

EVALUASI KERUSAKAN JALAN PADA PERKERASAN ASPAL MENGUNAKAN METODE RESISTIVITAS 2-DIMENSI DAN *GROUND PENETRATING RADAR (GPR)* DI JALAN TRENGGULI-KUDUS KM 39+850

Afni Nur Jannah^{1*}, Dwa Desa Warnana¹, Wien Lestari¹

¹Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan-Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
e-mail : afninerj02@gmail.com

Abstrak. Jalan Raya Trengguli-Kudus yang terletak di jalur pantura (jalur pantai utara) beberapa kali mengalami kerusakan yang berulang, bahkan setelah diperbaiki. Jalan ini merupakan jalur utama mobilisasi dan distribusi logistik di Pulau Jawa sehingga kerusakan signifikan pada jalan ini akan memengaruhi kegiatan sosial ekonomi. Dengan tujuan untuk mengidentifikasi kondisi bawah permukaan dan distribusi kerusakan pada jalan ini, digunakan metode geofisika resistivitas 2D dan *Ground Penetrating Radar (GPR)*. Konfigurasi yang digunakan dalam metode resistivitas adalah *Wenner-Schlumberger*. Data sekunder data bor dan hasil tes pit juga digunakan sebagai validasi dalam interpretasi. Penelitian dilakukan pada perkerasan aspal (*flexible pavement*) KM 39+850. Jumlah lintasan metode resistivitas terdiri dari dua lintasan dengan panjang 60 m dan sembilan lintasan untuk GPR. Lintasan GPR dari tujuh lintasan melintang sepanjang 11 m dengan jarak antar lintasan 10 m dan dua lintasan memanjang dengan panjang 60 m. Hasil dari penelitian ini menunjukkan lokasi penelitian berdasarkan data resistivitas yang divalidasi dengan bor terdiri dari litologi pasir dan kerikil, lanau kelempungan, lempung padat, dan lempung lunak. Beberapa jenis kerusakan yang teridentifikasi berdasarkan penampang GPR divalidasi dengan hasil tes pit dan kondisi di lapangan adalah *rutting* (alur) pada lapisan aspal, distorsi pada lapisan agregat kelas B hingga tanah asli, retak pada lapisan aspal – agregat kelas B, dan penurunan tanah (*settlement*) pada lapisan agregat kelas B – tanah asli. Adanya penurunan ini juga didukung oleh posisi lempung pada sayatan 3D resistivitas yang terlihat menurun ke arah selatan yang memperkuat dugaan adanya pergerakan material ke arah sungai.

Kata Kunci: GPR; Jalan Trengguli-Kudus; Kerusakan Jalan; Perkerasan Aspal; Resistivitas

Abstract. *Jalan Raya Trengguli-Kudus, located on the north coast road, has experienced repeated damage, even after repairs. This road is the main route of mobilization and logistics distribution in Java, so significant damage to this road will hamper socio-economic activities. With the aim of identifying subsurface conditions and damage distribution on this road, 2D resistivity and Ground Penetrating Radar (GPR) geophysical methods were used. The configuration used in the resistivity method is Wenner-Schlumberger. Secondary data of drill data and pit test results were also used as validation in interpretation. The research was conducted on asphalt pavement (flexible pavement) KM 39 + 850. The number of trajectories of the resistivity method consists of two trajectories with a length of 60 m and nine trajectories for GPR. The GPR trajectories consisted of seven transverse trajectories of 11 m length with a distance of 10 m between trajectories and two longitudinal trajectories of 60 m length. The results of this study show that the research site based on resistivity data validated by drilling consists of lithologies of sand and gravel, clayey silt, dense clay, and soft clay. Some types of damage identified based on the GPR cross-section validated by the pit test results and field conditions are rutting in the asphalt layer, distortion in the class B aggregate layer to native soil, cracking in the asphalt layer - class B aggregate, and settlement in the class B aggregate layer - native soil. This settlement is also supported by the position of the clay in the resistivity 3D incision which appears to be decreasing towards the south, which strengthens the suspicion of material movement towards the river.*

Keywords: GPR; Trengguli-Kudus Road; Road Damage; Resistivity; Asphalt Pavement

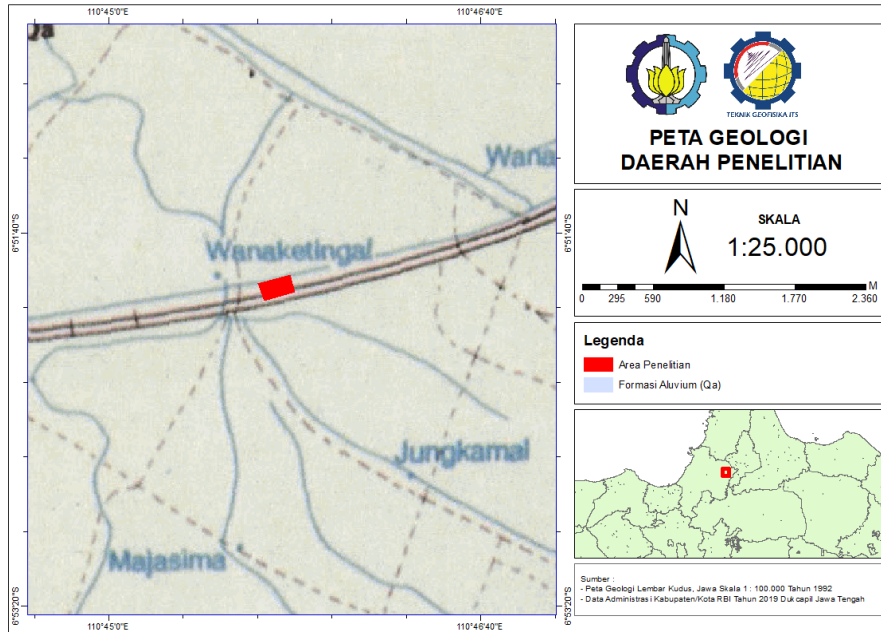
PENDAHULUAN

Jalan Raya Trengguli – Kudus adalah jalan yang berada di jalur Pantai Utara (Pantura). Ditinjau dari lokasinya, jalan ini menjadi salah satu jalur utama mobilisasi dan distribusi logistik di Pulau Jawa, sehingga keberadaannya penting untuk menunjang kegiatan sosial ekonomi. Menurut Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan (dalam Kusuma, 2024), ruas jalan Trengguli – Kudus sering mengalami kerusakan seperti *rutting* (alur), retak, penurunan yang tidak merata, dan pergeseran bahu jalan yang ditunjukkan pada Gambar 1. Perbaikan jalan sering dilakukan di area tersebut dengan melakukan pelapisan ulang (*overlay*) atau penggantian perkerasan menjadi beton, tetapi jalan masih sering mengalami kerusakan yang menyebabkan umurnya kurang dari umur rencana konstruksi. Dengan demikian, perlu dilakukan penilaian kinerja jalan raya untuk mengetahui kondisi lapisan bawah tanah dan distribusi kerusakan di badan jalan Trengguli-Kudus, khususnya pada bagian perkerasan lentur (*flexible pavement*) dengan bahan aspal sebagai pengikatnya.



Gambar 1. Retak Memanjang pada Jalan Trengguli-Kudus (Sumber: Google Earth, 2023)

Lokasi penelitian berada pada Jalan Raya Trengguli-Kudus KM 39+850. Secara umum, area tersebut terletak pada formasi Qa (Gambar 2). Berdasarkan data bor yang dianalisis oleh Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan (2021), litologi penyusun area tersebut adalah lanau kelempungan (*clayey-silt*), lempung (*clay*), dan lempung kepasiran (*sandy-clay*) yang mencirikan endapan aluvium.



Gambar 2. Peta Geologi Lokal Daerah Penelitian

Untuk mengetahui kondisi lapisan bawah tanah, dilakukan penelitian menggunakan metode geofisika resistivitas dua dimensi (2D) dan *Ground Penetrating Radar* (GPR). Pemilihan kedua metode tersebut dilakukan dengan pertimbangan bahwa kedua metode merupakan metode non-destruktif yang dapat menunjukkan hasil secara lokal dan kedalaman lapisan. Metode resistivitas adalah metode geofisika aktif yang memiliki prinsip menginjeksikan arus melalui dua titik arus dan mengukur beda potensial pada titik tertentu (Telford, 1990). Nilai arus dan beda potensial yang didapat kemudian dihitung menjadi nilai tahanan jenis (resistivitas) lapisan di bawah permukaan secara vertikal dan horizontal, sehingga hasil yang didapatkan adalah penampang dalam bentuk dua dimensi (2D). Penggunaan metode resistivitas untuk jalan raya terdapat dalam penelitian Ariputra et al. (2021) yang menganalisis penyebab kerusakan ruas jalan di Jalan Rasau Jaya, Kabupaten Kubu Raya. Berdasarkan penelitian tersebut, lapisan seperti pasir, kerikil, dan lempung berpasir menjadi dugaan penyebab berkurangnya daya dukung sebagian ruas Jalan Rasau Jaya. Penelitian lain juga dilakukan oleh Viki et al. (2022) di Desa Serindang, Kabupaten Sambas, Kalimantan Barat untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan dan zona lemah. Penyebab utama dari kerusakan jalan di lokasi tersebut berdasarkan resistivitas adalah dominasi lempung ditambah dengan tidak adanya batuan keras di permukaan yang mendukung konstruksi.

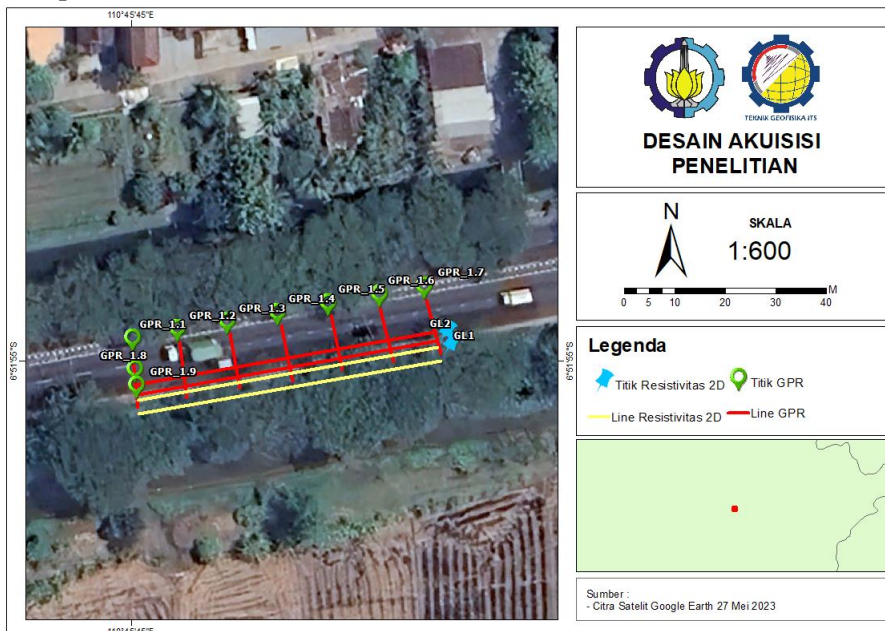
Selain metode resistivitas 2D, metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) juga biasa digunakan untuk penilaian jalan dengan perkerasan aspal (*flexible pavement*) (Solla et al., 2021). Metode ini merupakan salah satu metode geofisika aktif dengan sumber berupa gelombang elektromagnetik yang termasuk gelombang radio. Jenis gelombang radio ini memiliki frekuensi rendah yaitu berkisar 1 – 1000 MHz. Kelebihan metode ini antara lain non-destruktif (tidak merusak lingkungan), biaya operasional yang relatif murah, mudah dalam prosedur pengerjaannya, dan mampu mendapatkan resolusi tinggi untuk kedalaman dangkal (Anggraini et al., 2023). Aplikasi metode ini pada jalan umumnya digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan, mendeteksi retakan dan rongga (*void*) di bawah jalan dengan menganalisis kemungkinan penyebabnya, kontroling kualitas aspal, dan mendeteksi perubahan kandungan air atau kelembaban tanah (Solla et al., 2021). Penelitian lain yang dilakukan oleh Solla et al. (2014) dan Liu et al. (2022) menggunakan metode GPR dapat mendeteksi retakan di jalan dengan perkerasan aspal. GPR juga dapat membedakan retakan besar dan kecil dari pola refleksinya (Liu et al., 2022). Pemantauan jalan raya menggunakan GPR oleh Alsharahi et al. (2019) menunjukkan adanya kemiringan lapisan bawah tanah pada jalan yang berpotensi rusak. Dengan merujuk dari beberapa penelitian terdahulu, dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui kondisi lapisan bawah

tanah dan distribusi kerusakan di badan jalan Trengguli-Kudus dengan menerapkan prinsip kerja resistivitas dan GPR.

METODOLOGI

Lokasi penelitian berada di Jalan Raya Trengguli Kudus KM 39+850, Desa Wonoketingal, Kecamatan Karanganyar, Kabupaten Demak, Jawa Tengah, tepatnya pada koordinat $6^{\circ}51'54.94''S$ dan $110^{\circ}45'45.01''E$ hingga $6^{\circ}51'55.08''S$ dan $110^{\circ}45'46.87''E$. Lokasi tersebut dipilih dengan pertimbangan banyaknya kerusakan jalan yang terjadi dengan jenis retakan memanjang dan perubahan (deformasi) pada sisi luar jalan (Gambar 1).

Pada penelitian ini, terdapat dua lintasan metode resistivitas 2D yang berarah Barat-Timur sepanjang 60 m dan sembilan lintasan metode GPR seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.2. Lintasan metode GPR dibagi menjadi dua bagian yang terdiri dari tujuh lintasan berarah Utara-Selatan (melintang) sepanjang 11 m dan dua lintasan berarah Barat-Timur (memanjang) atau sejajar dengan lintasan metode resistivitas 2D sepanjang 60 m seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Spasi setiap lintasan GPR melintang adalah 10 m, sedangkan untuk spasi antar elektroda pada lintasan metode resistivitas 2D adalah 2,5 m.



Gambar 3. Desain Akuisisi Penelitian

Peralatan yang digunakan untuk pengambilan data antara lain *main unit MAE*, *roll* kabel, meteran, palu, elektroda, aki, *Oerad Scudo GPR*, dan GPS. Frekuensi sentral alat *Oerad Scudo GPR* adalah 500 MHz. Selain peralatan, data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer adalah data hasil akuisisi metode GPR dalam format *.*SEGY* dan data resistivitas dalam format *.*INV*. Pengukuran GPR merekam *travel time* gelombang elektromagnetik yang ditransmisikan ke target, sedangkan resistivitas akan mengukur nilai resistivitas semu dari proses injeksi arus DC melalui elektroda yang disusun dengan konfigurasi *Wenner-Schlumberger*. Dalam pengambilan data primer, dilakukan *quality control* untuk mengetahui apakah data tersebut dapat dilanjutkan untuk diolah atau tidak. Kontrol data ini dilakukan di lapangan sehingga apabila terdapat data yang memiliki nilai standar deviasi yang tinggi dan resistivitas berbeda signifikan dibandingkan dengan data lain, dapat dilakukan pengambilan data ulang. Untuk data sekunder, digunakan data bor (Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan, 2021) dan hasil tes pit (Satuan Kerja P2JN Jawa Tengah, 2022) yang mendukung dalam tahap interpretasi. Adapun pengambilan data primer dilakukan pada tanggal 2 September 2023.

Tabel 1. Data Lintasan GPR dan Resistivitas

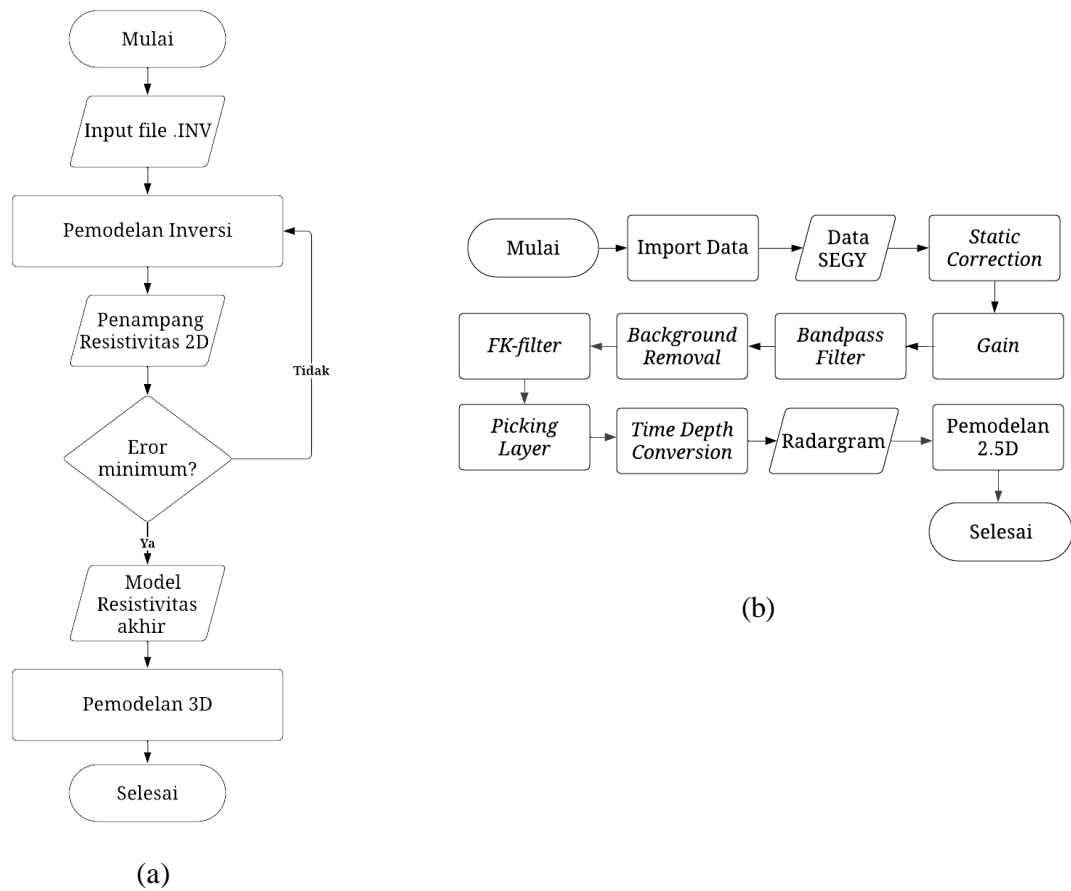
Metode	Nama Lintasan	Panjang Lintasan (m)
GPR	1.1 – 1.7	11
	1.8 & 1.9	60
Resistivitas	GL1 & GL2	60

Setelah memperoleh data primer dan sekunder, kemudian dilakukan pengolahan data resistivitas 2D dan GPR dengan alur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Langkah awal pengolahan data resistivitas 2D adalah input data *.INV ke *software* pengolahan. Pengolahan ini bertujuan untuk melakukan inversi dari data resistivitas semu setiap datum. Setelah menginput data, dilakukan pemodelan data lapangan secara inversi *Least-Squared Inversion* (Loke, 1996). Selanjutnya, akan diketahui *error* dari hasil penampang resistivitas 2D. Nilai resistivitas hasil dari inversi kemudian dilakukan pemodelan 3D yang terdiri dari tahapan membuat batas atas, batas bawah, dan keseluruhan bentuk penampang 3D. Setelah mendapatkan bentuk model 3D, dilakukan penyayatan di jarak lintasan tertentu untuk melihat pergeseran dan penurunan material.

Pengolahan GPR menggunakan beberapa filter dalam pengolahannya antara lain sebagai berikut (Widayanti, 2020).

- Static Correction* untuk pengoreksian waktu gelombang datang pada titik nol karena adanya jarak antara alat dengan permukaan tanah.
- Gain* untuk memperkuat sinyal (amplitudo) yang diakibatkan pelemahan (atenuasi) ketika energi sinyal dipancarkan ke bawah permukaan bumi.
- Bandpass Filter* untuk menghilangkan frekuensi yang tidak diinginkan dengan memilih nilai di atas batas bawah (*cut-off* rendah) dan nilai di bawah batas atas (*cut-off* tinggi).
- Background Removal* untuk menghilangkan *background noise* yang muncul secara konsisten pada radargram dan menghalangi sinyal yang sebenarnya.
- Karhunen-Loeve Filter* (FK-filter) untuk menghilangkan *noise* koheren atau sinyal yang tidak diinginkan.
- Picking Layer* untuk menentukan batas-batas lapisan dan memasukkan nilai *velocity* sebelum dilakukan konversi ke kedalaman.
- Time to Depth Conversion* untuk mengubah domain waktu menjadi kedalaman sehingga memudahkan interpretasi.

Pengolahan GPR akan menghasilkan penampang radargram yang akan divisualisasikan dalam pemodelan 2,5D. Pemodelan ini memerlukan koordinat awal dan akhir, panjang, kedalaman, dan gambar penampang radargram dari masing-masing lintasan. Pemodelan 2,5D GPR dilakukan untuk melihat kemenerusan kerusakan yang terjadi di Jalan Trengguli-Kudus.

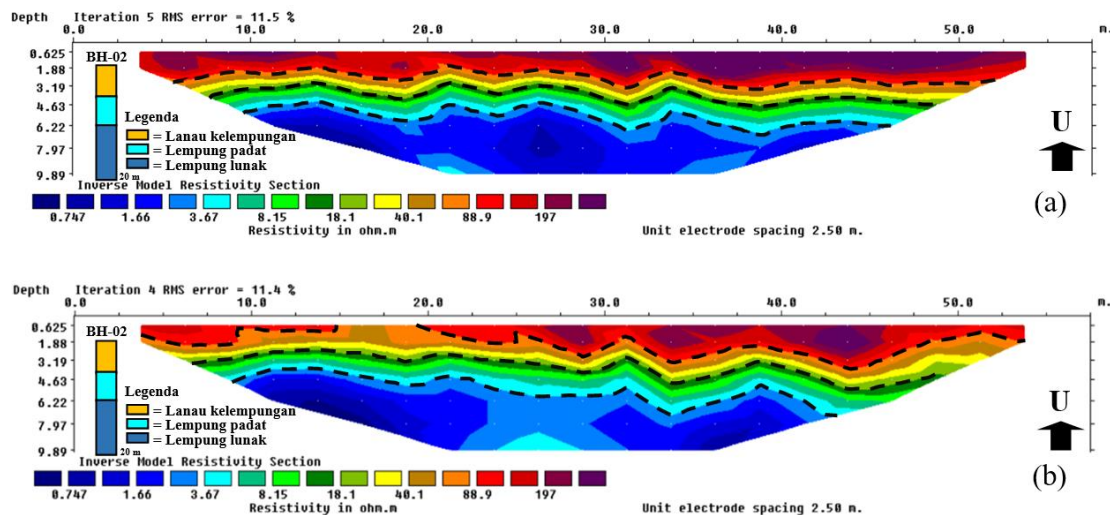


Gambar 5. Diagram Alir Pengolahan (a) Metode Resistivitas 2D dan (b) GPR

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kondisi Lapisan Bawah Tanah di Jalan Trengguli-Kudus

Setelah dilakukan pemodelan inversi pada dua lintasan resistivitas, didapatkan hasil model penampang resistivitas 2D. Pemodelan inversi dengan iterasi sebanyak lima kali untuk lintasan GL1 menghasilkan nilai *RMS error* sebesar 11,5%, sedangkan untuk lintasan dua dilakukan iterasi sebanyak empat kali dan menghasilkan nilai *RMS error* sebesar 11,4%. Rentang nilai resistivitas yang didapatkan pada lintasan ini adalah 0,747 – 197 Ω m. Selanjutnya akan dilakukan interpretasi untuk mengestimasi litologi dari hasil penampang resistivitas GL1 dan GL2.



Gambar 6. Hasil Interpretasi Penampang Resistivitas 2D (a) Lintasan GL1 dan (b) Lintasan GL2

Jenis litologi lintasan GL1 dan GL2 berdasarkan hasil interpretasi kuat diduga menunjukkan litologi yang sama mengingat jarak kedua lintasan yang hanya terpaut 2,5 m. Dasar dari interpretasi nilai resistivitas ini adalah kondisi geologi lokal dan didukung dengan data bor yang diperoleh dari Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan (2021). Nilai resistivitas $>88,9 \Omega\text{m}$ (merah hingga ungu), diinterpretasikan sebagai litologi pasir dan kerikil. Untuk resistivitas $18,1 - 88,9 \Omega\text{m}$ (hijau muda – oranye), diidentifikasi sebagai litologi lanau kelepungan yang terdapat pada kedalaman 2 – 4 m. Resistivitas $3,67 - 18,1 \Omega\text{m}$ (hijau toska – hijau tua) pada kedalaman 4 – 6 m, diidentifikasi sebagai litologi lempung padat. Nilai resistivitas $<3,67 \Omega\text{m}$ (biru muda – biru tua) pada kedalaman lebih dari 6 m diidentifikasi sebagai litologi lempung lunak.

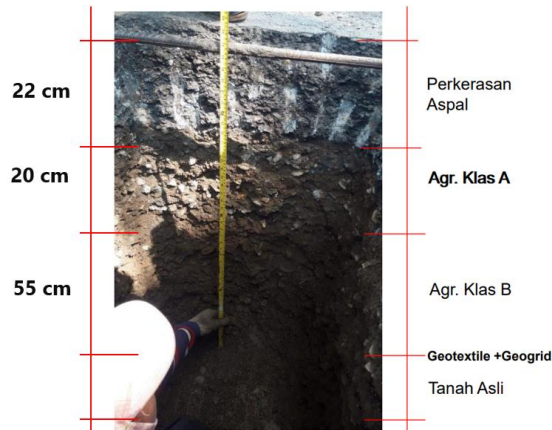
Material lempung memiliki konduktivitas tinggi dimana nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan resistivitas sehingga nilai resistivitasnya rendah yang sesuai dengan rentang nilai pada kedua penampang resistivitas di atas (Gambar 6). Interpretasi litologi lempung padat pada kedalaman 4 – 6 m juga meninjau dari hasil uji SPT (*Standard Penetration Test*) yang didapatkan dari Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan (2021) dengan nilai N (N-SPT) 6, sedangkan untuk lempung lunak nilai N-nya hanya 2. Uji SPT adalah metode pengujian tanah dengan cara penumbukan untuk mengetahui kekuatan tanah.

Tabel 2. Hasil Interpretasi Lintasan Resistivitas GL1 dan GL2

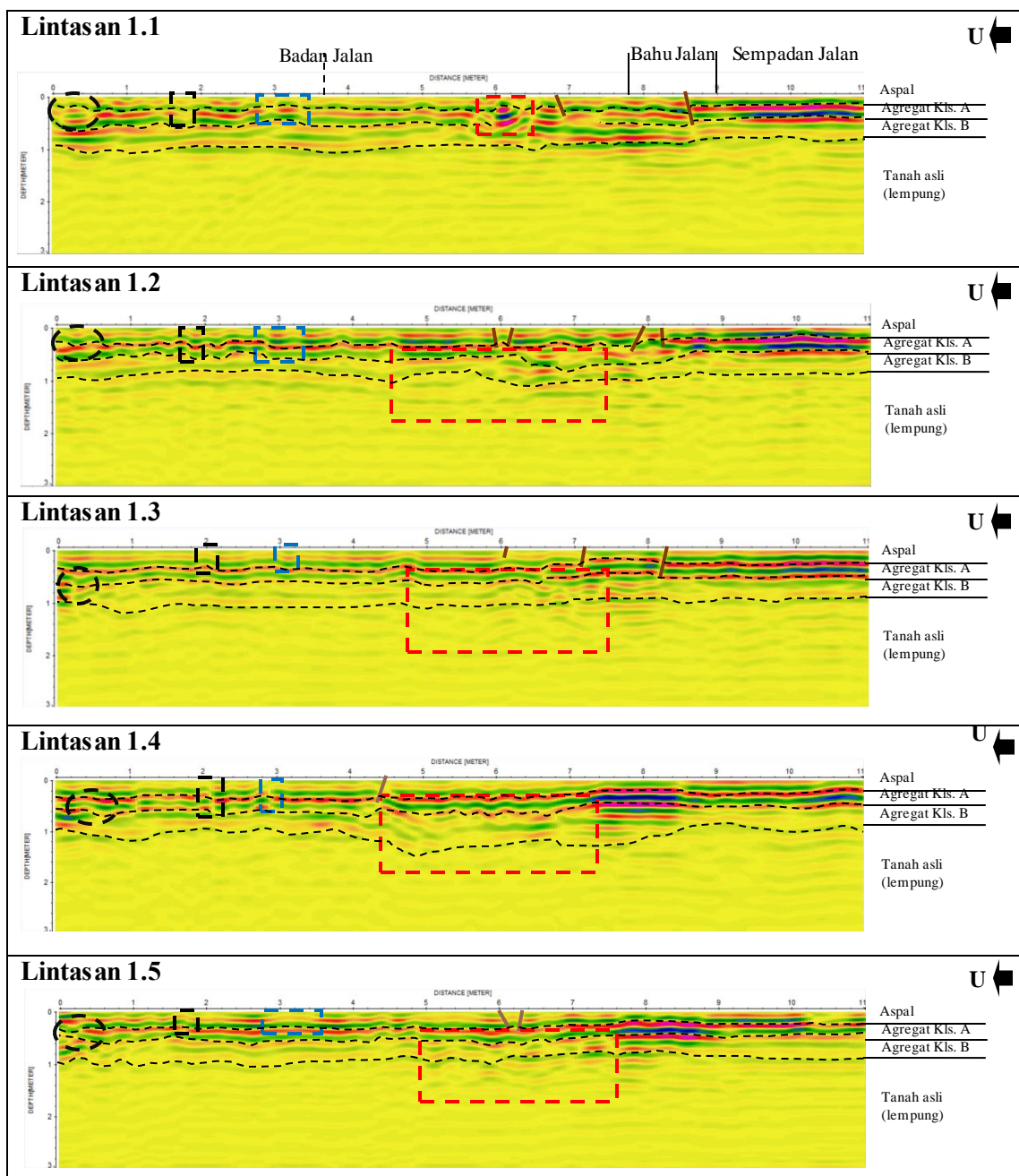
Kedalaman (m)	Resistivitas (Ωm)	Litologi
0 – 2	$>88,9$	Pasir dan kerikil
2 – 4	$18,1 - 88,9$	Lanau kelepungan
4 – 6	$3,67 - 18,1$	Lempung padat
>6	$<3,67$	Lempung lunak

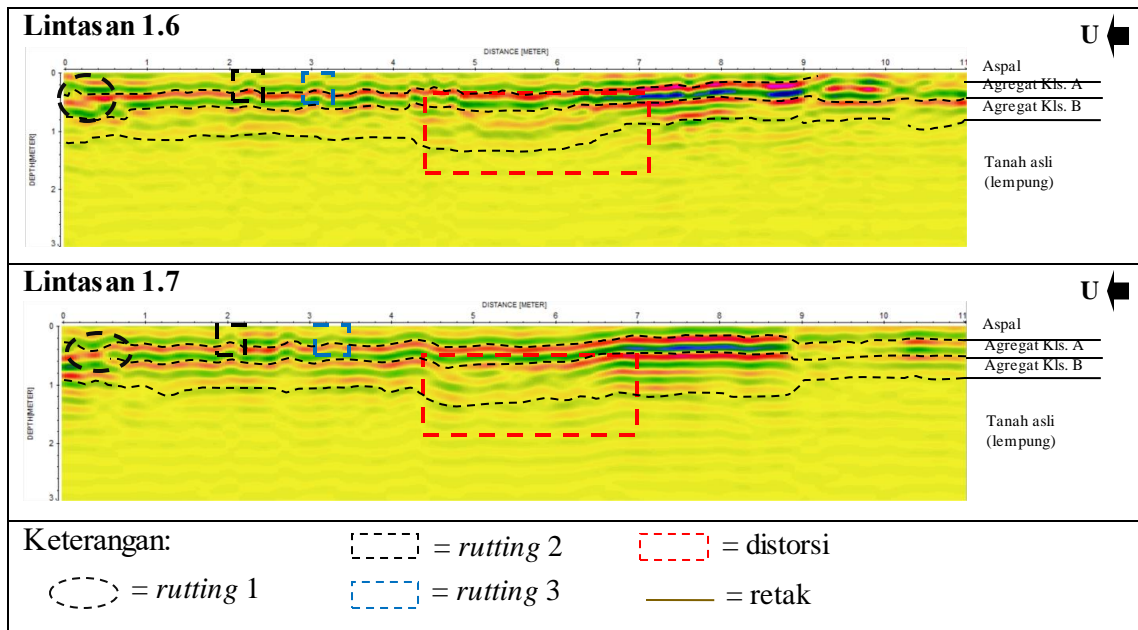
Analisis Kerusakan Jalan Trengguli-Kudus

Identifikasi kerusakan pada penelitian ini dilakukan dengan menginterpretasi hasil pengolahan metode GPR berdasarkan pola refleksinya. Setiap lintasan juga dikorelasikan dengan hasil tes pit untuk melihat di bagian struktur lapisan jalan mana kerusakan tersebut terjadi. Hasil tes pit yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 7, sedangkan untuk hasil analisis kerusakan lintasan GPR 1.1 – 1.7 (lintasan melintang) dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Struktur Jalan Hasil Tes Pit (Sumber: PPK 3.1 Provinsi Jawa Tengah, 2023)





Gambar 8. Interpretasi Kerusakan pada Lintasan GPR 1.1 – 1.7 dan Korelasi dengan Hasil Tes Pit

Lintasan 1.1 berada di ujung paling kiri lintasan GPR dengan panjang 11 m dan berarah Utara-Selatan (melintang). Penambahan tahap pengolahan migrasi dengan *fk migration (stolt)* ditambahkan pada lintasan ini karena terdapat hiperbola pada jarak ke 5,5 – 6,5 m, tetapi tidak ditemukan adanya utilitas pada saat akuisisi di lapangan. Fungsi dari tahap ini adalah untuk memindahkan data GPR ke posisi yang benar, baik secara horizontal maupun vertikal. Adanya hiperbola ini tidak dapat dipastikan penyebabnya, diduga ada lubang yang menyebabkan material aspal bercampur dengan lapisan di bawahnya sehingga menimbulkan amplitudo tinggi karena adanya perbedaan konstanta dielektrik antar material. Meskipun telah dilakukan perbaikan, adanya pencampuran material tersebut masih dapat terekam oleh GPR karena perbaikan dilakukan langsung dengan menambah lapisan yang rusak (aspal).

Pada lintasan 1.1 juga terlihat adanya refleksi yang tidak menerus (diskontinuitas) hingga kedalaman 40 cm yang diduga akibat kerusakan alur (*rutting*). *Rutting* adalah kerusakan bekas roda memanjang yang terjadi pada lintasan kendaraan sejajar dengan sumbu jalan akibat tambahan pemadatan oleh beban lalu lintas (Direktorat Jenderal Bina Marga, 1983). *Rutting* ini dapat dilihat pada tiga titik yang ditunjukkan pada Gambar 8 lintasan 1.1 yaitu jarak lintasan ke-0 – 0,6 m; 1,8 m; dan 2,8 – 3,3 m. Berdasarkan pengamatan di lapangan (Gambar 9), *rutting* memanjang hingga lintasan 1.7. Selain *rutting* dan kerusakan pada jarak lintasan 5,5 – 6,5 m, terdapat retakan pada jarak lintasan 6,8 m.



Gambar 9. Kerusakan *Rutting* dan Retakan di Lapangan

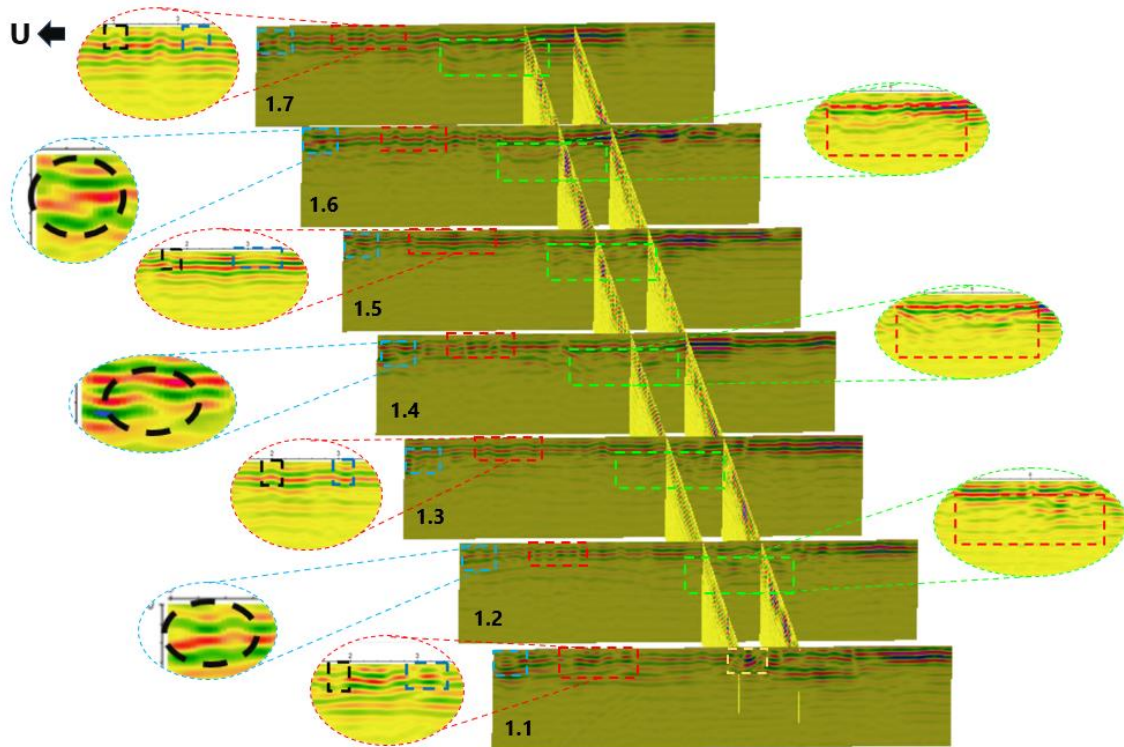
Lintasan 1.2 juga memiliki arah Utara-Selatan (melintang) dengan panjang 11 m seperti lintasan 1.1. Pada lintasan ini ditemukan ketidakmenerusan pola refleksi pada jarak lintasan ke-0 – 0,6 m; 1,7 m; dan 2,9 – 3,2 m. Radargram yang tidak menerus ini diduga disebabkan oleh kerusakan *rutting* yang memanjang dari lintasan 1.1. Berdasarkan kedalaman data hasil pengolahan, kerusakan *rutting* ini hingga kedalaman 40 cm. Selain itu, pada lintasan ini ditemukan adanya ketidakberaturan pola refleksi pada jarak lintasan 4,5 – 7,5 m dengan kedalaman 0,6 – 1,4 m (Gambar 8 bagian kotak hitam). Hal tersebut mengindikasikan bahwa material yang seharusnya menempati lapisan tersebut telah mengalami distorsi. Distorsi adalah kerusakan jalan berupa perubahan bentuk material yang dapat terjadi akibat tanah dasar yang melemah, kurangnya pemadatan pada lapisan fondasi, dan beban berlebihan yang ditanggung oleh jalan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 1983). Dalam radargram, distorsi ditandai dengan adanya sinyal yang acak (menerus tapi tidak lurus horizontal). Selain distorsi, juga ditemukan beberapa pola refleksi tidak menerus yang diidentifikasi sebagai kerusakan retak pada jarak lintasan 6 m dan 8 m. Menurut Liu et al. (2022), ketidakmenerusan pola refleksi dapat diidentifikasi sebagai kerusakan retak (*crack*).

Pola refleksi tidak menerus yang diidentifikasi pada lintasan 1.1 dan 1.2 juga terdapat pada lintasan 1.3 – 1.7. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8 di bagian kotak hitam kecil pada jarak lintasan 1,8 – 2,2 m dan 2,8 – 3,4 m yang bervariasi setiap lintasan. Ketidakmenerusan pola refleksi ini juga diduga disebabkan kerusakan *rutting* karena kerusakan ini menerus sepanjang jalan dan melewati lintasan 1.1 – 1.7. Pada beberapa lintasan, ketidakmenerusan refleksi tidak terlihat jelas, tetapi masih dapat diidentifikasi dengan adanya tren pola refleksi hiperbola kecil yang mengalami pengaburan sinyal seperti pada lintasan 1.5 – 1.7.

Selain ketidakmenerusan, pada jarak lintasan 1,8 dan 2,8 m juga ditemukan pola refleksi yang acak yang diduga merupakan material yang mengalami distorsi pada jarak lintasan 4,5 – 7,5 m. Kedalaman pola tersebut bervariasi untuk setiap lintasan mulai dari 0,6 – 2 m. Kedalaman maksimal pada lintasan 1.3 mencapai 2 m, lintasan 1.4 mencapai 1,8 m, sedangkan untuk lintasan 1.5 – 1.7 hanya mencapai 1,6 m. Pada bagian tersebut, dapat dilihat bahwa ada tren menurun untuk refleksinya dan tidak menerus dengan pola sebelumnya (acak).

Untuk lintasan 1.3, 1.4, dan 1.5, juga diidentifikasi kerusakan retakan yang ditunjukkan ketidakmenerusan pola refleksi. Pada lintasan 1.3, retakan terjadi di jarak lintasan 6, 7, dan 8,2 m. Retakan pada lintasan 1.4 terjadi di jarak lintasan 4,5 m, sedangkan untuk lintasan 1.5 terjadi di jarak lintasan 6 dan 6,3 m.

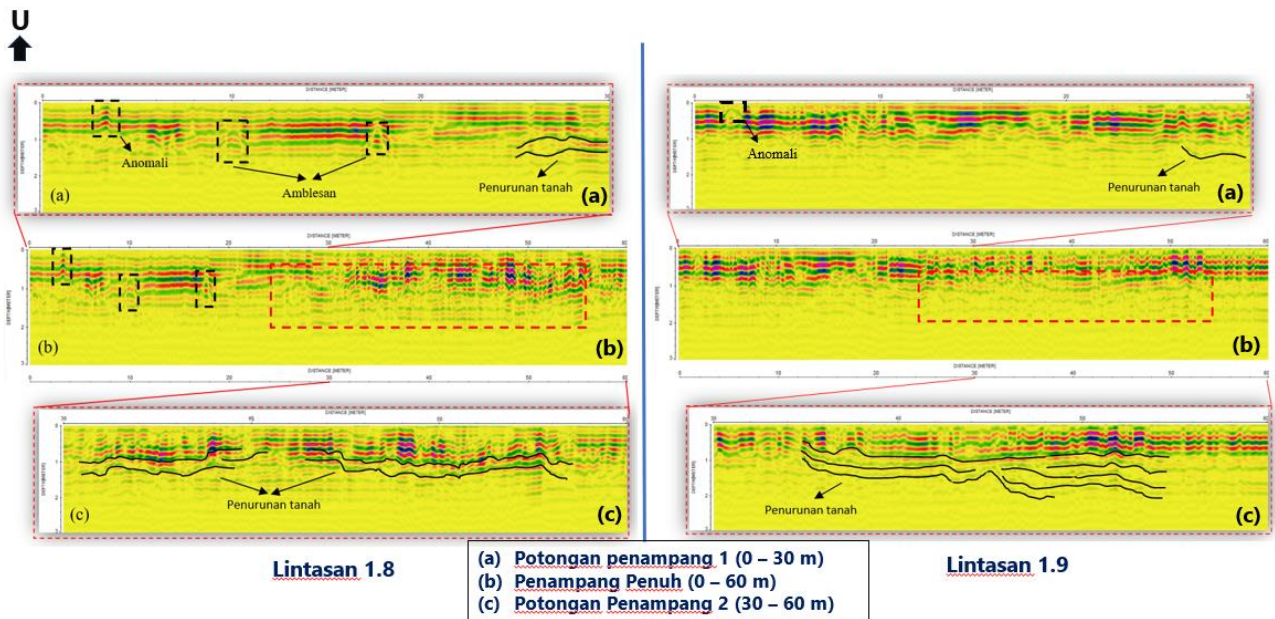
Letak kerusakan berdasarkan korelasi pada Gambar 8 menunjukkan bahwa kerusakan *rutting* baik *rutting* 1, 2, maupun 3 terjadi di lapisan aspal hingga agregat kelas A. Hanya di lintasan 1.3 dan 1.4 yang sedikit berbeda yaitu pada lapisan agregat kelas A dan B, tetapi posisinya tetap pada jarak lintasan yang sama sehingga diindikasikan penyebab kerusakannya masih sama yaitu *rutting*. Agregat adalah hasil dari pecahan batu alam yang digunakan dalam campuran perkerasan. Perbedaan agregat kelas A dan B terletak pada perbedaan ukuran butiran mineral batuan yang dapat diketahui dari persen berat butiran yang lolos pada saat gradasi. Agregat kelas A memiliki ukuran gradasi butiran yang lebih kecil dibandingkan agregat kelas B (Kementerian PUPR, 2004). Untuk distorsi, sebagian besar mulai terjadi pada lapisan agregat kelas B hingga ke tanah aslinya. Beberapa keretakan juga terjadi di jarak lintasan yang dekat dengan distorsi. Semua keretakan yang teridentifikasi terjadi di lapisan aspal berdasarkan korelasi dengan hasil tes pit.



Gambar 10. Visualisasi Radargram GPR dalam Model Penampang 2,5D

Pada Gambar 10 disajikan visualisasi radargram GPR dalam bentuk 2,5D untuk melihat kemenerusan kerusakan. Dari pemodelan tersebut, dapat dilihat bahwa kerusakan jalan akibat *rutting* memanjang dari lintasan 1.1 – 1.7 di jarak lintasan awal yaitu 0 – 0,5 m. Kemenerusan kerusakan *rutting* juga terjadi pada jarak lintasan 1 – 2 m dan 3 m. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan yang terlihat di permukaan dapat terekam oleh alat GPR. Untuk *rutting*, karena kerusakannya menyebabkan permukaan yang mengalami *rutting* tidak rata, hasil pada radargram menunjukkan refleksi bergelombang dengan jarak tertentu. Selain *rutting*, juga terjadi kemenerusan kerusakan di kedalaman 0,4 - 2 m yang diduga terjadi distorsi material pada jarak lintasan 5 – 7 m. Kerusakan tersebut tepat di bawah bagian jalan yang retak dan menurun ke arah sungai meskipun telah dilakukan penebalan aspal beberapa kali. Kerusakan retakan sendiri di beberapa lintasan terlihat dengan bentuk refleksi yang tidak menerus. Pada lintasan yang tidak terlihat pola refleksi retakan, diduga akibat dimensi retakannya terlalu kecil atau telah tertutup setelah dilakukan penambalan aspal (*overlay*).

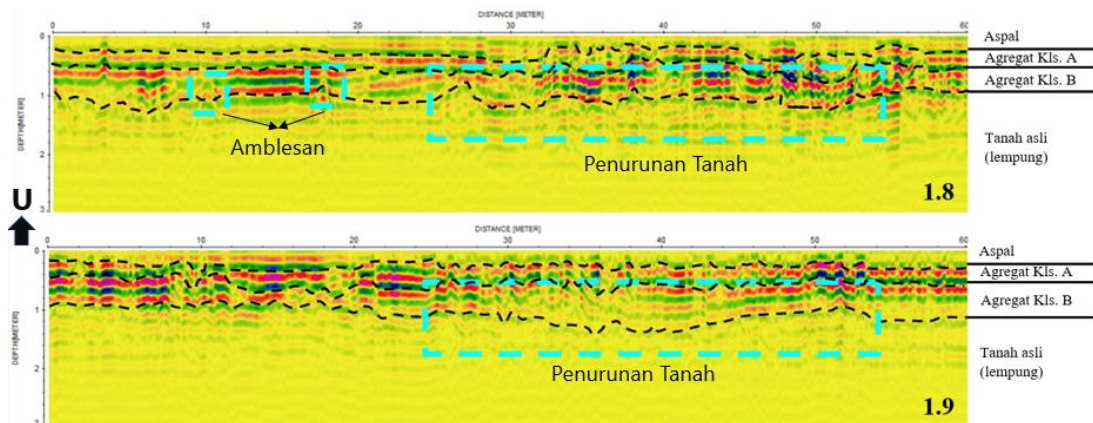
Untuk lapisan 1.8 dan 1.9, pada masing-masing lintasan dibagi menjadi dua penampang yang memiliki panjang 30 cm. Radargram yang terlalu panjang memiliki kumpulan refleksi yang terlalu rapat sehingga kurang dapat dilihat secara detail. Oleh karena itu, dilakukan pemotongan dan pembagian menjadi dua penampang agar dapat melihat dan menginterpretasi hasil pengolahan dengan lebih jelas yang dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Interpretasi Kerusakan pada Lintasan GPR 1.8 dan 1.9

Pada Gambar 11, disajikan lintasan 1.8 GPR yang dibagi menjadi dua bagian, 0 – 30 m dan 30 – 60 m. Dari gambar lintasan penuh 60 m, terlihat setelah jarak lintasan 20 m (seperti pada jarak 30 – 40 m dan 40 – 50 m) pola refleksi GPR menjadi lebih acak daripada sebelumnya yang berbentuk horizontal lurus. Pada meter ke-10 dan 18 di kedalaman 0,8 – 1,4 m, terdapat ketidakmenerusan refleksi yang sekilas seperti berbentuk hiperbola yang diduga merupakan kerusakan retakan.

Berbeda dengan lintasan 1.8, pada lintasan 1.9 (Gambar 11) meter ke-10 dan 18 tidak ditemukan adanya retakan. Akan tetapi, pada jarak lintasan setelah 20 meter sama terlihat adanya pergerakan tanah yang cenderung turun. Penurunan ini terlihat jelas di meter ke-35 hingga 52. Terlihatnya penurunan refleksi pada meter 30 – 50 di kedua lintasan GPR memanjang tersebut, memvalidasi adanya pergerakan tanah dengan arah cenderung turun pada bagian badan mendekati bahu jalan (antara meter ke-6 – 9 lintasan).



Gambar 12. Korelasi Lintasan GPR 1.8 dan 1.9 dengan Hasil Tes Pit

Dari hasil lintasan 1.8 dan 1.9, terlihat adanya penurunan di jarak lintasan 30 – 50 m. Penurunan ini terjadi di bagian material agregat kelas B berdasarkan Gambar 11 yang merupakan hasil interpretasi lintasan GPR 1.9 yang dikorelasikan dengan data tes pit. Akan tetapi, berdasarkan tren refleksi pada jarak lintasan tersebut penurunan sudah mulai terjadi pada kedalaman 0,6 m yang merupakan batas antara lapisan agregat kelas A dan kelas B, sehingga diduga material yang turun mulai dari agregat kelas A yang turun ke kelas B, kemudian kelas B turun hingga ke lapisan tanah asli (lempung). Pada Tabel 3 ditunjukkan perbandingan antara

kedalaman perencanaan dari lapisan struktur yang didapat dari tes pit (Satuan Kerja P2JN Jawa Tengah, 2022) dengan kedalaman lapisan struktur dari interpretasi radargram GPR. Data perencanaan yang digunakan merupakan hasil tes pit yang terdapat pada Gambar 12.

Tabel 3. Perbandingan Kedalaman Lapisan Struktur Jalan antara Data Perencanaan dan Kondisi Saat Pengukuran

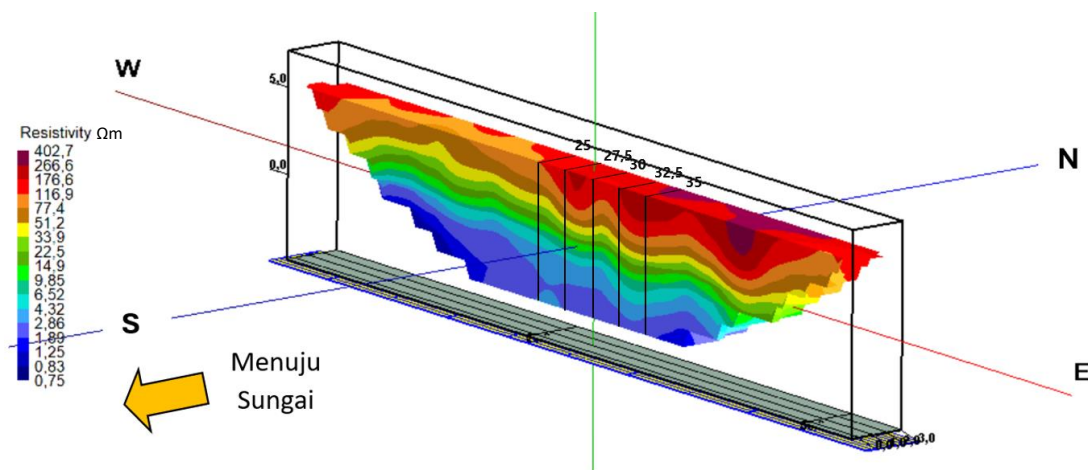
Lapisan Struktur	Kedalaman Perencanaan (cm)	Kedalaman pada Radargram GPR (cm)
Aspal (22 cm)	0 – 22	0 – 40
Agregat kelas A (20 cm)	22 – 42	40 – 80
Agregat kelas B (50 cm)	42 – 97	80 – 140

Berdasarkan identifikasi kerusakan dan korelasi dengan hasil tes pit pada lintasan GPR melintang (Gambar 10) dan memanjang (Gambar 12), disajikan jenis kerusakan dan letaknya pada Tabel 4. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa kerusakan di ruas Jalan Trengguli – Kudus terjadi pada semua struktur lapisannya.

Tabel 4. Jenis dan Letak Kerusakan pada Lintasan GPR

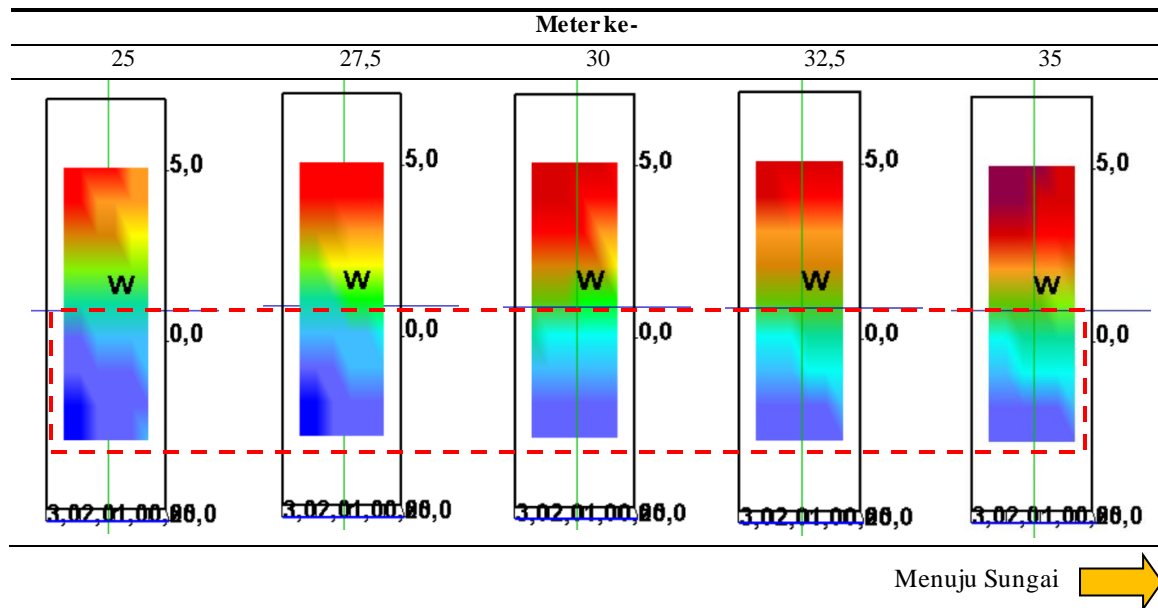
Jenis Kerusakan	Lapisan Letak Kerusakan
<i>Rutting</i> 1	Lapisan aspal - agregat kelas A
<i>Rutting</i> 2 & 3	Lapisan aspal - agregat kelas B
Distorsi	Lapisan agregat kelas B - tanah asli
Retak	Lapisan aspal - agregat kelas A
Penurunan (<i>settlement</i>)	Lapisan agregat kelas B - tanah asli
Amblesan	Lapisan agregat kelas B - tanah asli

Penampang radargram GPR lintasan 1.8 dan 1.9 dikorelasikan dengan penampang 3D resistivitas untuk melihat penurunan dan pergeseran material. Terlihatnya penurunan pada radargram GPR mendukung dugaan adanya pergerakan material ke arah lintasan GL2 yang turun hingga ke arah Sungai. Hal ini juga diperkuat dari sayatan hasil pemodelan 3D kedua lintasan resistivitas, GL1 dan GL2, berdasarkan posisi tanah asli (lempung). Hasil dari sayatan ini dapat dilihat pada Tabel 5 yang menunjukkan sayatan pada meter ke-25 – 35. Pemilihan kelima jarak lintasan tersebut untuk disayat didasarkan pada terlihatnya penurunan di penampang radargram GPR, terutama pada lintasan 1.9. Jarak lintasan setelahnya (35 – 55 m) meskipun pada beberapa bagian terlihat turun, sayatannya tidak terlihat secara utuh dan bagian lempung (kedalaman 6 m) yang seharusnya terlihat menurun ke arah sungai menjadi tidak terlihat karena bentuk penampang trapesium.



Gambar 13. Penampang 3D resistivitas

Tabel 5. Sayatan Penampang 3D Resistivitas



Bagian berwarna biru tosca hingga biru tua pada meter ke- 32,5 dan 35 (kotak merah garis putus-putus pada Tabel 4) yang diinterpretasikan sebagai litologi lempung terlihat turun dan miring ke arah kanan menuju sungai. Pergerakan ke arah sungai didukung dengan penelitian Kusuma (2024) yang menunjukkan adanya deformasi di jalur lambat dan terbentuknya bidang gelincir ke arah sungai di antara jalur lambat dan cepat pada ruas Jalan Trengguli Kudus. Penurunan material ini juga didukung dengan hasil perbandingan kedalaman struktur lapisan antara data perencanaan dan kondisi saat pengukuran yang menunjukkan penurunan pada Tabel 2.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Berdasarkan interpretasi dan analisis pembahasan terhadap hasil pengolahan penampang resistivitas 2D dan radargram GPR dalam mengevaluasi kerusakan jalan pada perkerasan aspal pada lokasi penelitian, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi lapisan bawah permukaan lokasi penelitian dari hasil resistivitas 2D yang dikorelasikan dengan data bor terdiri dari litologi pasir dan kerikil ($>88,9 \Omega\text{m}$), lanau kelempungan ($18,1 - 88,9 \Omega\text{m}$), lempung padat ($3,67 - 18,1 \Omega\text{m}$), dan lempung lunak ($<3,67 \Omega\text{m}$).
2. Jenis kerusakan yang terjadi berdasarkan analisis hasil GPR adalah sebagai berikut.
 - a. Berdasarkan penampang radargram GPR lintasan melintang, ditemukan kerusakan alur (*rutting*) pada tiga titik (jarak lintasan 0,2; 1,8; dan 3,3 m) pada lapisan aspal, retakan pada lapisan aspal hingga agregat kelas A, dan distorsi pada jarak lintasan 4,5 – 7,5 m dengan kedalaman yang bervariasi mulai dari 0,6 – 2 m pada lapisan agregat kelas B hingga tanah asli.
 - b. Berdasarkan penampang radargram GPR lintasan memanjang, ditemukan kerusakan retakan pada lapisan agregat kelas B dan penurunan tanah pada lapisan agregat kelas B hingga tanah asli.
 - c. Lintasan GPR 1.8 dan 1.9 menunjukkan adanya penurunan struktur lapisan jalan yang didukung dengan hasil sayatan penampang 3D resistivitas bagian lempung yang cenderung turun ke arah selatan sehingga diduga kuat adanya indikasi pergeseran dan penurunan tanah ke arah sungai.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (Satker P2JN) Wilayah III Provinsi Jawa Tengah yang telah memberikan izin untuk mengambil data di ruas Jalan Trengguli-Kudus KM 39+850. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Pak Akhdiat Fajar Wijaya Kusuma atas pendanaan yang telah diberikan dalam proses akuisisi data.

DAFTAR PUSTAKA

- Alsharahi, G., Faize, A., Maftai, C., & Driouach, A. (2019). GPR Application for Risks Detection in Subsurface Engineering Construction Projects. *Ovidius University Annals of Constanta - Series Civil Engineering*, 21(1), 51–58. <https://doi.org/10.2478/ouacsce-2019-0006>
- Anggraini, Y. I., Ismawati, L., & Falani, H. N. (2023). Pemanfaatan Teknologi Georadar Dalam Mendukung Kegiatan Eksplorasi Mineral Di Indonesia. *Jurnal Teknologi Sumberdaya Mineral (JENERAL)*, 4(1), 27. <https://doi.org/10.19184/jeneral.v4i1.35521>
- Ariputra, Y. F., Putra, Y. S., & Muhandi, M. (2021). Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Untuk Mengidentifikasi Lapisan Bawah Permukaan Jalan Rasau Jaya, Kabupaten Kubu Raya. *Journal Online of Physics*, 7(1), 47–51. <https://doi.org/10.22437/jop.v7i1.14632>
- Balai Perkerasan dan Lingkungan Jalan. (2021). *Laporan Tinjauan Lapangan Kerusakan Jalan pada Ruas Trengguli-Bts. Kab. Demak/Kudus dan Lingkar Sragen*.
- Kusuma, A. F. W. (2024). *Analisis Stabilitas Badan Jalan Akibat Pengaruh Fluktuasi Muka Air Sungai dan Curah Hujan (Studi Kasus : Ruas Jalan Trengguli – Kudus)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Liu, Z., Gu, X., Wu, W., Zou, X., Dong, Q., & Wang, L. (2022). GPR-based detection of internal cracks in asphalt pavement: A combination method of DeepAugment data and object detection. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 197(March). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111281>
- Loke, M. H. (1996). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, 2004 Revised Edition. *Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, July, 136.
- Marga, D. J. B. (1983). *Manual Pemeliharaan Jalan Nomor 03/MN/B/1983*.
- Solla, M., Lagüela, S., González-Jorge, H., & Arias, P. (2014). Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings. *NDT and E International*, 62, 55–65.
- Solla, M., Pérez-Gracia, V., & Fontul, S. (2021). Review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices. *Remote Sensing*, 13(4), 1–5. <https://doi.org/10.3390/rs13040672>
- Telford, W. M. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Tengah, S. P. P. J. (2022). *Laporan Penyelidikan Tanah*.
- Viki, Azwar, A., Arman, Y., & Perdhana, R. (2022). Pendugaan Penyebab Keretakan Jalan di Desa Serindang Berdasarkan Interpretasi Data Geolistrik. *Kumparan Fisika*, 5(3), 201–210. https://ejournal.unib.ac.id/index.php/kumparan_fisika
- Widayanti, T. D. (2020). *Identifikasi Objek Bawah Permukaan Untuk Fondasi Jalan Tol di Jakarta Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) pada Segmen Area Y*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.