhi Prabowo
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

vinsensiusvsw@telkomuniversity.ac.id

Abstrak - Kebocoran pada pipa air bersih merupakan permasalahan serius yang dapat menyebabkan kehilangan air dalam jumlah besar, menurunkan efisiensi distribusi, serta berpotensi menimbulkan kerusakan lingkungan dan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode deteksi kebocoran pipa air bersih yang bersifat non-destruktif dengan memanfaatkan teknologi Ground Penetrating Radar (GPR) berbasis Stepped-Frequency Continuous Wave (SFCW). Metode yang digunakan meliputi akuisisi data parameter hamburan S21 menggunakan LiteVNA pada domain frekuensi, yang kemudian direkonstruksi ke domain waktu menggunakan Inverse Fast Fourier Transform (IFFT). Sistem GPR dilengkapi dengan antena Vivaldi Ultra-Wideband (UWB) yang beroperasi pada rentang frekuensi 1– 6 GHz, serta analisis hasil pengukuran dilakukan melalui visualisasi A-scan, B-scan, dan Cscan. Hasil pengujian skala laboratorium menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi keberadaan pipa pada kedalaman 10 cm dan 20 cm dengan pantulan yang jelas, serta masih mendeteksi pipa pada kedalaman 30 cm meskipun terjadi pelemahan amplitudo akibat atenuasi medium. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem GPR-SFCW berpotensi digunakan sebagai metode nondestruktif untuk deteksi kebocoran pipa air bersih, dengan pengembangan lebih lanjut pada stabilitas pemetaan.

Kata kunci: Ground Penetrating Radar, SFCW, Kebocoran Pipa, Antena Vivaldi, IFFT

I. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan salah satu kebutuhan manusia yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Namun, dalam praktiknya masih sering dijumpai berbagai kendala dalam proses distribusi air bersih. Salah satu permasalahan utama yang kerap

terjadi adalah kebocoran pada jaringan pipa, yang dapat mengakibatkan kehilangan air dalam jumlah yang sangat besar. Secara umum, kebocoran tersebut berdampak pada menurunnya efisiensi operasional serta meningkatnya biaya produksi. Berdasarkan laporan World Bank, sekitar 30–50% air yang didistribusikan di negara berkembang hilang akibat kebocoran pada jaringan distribusi [1]. Di Indonesia, Badan Pusat Statistik (BPS) melaporkan bahwa kurang lebih 35% air dari total produksi PDAM hilang karena kebocoran pipa [2]. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi dan menurunkan kualitas layanan air bersih, sehingga diperlukan metode deteksi kebocoran yang efektif guna meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

Kebocoran pada jaringan distribusi air bersih umumnya terjadi pada pipa yang tertanam di bawah permukaan tanah, sehingga keberadaannya sulit dideteksi secara visual. Akibatnya, kebocoran sering kali baru diketahui setelah muncul penurunan tekanan, berkurangnya debit layanan, atau terlihatnya indikasi kerusakan pada permukaan tanah di sekitar jalur perpipaan. Selain itu, perbedaan kedalaman pipa, kondisi tanah, serta kompleksitas jaringan distribusi semakin memperbesar tantangan dalam menentukan lokasi kebocoran secara cepat dan akurat. Dampaknya, proses inspeksi dan perbaikan menjadi lebih lama serta berpotensi meningkatkan biaya operasional akibat perlunya investigasi lapangan yang dilakukan secara berulang [3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi kebocoran pada sistem perpipaan, baik melalui pendekatan berbasis sensor, metode mekanik, maupun sistem pemantauan dan analisis data pada jaringan distribusi air [3]. Namun demikian, sejumlah metode tersebut masih

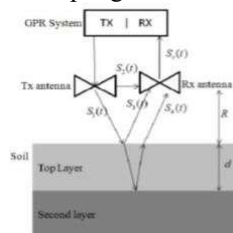
memiliki keterbatasan dalam hal efektivitas dan presisi, terutama pada kebocoran berukuran kecil, jaringan pipa yang tertanam di bawah permukaan, serta kondisi lapangan yang kompleks. Hal ini menyebabkan proses deteksi dan penentuan lokasi kebocoran menjadi lebih sulit [3], [4]. Dalam banyak kasus, identifikasi kebocoran masih memerlukan inspeksi dan investigasi lanjutan di lapangan, yang berdampak pada meningkatnya waktu penanganan serta biaya operasional, khususnya ketika lokasi kebocoran tidak dapat ditentukan secara cepat dan akurat [3]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan metode deteksi kebocoran yang lebih andal dan presisi.

II. Kajian Teori

A. Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode geofisika non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi dan memetakan objek, struktur, maupun perubahan material di bawah permukaan tanah dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi. Prinsip kerja GPR didasarkan pada pemancaran pulsa gelombang radar ke dalam tanah melalui antenna pemancar, kemudian gelombang tersebut akan dipantulkan kembali ketika menemui perbedaan sifat listrik material, seperti konstanta dielektrik dan konduktivitas. Pantulan sinyal ini ditangkap oleh antenna penerima dan direkam sebagai data waktu tempuh (time delay) yang selanjutnya diolah untuk menghasilkan citra bawah permukaan. Kedalaman penetrasi dan resolusi GPR sangat dipengaruhi oleh jenis tanah, kadar air, serta frekuensi antenna yang digunakan.

Dalam aplikasinya, GPR banyak dimanfaatkan pada berbagai bidang, antara lain geoteknik, arkeologi, hidrologi, dan inspeksi infrastruktur. Pada bidang teknik sipil, GPR digunakan untuk mendeteksi utilitas bawah tanah seperti pipa dan kabel, mengidentifikasi rongga atau retakan pada beton, serta memantau kondisi perkerasan jalan. Sementara itu, dalam studi lingkungan dan sumber daya air, GPR berperan dalam pemetaan lapisan tanah, muka air tanah, dan potensi kebocoran pipa. Keunggulan utama GPR terletak pada kemampuannya memberikan hasil cepat dengan resolusi tinggi tanpa merusak objek yang diteliti, meskipun efektivitasnya dapat menurun pada media dengan konduktivitas listrik tinggi seperti tanah lempung atau tanah jenuh air.



GAMBAR 1

Model transmisi gelombang pada Ground Penetrating Radar [19].

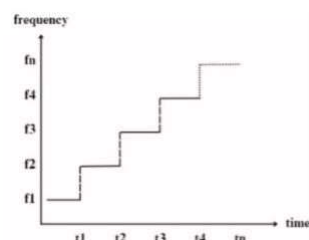
B. Stepped-Frequency

ContinuousWave (SFCW)

Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) merupakan salah satu teknik gelombang kontinu yang banyak digunakan dalam sistem radar dan pengukuran jarak berbasis frekuensi.

Prinsip kerja SFCW adalah memancarkan sinyal gelombang kontinu secara bertahap pada sejumlah frekuensi diskrit yang meningkat (stepped frequency) dalam rentang frekuensi tertentu. Pada setiap langkah frekuensi, sistem mengukur respon pantulan dari target, baik dalam bentuk amplitudo maupun fase. Informasi fase dari setiap frekuensi kemudian dikombinasikan untuk merekonstruksi profil jarak target melalui transformasi domain frekuensi ke domain waktu. Dengan pendekatan ini, SFCW mampu memperoleh resolusi jarak yang tinggi tanpa memerlukan bandwidth instan yang besar seperti pada sistem radar pulsa [4].

Keunggulan utama metode SFCW terletak pada efisiensi spektrum, sensitivitas tinggi, serta kemampuannya menghasilkan pengukuran jarak dan karakteristik target dengan tingkat akurasi yang baik. Selain itu, karena sinyal yang dipancarkan bersifat gelombang kontinu, kebutuhan daya puncak relatif lebih rendah dibandingkan radar pulsa, sehingga lebih hemat energi dan cocok untuk aplikasi jangka panjang. Teknik SFCW banyak diaplikasikan dalam ground penetrating radar (GPR), deteksi kebocoran pipa, pemetaan struktur bawah tanah, serta sistem sensing non-destruktif lainnya. Meskipun demikian, SFCW memiliki keterbatasan pada waktu akuisisi yang lebih lama dan sensitivitas terhadap pergerakan target, sehingga implementasinya memerlukan sinkronisasi dan pengolahan sinyal yang cermat.



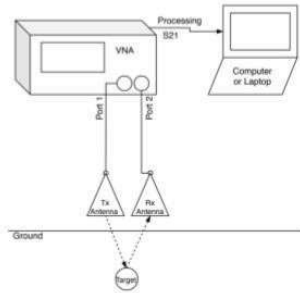
GAMBAR 2

Stepped-Frequency Continuous-Wave (SFCW)

C. Pemodelan radar SFCW menggunakan Vector Network Analyzer (VNA)

Pemodelan radar Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) menggunakan Vector Network Analyzer (VNA) dilakukan dengan memanfaatkan kemampuan VNA dalam menghasilkan dan mengukur sinyal pada rentang frekuensi diskrit yang bertahap. VNA berfungsi sebagai sumber sekaligus penerima sinyal, di mana parameter hamburan (terutama S11 atau S21) diukur pada setiap langkah frekuensi untuk merepresentasikan respons pantulan target. Data

domain frekuensi yang diperoleh kemudian ditransformasikan ke domain waktu menggunakan Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) sehingga menghasilkan profil jarak (range profile) target radar. Dengan pendekatan ini, VNA memungkinkan pemodelan sistem radar SFCW secara presisi, efisien, dan fleksibel dalam analisis karakteristik target tanpa memerlukan perangkat radar konvensional yang kompleks [5]



GAMBAR 3

Pemodelan GPR menggunakan VNA

D. Metode ekstraksi data GPR

Metode ekstraksi data Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan proses pengolahan sinyal untuk memperoleh informasi bawah permukaan yang relevan dari data mentah hasil pemindaian radar. Ekstraksi data umumnya diawali dengan tahap pra-pemrosesan seperti koreksi waktu nol (time-zero correction), penghilangan noise dan clutter, serta filtering frekuensi untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap noise. Selanjutnya dilakukan pemilihan atribut sinyal, seperti amplitudo, waktu tempuh (two-way travel time), dan pola refleksi hiperbola, yang merepresentasikan keberadaan serta kedalaman objek bawah permukaan. Data yang telah diekstraksi kemudian dapat dianalisis secara kuantitatif maupun divisualisasikan dalam bentuk radargram untuk mendukung interpretasi struktur geologi, utilitas bawah tanah, atau deteksi anomali [6]

III. METODE

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan fokus pada pengembangan dan pengujian sistem Ground Penetrating Radar (GPR) berbasis Stepped-Frequency Continuous Wave (SFCW) untuk mendeteksi kebocoran pipa air bersih secara non-destruktif. Proses penelitian meliputi perancangan dan implementasi GPR yang terintegrasi dengan Vector Network Analyzer (VNA) untuk akuisisi data parameter hamburan S21 pada domain frekuensi, serta antena Vivaldi Ultra-Wideband (UWB) sebagai pemancar dan penerima gelombang elektromagnetik. Data yang diperoleh kemudian direkonstruksi ke domain waktu menggunakan Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) untuk menganalisis respon pantulan dari objek bawah permukaan. Analisis hasil pengukuran dilakukan melalui visualisasi A-scan, B-scan, dan C-scan, yang memungkinkan identifikasi posisi, kedalaman, dan keberadaan kebocoran pipa

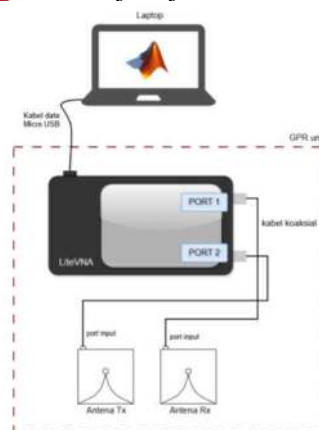
berdasarkan karakteristik pantulan sinyal, sehingga metode ini dapat mengevaluasi kondisi pipa secara akurat tanpa perlu pembongkaran fisik.



GAMBAR 4

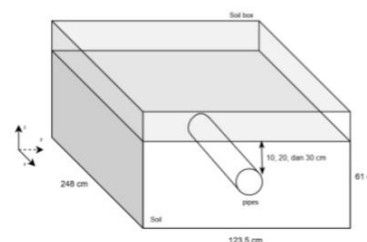
Blok diagram perencanaan sistem

Metode SFCW dipilih dalam penelitian ini karena memberikan fleksibilitas, ketelitian pengukuran, dan cocok untuk pengujian skala laboratorium, mampu menghasilkan resolusi kedalaman yang baik melalui pemanfaatan bandwidth frekuensi yang lebar, serta menyediakan informasi amplitudo dan fase yang lengkap untuk analisis medium bawah permukaan. Implementasinya dilakukan dengan VNA dua port, di mana port S11 dihubungkan ke antena pemancar dan port S21 ke antena penerima untuk mengukur parameter S21, yang merepresentasikan fungsi transfer gelombang elektromagnetik yang merambat melalui tanah dan objek uji.



GAMBAR 5

Pemodelan radar menggunakan VNA



GAMBAR 6

Pemodelan objek bawah permukaan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan lokasi kebocoran pipa air bersih di bawah tanah melalui perancangan sistem pendeteksian berbasis Ground Penetrating Radar (GPR) dengan metode Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) yang dimodelkan menggunakan LiteVNA. Sistem memanfaatkan sinyal pantul sebagai representasi

kondisi bawah permukaan, dengan tahapan awal berupa validasi sinyal dari tanah kosong dan tanah dengan plat besi terkubur sebagai acuan dalam mengidentifikasi anomali. Anomali tersebut kemudian diinterpretasikan sebagai keberadaan pipa di bawah tanah, baik pipa berisi air normal maupun pipa berisi air yang mengalami kebocoran, dengan estimasi kedalaman yang relatif konsisten pada masing-masing kondisi [8]

Pengujian dilakukan setelah seluruh integrasi perangkat keras dan perangkat lunak berjalan dengan baik, tanpa kendala teknis selama proses berlangsung. Uji sistem mencakup kemampuan radar dalam mendeteksi sinyal pantul target serta mendeteksi kebocoran pipa. Seluruh pengujian dilaksanakan di laboratorium Telkom University pada periode 24

November hingga 10 Desember 2025, diawali dengan pengaturan parameter antenna dan kedalaman objek untuk memperoleh performa optimal. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan model deteksi GPR yang paling tepat guna menghasilkan representasi dan visualisasi kondisi bawah tanah secara optimal.

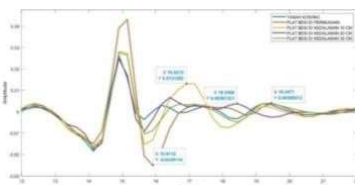
A. Pengujian Hasil Deteksi Tanah Dan Plat Besi



GAMBAR 7
Tanah tanpa objek



GAMBAR 8
Tanah dengan objek plat besi



GAMBAR 9

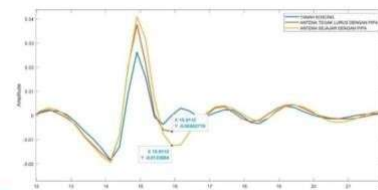
Grafik nilai sinyal pantul tanah dan plat besi di berbagai kedalaman

Hasil A-scan menunjukkan adanya pergeseran waktu pantulan seiring bertambahnya kedalaman plat besi, yang menegaskan kemampuan sistem GPR dalam mengidentifikasi posisi objek

bawah tanah. Plat besi di permukaan menghasilkan lonjakan pantulan dominan sekitar 15 ns akibat kontras sifat listrik yang tinggi, sedangkan saat ditanam pada kedalaman 10 cm, 20 cm, dan 30 cm, pantulan utama bergeser berturut-turut ke sekitar 16 ns, 18 ns, dan 19 ns.

Pergeseran ini terjadi karena bertambahnya lintasan rambat gelombang elektromagnetik di dalam tanah, sementara amplitudo pantulan semakin menurun akibat atenuasi medium [7]. Pola tersebut membuktikan bahwa kedalaman objek berbanding lurus dengan twoway travel time dan berbanding terbalik dengan amplitudo pantulan, sesuai dengan teori dasar GPR.

B. Pengujian Pada Dua Orientasi Antena

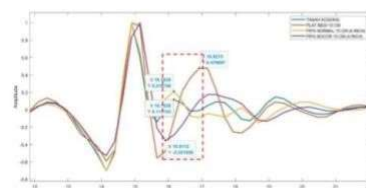


GAMBAR 10

Grafik nilai sinyal pantul tanah dan pipa dengan posisi deteksi antenna yang berbeda

Hasil pengujian menunjukkan bahwa orientasi antenna sejajar pipa menghasilkan amplitudo pantulan yang lebih besar dan stabil dibandingkan orientasi tegak lurus, karena kopling elektromagnetik lebih optimal antara polarisasi linier antenna Vivaldi dan geometri pipa. Oleh sebab itu, orientasi sejajar dipilih sebagai konfigurasi terbaik untuk mendeteksi keberadaan pipa dan anomali kebocoran [9].

C. Sistem Dapat Mendeteksi Kebocoran Pipa

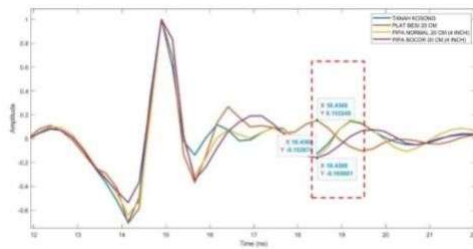


GAMBAR 11

Grafik A-SCAN nilai sinyal pantul pipa di kedalaman 10 cm

Analisis A-scan pada kedalaman 10 cm difokuskan pada rentang waktu 15,9–16,9 ns dengan plat besi sebagai referensi validasi karena menghasilkan respon paling jelas dan stabil. Plat besi menunjukkan puncak amplitudo tertinggi, sedangkan tanah kosong dan pipa normal memiliki waktu pantulan yang hampir sama namun amplitudo pipa normal lebih besar akibat adanya objek pipa [14]. Pada kondisi pipa bocor, puncak pantulan muncul lebih awal dengan amplitudo yang lebih besar, menandakan perubahan sifat medium di sekitar pipa

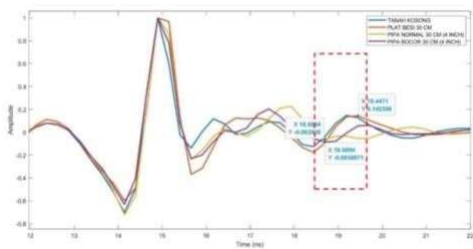
yang memengaruhi kecepatan rambat gelombang elektromagnetik.



GAMBAR 12

Grafik A-SCAN nilai sinyal pantul pipa di kedalaman 20 cm

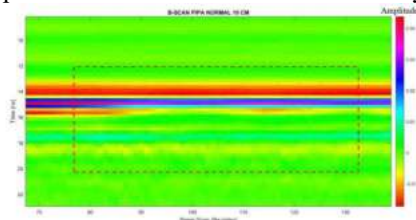
Pada pengujian kedalaman 20 cm, puncak pantulan digunakan sebagai acuan posisi waktu objek karena muncul pada waktu yang lebih besar dibandingkan kedalaman 10 cm akibat bertambahnya lintasan rambat gelombang elektromagnetik di dalam tanah [10]. Pada kondisi pipa normal dan pipa bocor, puncak pantulan muncul pada waktu yang sama, menandakan kedalaman yang identik, namun pipa bocor menghasilkan amplitudo absolut yang lebih besar akibat perubahan kondisi medium di sekitar pipa. Perbedaan amplitudo ini menjadi indikator keberadaan kebocoran, sebelum pengujian dilanjutkan pada kedalaman 30 cm untuk mengamati respon pada penguburan yang lebih dalam [12].



GAMBAR 123

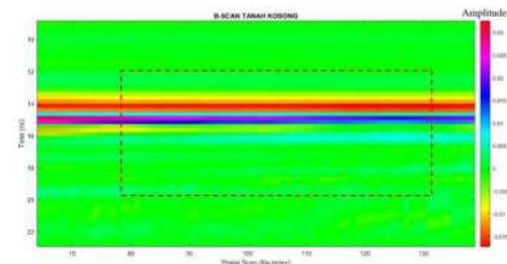
Grafik A-SCAN nilai sinyal pantul pipa di kedalaman 30 cm

Analisis A-scan pada kedalaman 30 cm menunjukkan bahwa pantulan utama muncul pada waktu yang lebih lama dibandingkan kedalaman 10 cm dan 20 cm akibat bertambahnya lintasan rambat gelombang elektromagnetik di dalam tanah, dengan respon plat besi dijadikan acuan posisi waktu pantulan [11]. Pantulan pipa normal dan pipa bocor muncul pada waktu yang berdekatan, menandakan kedalaman yang relatif sama, namun pipa bocor menghasilkan amplitudo absolut yang lebih besar akibat perubahan kondisi medium di sekitarnya [13]



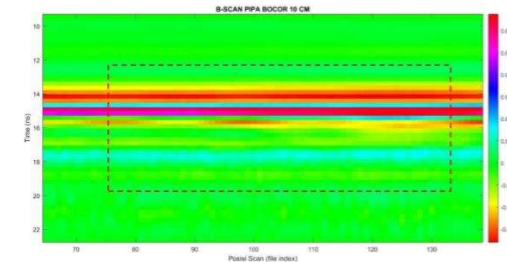
GAMBAR 14

Grafik B-scan pipa normal di kedalaman 10 cm



GAMBAR 15

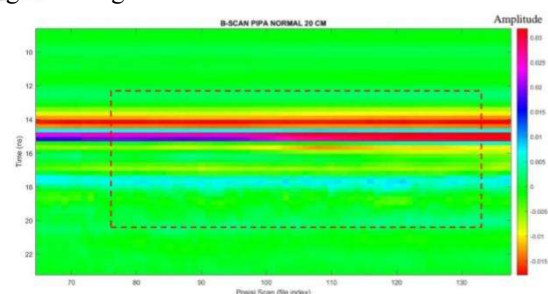
Grafik B-scan Tanah Kosong



GAMBAR 16

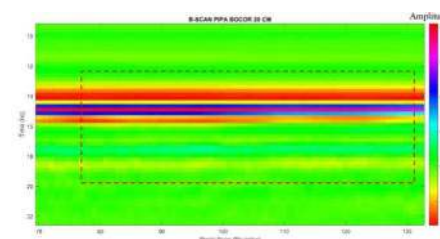
Grafik B-scan pipa bocor di kedalaman 10 cm

Hasil B-scan menunjukkan perbedaan jelas antara kondisi tanah kosong, pipa normal, dan pipa bocor pada kedalaman 10 cm. Pada tanah kosong, pola refleksi homogen dan kontinu tanpa anomali, sedangkan pipa normal tampak sebagai pita refleksi horizontal stabil pada posisi scan 80–130 dan waktu 15,9–16,9 ns. Pipa bocor tetap menunjukkan refleksi utama pada rentang yang sama, namun terdapat variasi intensitas dan ketebalan pita refleksi terutama di posisi scan 95–115, menandakan perubahan sifat elektromagnetik tanah akibat peningkatan kadar air, yang membuat indikasi kebocoran lebih mudah diamati pada kedalaman ini karena rugi propagasi gelombang belum dominan.



GAMBAR 13

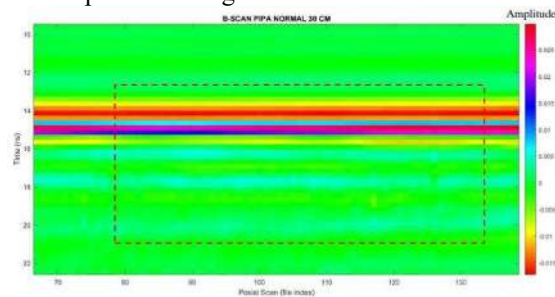
Grafik B-SCAN pipa normal di kedalaman 20 cm



GAMBAR 14

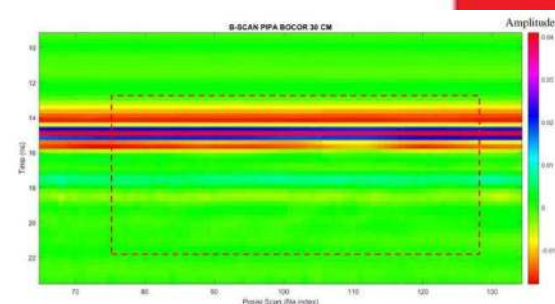
Grafik B-SCAN pipa bocor di kedalaman 20 cm

Pada kedalaman 20 cm, refleksi pipa tetap terlihat dominan pada posisi scan 80–130 dan waktu 18,4–19,4 ns, namun intensitasnya lebih lemah dibandingkan kedalaman 10 cm akibat peningkatan atenuasi gelombang elektromagnetik. Pipa bocor masih menunjukkan variasi intensitas di area tengah (scan 95–105), meski perubahan lebih halus, sesuai teori bahwa kebocoran memengaruhi amplitudo pantulan melalui perubahan sifat medium tanah. Dengan bertambahnya kedalaman, perbedaan visual antara pipa normal dan bocor semakin sulit diamati karena penurunan signal-to-noise ratio.



GAMBAR 15

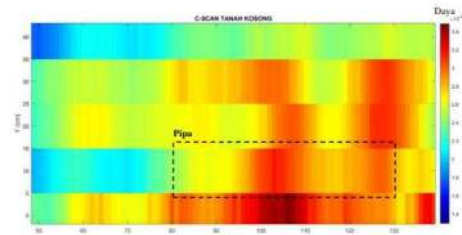
Grafik B-SCAN pipa normal di kedalaman 30 cm



GAMBAR 16

Grafik B-SCAN pipa bocor di kedalaman 30 cm

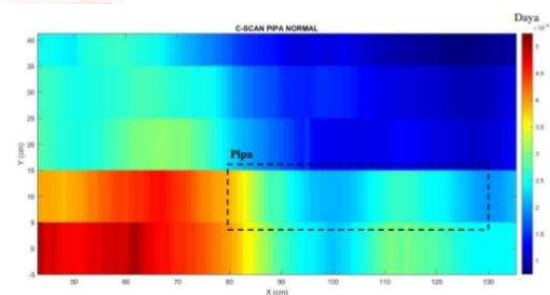
Pada kedalaman 30 cm, refleksi pipa tetap terdeteksi pada rentang scan 80–130, namun amplitudo pantulan semakin melemah akibat dominannya atenuasi medium tanah, sehingga perbedaan antara pipa normal dan bocor menjadi sangat halus. Indikasi kebocoran muncul sebagai variasi intensitas dan ketebalan refleksi di sekitar scan 95–115, meski kontrasnya rendah. Untuk memperkuat interpretasi lokasi kebocoran, dilakukan pemetaan C-scan yang menampilkan distribusi dua dimensi daya sinyal pantul. Pada pipa normal, distribusi energi cenderung terstruktur mengikuti jalur pipa, sedangkan pada pipa bocor, peningkatan kadar air menyebabkan perubahan sifat elektromagnetik tanah yang tidak seragam, menghasilkan variasi intensitas, pelebaran zona respon, dan pola anomali yang menyebar, sehingga C-scan efektif membedakan kondisi tanah kosong, pipa normal, dan pipa bocor berdasarkan distribusi energi pantulan.



GAMBAR 17

Grafik C-SCAN tanah kosong di kedalaman 10 cm

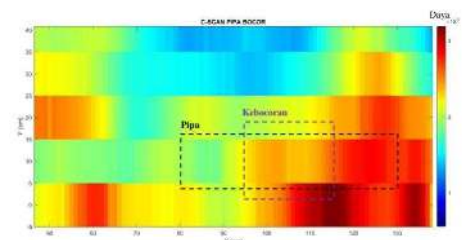
Grafik C-scan pada tanah kosong menunjukkan variasi intensitas daya sinyal pantul yang tersebar tanpa pola terlokalisasi, meskipun jalur pipa ditandai sebagai referensi pada scan 80–130 dan sumbu Y 5–15. Variasi ini disebabkan oleh perbedaan kelembaban, kepadatan, dan kondisi permukaan tanah yang memengaruhi permitivitas relatif dan konduktivitas, serta efek difraksi dan refraksi gelombang, sehingga C-scan tanah kosong digunakan sebagai baseline untuk membandingkan pola yang lebih terstruktur pada kondisi pipa normal dan bocor.



GAMBAR 18

Grafik C-SCAN pipa normal di kedalaman 10 cm

Kondisi pipa normal pada C-scan menunjukkan distribusi intensitas daya berbeda dari tanah kosong, dengan dominasi warna biru hingga hijau di jalur pipa (scan 80–130, sumbu Y 5–15), namun belum membentuk refleksi yang jelas dan terlokalisasi. Perubahan pola ini muncul karena integrasi energi pantulan dalam jendela waktu, difraksi, refraksi, dan atenuasi gelombang, sehingga keberadaan pipa lebih terlihat sebagai variasi distribusi intensitas spasial daripada peningkatan daya pantulan yang dominan.



GAMBAR 19

Grafik C-SCAN pipa bocor di kedalaman 10 cm

Citra C-scan pipa bocor menunjukkan pola distribusi intensitas yang lebih kompleks dan

menyebar dibanding pipa normal, terutama di bagian tengah jalur pipa yang diasosiasikan dengan lokasi kebocoran. Perubahan ini disebabkan rembesan air yang mengubah sifat elektromagnetik tanah, memengaruhi permitivitas relatif, konduktivitas, dan karakter refleksi gelombang. Meskipun pola berbeda, indikasi kebocoran belum terlokalisasi secara jelas atau kontras tajam, karena variasi energi juga muncul di area lain akibat ketidakseragaman medium, coupling antena, dan distribusi kelembaban. Oleh karena itu, C-scan pipa bocor menunjukkan perubahan pola energi yang menyebar, namun deteksi dan penentuan posisi kebocoran memerlukan analisis lebih lanjut.

V. PENUTUP

Berdasarkan hasil perancangan implementasi, dan pengujian, sistem deteksi kebocoran pipa air bersih berbasis GPR dengan pendekatan SFCW menggunakan LiteVNA berhasil direalisasikan dan mampu menjawab tujuan Tugas Akhir melalui akuisisi data S21, rekonstruksi domain waktu dengan IFFT, serta visualisasi A-scan, Bscan, dan C-scan. Sistem menunjukkan performa terbaik pada kedalaman dangkal hingga menengah (10–20 cm), sementara pada kedalaman 30 cm pantulan masih terdeteksi namun melemah akibat atenuasi medium.

Antena Vivaldi UWB dengan rentang frekuensi 1–6 GHz mendukung penetrasi sinyal, dan orientasi antena sejajar pipa terbukti menghasilkan respon pantulan yang lebih jelas dan stabil. Perbedaan pipa normal dan pipa bocor lebih tampak sebagai perubahan pola distribusi anomali pada sinyal pantul, khususnya pada pemetaan C-scan berupa pelebaran zona anomali di sekitar jalur pipa, meskipun ketajaman dan kestabilan hasil masih dipengaruhi oleh kedalaman, coupling antena, dan kondisi medium tanah

REFERENSI

- [1] World Bank, *Water Supply and Sanitation Performance Indicators*. Washington, DC, 2021.
- [2] Badan Pusat Statistik (BPS), *Laporan Kinerja PDAM Indonesia Tahun 2023*. Jakarta, 2023.
- [3] E. Farah and I. Shahrour, "Water Leak Detection: A Comprehensive Review of Methods, Challenges, and Future Directions," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 20, 2024, doi: 10.3390/w16202975.
- [4] H. Fan, S. Tariq, and T. Zayed, "Acoustic Leak Detection Approaches for Water Pipelines," *Automation in Construction*, vol. 138, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104226.
- [5] A. Adetya, N. T. Dewi, and P. S. R. I. Komala, "Simulasi Pemasangan Pressure Reducing Valve (PRV) pada Jaringan Distribusi (Studi Kasus: Wilayah Utara Sumber IPA Palukahan PDAM Kota Padang)," vol. 11, no. 2, pp. 173–183, 2023.
- [6] F. Ahmad, "Pemetaan Kawasan Rawan Kebocoran Pipa Distribusi Air Bersih di Kota Balikpapan," pp. 8–19, 2021.
- [7] R. N. Tarman and T. Tamrin, "Analisis Kehilangan Air (Non Revenue Water) pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Kota Bau-Bau," *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 1, no. 1, pp. 65–77, 2022, doi: 10.55606/jurritek.v1i1.273.
- [8] BPPSPAM – Kementerian Pekerjaan Umum, *Pedoman Penurunan Air Tak Berekening (Non Revenue Water)*. Jakarta.
- [9] Tim Solusi Kebocoran, "Jasa Perbaikan Kebocoran Rumah, Ruko dan Kantor." Accessed: Mar. 21, 2025. [Online]. Available: <https://solusirumahbocor.com/>
- [10] T. Sundana and P. N. Bandung, "Sistem Monitoring Kebocoran Pipa Distribusi Air Berbasis SCADA," 2022, doi: 10.36418/jist.v3i1.328.
- [11] A. Afrizal, U. A. Ahmad, and J. S. Wicaksana, "Desain dan Implementasi Alat Deteksi Kebocoran Pipa Air Menggunakan Sensor Pressure Transmitter (Studi Kasus PDAM Kabupaten Madiun)," *eProceedings of Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 966–973, 2022. [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/17931>
- [12] H. Kusuma, F. Ramadhan, A. A. Alawi, R. Nauval, and J. Setiawan, "Prototype Pendeteksi Kebocoran Pipa Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU ESP8266 Melalui Dashboard Adafruit.io," *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 3, no. 2, pp. 327–333, 2021, doi: 10.47233/jteksis.v3i2.253.
- [13] A. Rahmandika, "Perancangan Sistem Penerima Sinyal Deteksi Kebocoran Pipa Air Bersih Bawah Tanah Berbasis Sensor Ultrasonik," *e-Proceedings of Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 2240–2247, 2022.
- [14] S. H. Prasetyowati and R. Indrawati, "Perencanaan Desain dan Rencana Anggaran Biaya Sistem Penyediaan Air Minum di Dusun Karangasem, Desa Muntuk, Dlingo, Kabupaten Bantul," *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, vol. 21, no. 1, pp. 50–58, 2021, doi: 10.37412/jrl.v21i1.92.
- [15] Z. Tahar, D. Xavier, and M. Benslama, "An Ultra-Wideband Modified Vivaldi Antenna Applied to Ground and Through-the-Wall Imaging," vol. 86, pp. 111–122, 2018.
- [16] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2nd ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.

- [17] H. Xiong, J. Li, Z. Li, and Z. Zhang, "GPR-GAN: A Ground-Penetrating Radar Data," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 62, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1109/TGRS.2023.3337172.

