

**IDENTIFIKASI POLA RETAKAN BETON DI DERMAGA
PELINDO, LAMPUNG MENGGUNAKAN METODE *GROUND
PENETRATING RADAR* (GPR)**

(Skripsi)

Oleh

**ANNUR ISTIKOMAH
1915051030**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**IDENTIFIKASI POLA RETAKAN BETON DI DERMAGA
PELINDO, LAMPUNG MENGGUNAKAN METODE *GROUND
PENETRATING RADAR (GPR)***

Oleh

ANNUR ISTIKOMAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

IDENTIFIKASI POLA RETAKAN BETON DI DERMAGA PELINDO, LAMPUNG MENGGUNAKAN METODE *GROUND PENETRATING RADAR (GPR)*

Oleh

ANNUR ISTIKOMAH

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan salah satu metode geofisika non-destruktif yang digunakan untuk mendeteksi kondisi internal beton bertulang. Penelitian ini dilakukan di Dermaga Pelindo Panjang, Lampung, dengan menggunakan alat AKULA 9000C berfrekuensi 1 Ghz. Data akuisisi diolah menggunakan software ReflexW sebanyak 15 lintasan. Tujuan utama penelitian ini yaitu untuk mengidentifikasi retakan beton, deformasi, dan juga korosi tulangan beton melalui analisis amplitudo radargram. Berdasarkan hasil pengolahan dan interpretasi data *Ground Penetrating Radar (GPR)*, teridentifikasi adanya kerusakan internal pada struktur beton. Indikasi retakan ditemukan pada kedalaman 0–1,5 meter pada bagian pelat atau balok atas, ditunjukkan oleh refleksi radar yang tidak kontinu dengan perubahan amplitudo $\pm 30\text{--}60\%$. Deformasi beton terdeteksi pada kedalaman 0,5–1,5 meter yang ditandai oleh distorsi pola refleksi radar. Selain itu, indikasi korosi tulangan teridentifikasi pada zona tulangan balok atau kolom bawah pada kedalaman 0,6–1,6 meter, dengan perubahan amplitudo tidak seragam sebesar $\pm 20\text{--}50\%$. Kondisi ini diduga berkaitan dengan masuknya air dan zat agresif melalui retakan beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode GPR efektif dalam mengidentifikasi retakan, deformasi, dan potensi korosi tulangan secara non-destruktif.

Kata kunci: *ground penetrating radar (GPR)*, analisis amplitudo, beton bertulang, kerusakan struktural, metode non-destruktif.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF CONCRETE CRACK PATTERNS AT THE PELINDO PIER, LAMPUNG USING THE GROUND PENETRATING RADAR (GPR) METHOD

By

ANNUR ISTIKOMAH

Ground Penetrating Radar (GPR) is a non-destructive geophysical method used to detect the internal condition of reinforced concrete. This study was conducted at Pelindo Panjang Pier, Lampung, using a 1 GHz AKULA 9000C device. The acquired data was processed using ReflexW software for 15 traverses. The main objective of this study was to identify concrete cracks, deformations, and corrosion of concrete reinforcement through radargram amplitude analysis. Based on the results of processing and interpreting Ground Penetrating Radar (GPR) data, internal damage to the concrete structure was identified. Indications of cracks were found at a depth of 0–1.5 meters in the slab or upper beam, as indicated by discontinuous radar reflections with amplitude changes of ± 30 –60%. Concrete deformation was detected at a depth of 0.5–1.5 meters, marked by distortion of the radar reflection pattern. In addition, indications of reinforcement corrosion were identified in the lower beam or column reinforcement zone at a depth of 0.6–1.6 meters, with uneven amplitude changes of ± 20 –50%. This condition is thought to be related to the ingress of water and aggressive substances through concrete cracks. The results of the study show that the GPR method is effective in non-destructively identifying cracks, deformation, and potential reinforcement corrosion.

Key words: ground penetrating radar (GPR), amplitude analysis, reinforced concrete, structural damage, non-destructive methods.

Judul Skripsi

: **IDENTIFIKASI POLA RETAKAN
BETON DI DERMAGA PELINDO,
LAMPUNG MENGGUNAKAN
METODE GROUND PENETRATING
RADAR (GPR)**

Nama Mahasiswa

: **Annur Istikomah**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **1915051030**

Program Studi

: **Teknik Geofisika**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

**Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si, M.Si,
C.EIA., IPM.**

NIP. 197307162000121002

**Kristianto Usman, S.T., M.T.,
Ph.D**

197205132003121002

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si, M.Si, C.EIA., IPM.

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si, M.Si., C.EIA., IPM.

Sekretaris

Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D.

Anggota

Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU.

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 3 Februari 2026

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam Daftar Pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar lampung, 6 Februari 2026

Penulis



Annur Istikomah
NPM.1015051030

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Yudha Karya Jitu pada tanggal 23 November 2000 sebagai anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan Sekolah Dasar di selesaikan pada tahun 2013, pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 02 Rawajitu Timur dan diselesaikan pada tahun 2016. Pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Kotagajah dan diselesaikan pada tahun 2019. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang

yang lebih tinggi yaitu dengan menempuh Perguruan Tinggi Negeri di Universitas Lampung di Jurusan Teknik Geofisika dan diselesaikan pada tahun 2026.

Selama masa kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi kampus dan luar kampus. Penulis menjadi anggota bidang Kaderisasi di Hima TG Bhuwana selama 2 periode. Pada periode ke-2 di Hima TG Bhuwana penulis berkesempatan menjadi koordinator Sie Konsumsi dalam salah satu kegiatan nasional yaitu *Geophysics Whiz Event and Seminar (GWES)*. Selain itu juga penulis aktif dalam organisasi BEM FT dan berkesempatan menjadi sekretaris pelaksana kegiatan PKKMB FT tahun 2021. Kemudian penulis juga menjadi anggota aktif Fossi FT selama 2 periode di departemen Kajian Syiar. Serta untuk kegiatan luar kampus penulis aktif dalam organisasi SM-IAGI (Seksi Mahasiswa Ikatan Ahli Geologi Indonesia) sebagai Sekretaris Umum selama satu periode. Pada semester 6 penulis melakukan Kerja Praktik di PSDMBP (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi) Bandung, dan pada masa akhir studi penulis melakukan penelitian di Kampus dengan judul “Identifikasi Pola Retakan Beton di Dermaga Pelindo, Lampung Menggunakan Metode GPR (*Ground Penetrating Radar*)”.

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, skripsi ini dipersembahkan kepada

ALLAH SWT

Dan

Nabi Muhammad SAW

Skripsi ini penulis persembahkan kepada Nenek tercinta, satu-satunya orang tua yang selalu menemani hingga akhir, yang dengan doa, kasih, dan keteguhan hati senantiasa menjadi sumber kekuatan. Karya ini bukan sekedar rangkaian tulisan dan penelitian, melainkan jejak perjalanan panjang yang penuh usaha, doa, dan juga pengorbanan. Skripsi ini adalah saksi dari setiap langkah yang tertatih, setiap doa yang terucap dalam hening, dan setiap harapan yang tumbuh di tengah kesabaran.

Penulis juga mempersembahkan karya ini kepada Pakde, Bude, Bibi, dan Kakak yang telah memberikan doa, dukungan, serta semangat dalam setiap proses perjalanan akademik ini.

Dan akhirnya, skripsi ini penulis persembahkan untuk diri sendiri, untuk jiwa yang telah bertahan dalam proses panjang, untuk hati yang tak pernah menyerah meski langkah terasa sangat berat. Untuk jiwa yang telah hebat karena memilih bertahan hingga akhir, menjadikan setiap luka sebagai pelajaran, setiap doa sebagai kekuatan, dan setiap usaha sebagai bukti bahwa mimpi bisa digenggam. Semoga karya ini menjadi pengingat bahwa keteguhan hati adalah kemenangan terbesar.

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2019

Terima kasih atas semua bantuan kebaikan, pengalaman dan semua kenangan yang telah diukir bersama.

MOTTO HIDUP

Aku tidak diciptakan untuk menyerah, melainkan untuk tegak dengan derajat yang tinggi.

(QS. Al-Imran : 139)

Fearless is not the absence of fear. It's not being completely unfraid. Fearless is living in spite of those things that scare you.

(Taylor Swift)

Aku tiba di titik ini bukan karena kebetulan, melainkan karena layak. Serta setiap doa dan bangga yang hadir, menjadi tanda bahwa aku tak pernah bisa di remehkan.

(Annur Istikomah)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat, rahmat, dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“IDENTIFIKASI POLA RETAKAN BETON DI DERMAGA PELINDO, LAMPUNG MENGGUNAKAN METODE *GROUND PENETRATING RADAR (GPR)*”**. Skripsi ini dibuat dalam rangka memenuhi syarat gelar sarjana teknik di Program Studi Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini tentunya masih banyak kekurangan, sehingga sangat diharapkan kritik serta saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca, baik itu kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 6 Februari 2026
Penulis,

Annur Istikomah
NPM. 1915051030

SANWACANA

Puji dan syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat, hidayah dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul **“Identifikasi Pola Retakan Beton Di Dermaga Pelindo, Lampung Menggunakan Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR)”**. Tak lupa pula shalawat serta salam yang selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad Shallallahu ‘Alaihi Wasallam yang selalu menjadi suri tauladan bagi kita semua. Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak, serta pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Dr.Hi.Ahmad Herison, S.T.,M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM. selaku Ketua Jurusan dan Pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta yang telah sabar dan penuh perhatian membimbing penulis sehingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
3. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan arahan serta semangat dan dorongan tanpa pernah menghakimi, menjadi kekuatan tersendiri bagi penulis dalam melewati setiap tahap penyusunan skripsi ini.
4. Prof. Dr. Ir. Sarkowi, S.Si.,M.Si., IPU selaku Dosen Penguji yang telah memberikan arahan, masukan, serta penilaian dengan penuh kebijaksanaan. Semangat, dan sikap beliau yang penuh pengertian telah menjadi motivasi tersendiri bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan lebih baik.

5. Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah meluangkan waktu dan selalu membantu penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Seluruh Dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung atas ilmu dan bekal masa depan yang akan senantiasa bermanfaat untuk penulis. Semoga menjadi amal jariah untuk Bapak dan Ibu sekalian.
7. Teruntuk *mbah* tercinta, yang telah menjadi sosok paling berharga dalam hidup penulis. Segala doa, usaha, dan pengorbanan beliau adalah alasan penulis dapat berdiri di titik ini.
8. Kakak dan Ibu yang selalu memberikan semangat secara tidak langsung dan juga kebutuhan materi kepada penulis menjadi mahasiswa baru hingga menjalani perkuliahan.
9. Fatiha yang hadir menjadi sosok yang selalu ada, bukan hanya menemani, tapi juga menolong di saat paling penting. Tanpa kamu, perjalanan ini tak akan sampai di titik akhir.
10. Arina Khususna, sahabat yang sudah memberikan *support* penuh untuk penulis serta menjadi tempat keluh kesah semua masalah yang terjadi dengan penulis.
11. Ka Sebrina, selaku *best tutor GPR ever* yang selalu membantu penulis dalam melakukan penelitian.
12. Anggota Kunang-Kunang (Kuliah-Nangis), Aul, Upik, Niken, Jay, yang sudah menemani penulis dalam segala kondisi hingga sekarang.
13. Teruntuk sindy teman seperjuangan di masa-masa akhir penelitian sekaligus *best Ojek* pribadi yang menemani menjelajahi Bandar Lampung.
14. Manusia penyuka *Paul Partohap songs* yang sudah memberikan tempat untuk berkeluh kesah dan selalu memberikan semangat melalui kata “gimana skripsinya”.
15. Rina yang selalu menemani penulis dalam menyelesaikan tahap akhir, dan *full support*.
16. Angkatan 19 “*Makkou Tanding*” yang selalu ada dan siap selalu memberikan dukungan serta doa kepada penulis sekaligus menemani penulis semasa kuliah dari maba hingga sekarang bahkan nanti.

17. *Last but not least*, kepada semua pihak yang telah terlibat dalam kehidupan penulis, yang telah memberikan dukungan paling tidak memiliki pengaruh terhadap penulis hingga mampu berada di titik ini.

Demikian Tugas Akhir ini telah diselesaikan dengan baik, harapan penulis agar karya ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Dalam penulisan karya ini mungkin masih terdapat kekurangan sehingga sangat diharapkan saran dan kritik yang membangun untuk menjadi lebih baik.

Bandar Lampung, 6 Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
MOTTO HIDUP.....	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA.....	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL.....	xxi
I. PENDAHULUAN.....	23
1.1 Latar Belakang	23
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2 Geologi Regional	5
2.3 Stratigrafi.....	6
2.4 Penelitian Terdahulu	9

2.5 Sampling Interval (t)	11
2.6 Retak Pada Beton	11
2.7 Kuat Tekan Beton	16
III. TEORI DASAR	18
3.1 Metode <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR).....	18
3.2 Prinsip dasar Metode GPR	19
3.3 Persamaan Dasar Metode GPR.....	21
3.3.1 Persamaan Maxwell	21
3.3.2 Koefisien Refleksi Gelombang Elektromagnetik.....	22
3.3.3 Parameter Fisis Batuan	23
3.3.4 Perambatan Gelombang	24
3.4 <i>Skin Depth</i>	26
3.5 Pengolahan data GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	28
3.6 Beton (<i>concrete</i>)	30
3.7 <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR) Pada Kontruksi Maritim.....	31
IV. METODE PENELITIAN	26
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian	26
4.2 Alat dan Bahan.....	26
4.3 Tahapan Penelitian	36
4.3.1 Studi Literatur	36
4.3.2 Pengolahan Data	36
4.4 Interpretasi.....	41
4.5 Diagram Alir	43
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
5.1 Data Pengamatan	44
5.2 Interpretasi Data.....	45
5.2.1 Lintasan 1 (D2-1A dan D2-1B)	46
5.2.2 Lintasan 2 (D2-2).....	51
5.2.3 Lintasan 3 (D2-3).....	54
5.2.4 Lintasan 4 (D2-4).....	59
5.2.5 Lintasan 5 (D2-5X)	62
5.2.6 Lintasan 6 (D2-6X)	64
5.2.7 Lintasan 7 (D2-7X)	66

5.2.8 Lintasan 8 (D2-8X)	67
5.2.9 Lintasan 9 (D2-9X)	69
5.2.10 Lintasan 10 (D13-1)	71
5.2.11 Lintasan 11 (D13-2)	75
5.2.12 Lintasan 12 (D13-3x)	78
5.2.13 Lintasan 13 (D13-4x)	81
5.2.14 Lintasan 14 (D13-5x)	82
5.2.15 Lintasan 15 (D13-6x)	85
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	88
6.1 Kesimpulan	88
6.2 Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	90

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian.....	4
Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian	5
Gambar 3. Stratigrafi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993)	7
Gambar 4. Retak akibat pengaruh <i>drying shrinkage</i> (ACI, 2008).	12
Gambar 5. Diagram jenis retak beton (Lani Djakranata, 2021).....	13
Gambar 6. Retak lentur	14
Gambar 7. Retak geser web	14
Gambar 8. Retak geser lentur.....	14
Gambar 9. Retak puntir.....	15
Gambar 10. Retak lekatan.....	15
Gambar 11. Skema pengambilan data GPR (Reynolds, 2011).	19
Gambar 12. Diagram kerja GPR (Arisona, 2009).....	20
Gambar 13. Perambatan gelombang elektromagnet (Supriyanto, 2007).	24
Gambar 14. <i>Dewow filtering</i> pada <i>trace</i> data GPR (Jol, 2008).	29
Gambar 15. Perbandingan antara pelat beton bertulang yang sehat (a) dan pelat yang rusak (b) (Solla dkk., 2024).	33
Gambar 16. Raw data lintasan (kiri) dan sesudah dilakukan <i>static correction</i> (kanan)....	36
Gambar 17. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses <i>subtract mean (dewow)</i> (kanan)	37
Gambar 18. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses <i>gain</i> (kanan).....	38
Gambar 19. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses <i>background removal</i> (kanan)...	38
Gambar 20. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses <i>bandpass frequency</i> (kanan) ...	39
Gambar 21. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses <i>fk-filter</i> (kanan).....	40
Gambar 22. Tampilan sebelum dilakukan <i>time depth conversion</i>	40
Gambar 23. Tampilan setelah dilakukan <i>time depth conversion</i>	41

Gambar 24. Diagram alir	43
Gambar 25. Peta akuisisi dermaga D1 dan D3	44
Gambar 26. Peta akuisisi dermaga D2	45
Gambar 27. Lintasan 1 (D2-1 jarak 0-213,53 meter).....	47
Gambar 28. Lintasan 1 (D2-1 jarak 30-45 meter).....	47
Gambar 29. Lintasan 1 (D2-1 jarak 75-95 meter).....	49
Gambar 30. Lintasan 1 (D2-1 jarak 140-160 meter).....	50
Gambar 31. Lintasan 2 (D2-2 jarak 0-165,4 meter).....	52
Gambar 32. Lintasan 2 (D2-2 jarak 114-121 meter).....	52
Gambar 33. Lintasan 3 (D2-3 jarak 0-293 meter).....	54
Gambar 34. Lintasan 3 (D2-3 jarak 42-47 meter).....	55
Gambar 35. Lintasan 3 (D2-3 jarak 80-85 meter).....	56
Gambar 36. Lintasan 3 (D2-3 jarak 100-105 meter).....	57
Gambar 37. Lintasan 4 (D2-4 jarak 0-293 meter).....	59
Gambar 38. Lintasan 4 (D2-4 jarak 69-74 meter).....	60
Gambar 39. Lintasan 4 (D2-4 jarak 86-91 meter).....	61
Gambar 40. Lintasan 5 (D2-5x jarak 0-42meter).....	63
Gambar 41. Lintasan 6 (D2-5x jarak 28-35 meter).....	63
Gambar 42. Lintasan 6 (D2-6x jarak 0-22,8 meter).....	64
Gambar 43. Lintasan 6 (D2-6x jarak 17-22,8 meter).....	65
Gambar 44. Lintasan 7 (D2-7x jarak 0-22,8 meter).....	66
Gambar 45. Lintasan 7 (D2-7x jarak 0-5,5 meter).....	67
Gambar 46. Lintasan 8 (D2-8x jarak 0-46,5 meter).....	68
Gambar 47. Lintasan 8 (D2-8x jarak 31-38 meter).....	68
Gambar 48. Lintasan 9 (D2-9x jarak 0-46,5 meter).....	70
Gambar 49. Lintasan 9 (D2-9x jarak 0-7,5 meter).....	70
Gambar 50. Lintasan 10 (D13-1 jarak 0-352 meter).....	72
Gambar 51. Lintasan 10 (D13-1 jarak 131-142 meter).....	72
Gambar 52. Lintasan 10 (D13-1 jarak 170-181 meter).....	74
Gambar 53. Lintasan 11 (D13-2 jarak 0-211 meter).....	75
Gambar 54. Lintasan 11 (D13-2 jarak 122-131 meter).....	76
Gambar 55. Lintasan 11 (D13-2 jarak 168-177 meter).....	77
Gambar 56. Lintasan 12 (D13-3x jarak 0-38 meter).....	79
Gambar 57. Lintasan 12 (D13-3x jarak 11-17,5 meter).....	79
Gambar 58. Lintasan 13 (D13-4x jarak 0-39 meter).....	81

Gambar 59. Lintasan 13 (D13-4x jarak 11-19 meter).....	81
Gambar 60. Lintasan 14 (D13-5x jarak 0-35 meter).....	83
Gambar 61. Lintasan 14 (D13-5x jarak 9-16,8 meter).....	83
Gambar 62. Lintasan 15 (D13-6x jarak 0-37 meter).....	85
Gambar 63. Lintasan 15 (D13-6x jarak 24-30 meter).....	85

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Tabel konstanta dielektrik relatif dan kecepatan gelombang elektromagnetik (Reynolds, 2011).	25
Tabel 2. Besaran frekuensi dan penetrasi (Lehman dan Green, 1999).	27
Tabel 3. Ketentuan berat jenis beton (Tjokrodinulyo, 2007).	31
Tabel 4. <i>Time schedule</i> penelitian	35
Tabel 5. Interpretasi lintasan 1 (Jarak 30-45 meter)	48
Tabel 6. Interpretasi lintasan 1 (Jarak 75-95 meter)	50
Tabel 7. Interpretasi lintasan 1 (Jarak 140-160 meter)	51
Tabel 8. Interpretasi lintasan 2 (Jarak 114-121 meter)	53
Tabel 9. Interpretasi lintasan 3 (Jarak 42-47 meter)	56
Tabel 10. Interpretasi lintasan 3 (Jarak 80-85 meter)	57
Tabel 11. Interpretasi lintasan 3 (Jarak 100-105 meter)	58
Tabel 12. Interpretasi lintasan 4 (Jarak 69-74 meter)	61
Tabel 13. Interpretasi lintasan 4 (Jarak 86-91 meter)	62
Tabel 14. Interpretasi lintasan 5 (Jarak 28-35 meter)	64
Tabel 15. Interpretasi lintasan 6 (Jarak 17-22,8 meter)	66
Tabel 16. Interpretasi lintasan 7 (Jarak 0-5,5 meter)	67
Tabel 17. Interpretasi lintasan 8 (Jarak 31-38 meter)	69
Tabel 18. Interpretasi lintasan 9 (Jarak 0-7,5 meter)	71
Tabel 19. Interpretasi lintasan 10 (Jarak 131-142 meter)	73
Tabel 20. Interpretasi lintasan 10 (Jarak 170-181 meter)	74
Tabel 21. Interpretasi lintasan 11 (Jarak 122-131 meter)	77
Tabel 22. Interpretasi lintasan 11 (Jarak 122-131 meter)	78
Tabel 23. Interpretasi lintasan 12 (Jarak 11-17,5 meter)	80

Tabel 24. Interpretasi lintasan 13 (Jarak 11-19 meter)	82
Tabel 25. Interpretasi lintasan 14 (Jarak 9-16,8 meter)	84
Tabel 26. Interpretasi lintasan 15 (Jarak 24-30 meter)	86

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wilayah maritim Indonesia merupakan kawasan strategis dengan berbagai keunggulan komparatif dan kompetitif yang dimilikinya sehingga berpotensi menjadi penggerak utama pengembangan wilayah nasional. Indonesia merupakan suatu negara kepulauan yang pada hakikatnya memerlukan infrastruktur transportasi maritim yaitu pelabuhan yang berkembang dengan baik dan dikelola secara efisien.

Sebagai negara kepulauan pelabuhan memiliki arti penting bagi Indonesia karena mendukung keberlangsungan system transportasi laut yang merupakan system transportasi paling besar di Indonesia. Serta juga peran pelabuhan sangat penting untuk perkembangan sosial dan juga ekonomi di suatu daerah yang mana pelabuhan merupakan pusat segala kegiatan pelayanan pelayaran yaitu pelayanan kapal dan juga muatannya yang terdiri dari penumpang, barang dan lain-lain.

PT. Pelabuhan Indonesia II (Persero) Cabang Panjang atau sering disebut dengan Pelabuhan Panjang merupakan BUMN yang bergerak di bidang usaha pelayanan jasa kepelabuhan dan sebagai pendukung utama transportasi laut yang secara langsung maupun tidak langsung berperan aktif dalam pembangunan ekonomi Provinsi Lampung. Permasalahan yang dihadapi oleh struktur bangunan suatu dermaga yaitu masalah degradasi material beton dermaga dan fasilitas penunjangnya seperti struktur *pipe rack*, *face fender* dan *breasting dolphin*. Secara visual struktur beton terlihat kasar dan kusam akibat terpapar bebas di lingkungan uap air laut. Kondisi beton yang kusam dan kasar mengindikasikan bahwasannya struktur beton telah mengalami degradasi

material (korosif) (Sulardi,2011).

Pada sebuah pembangunan infrastruktur penggunaan bahan material beton sering digunakan dikarenakan sifat beton yang lebih kuat dan juga tahan lama dibandingkan dengan material yang lain. Meskipun demikian kondisi material beton dapat mengalami penurunan fungsi struktural seiring dengan bertambahnya umur dan juga beban yang didukung oleh struktur beton tersebut. dalam bidang geofisika metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi struktur beton ialah metode *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan suatu metode survey geofisika yang memanfaatkan perambatan gelombang elektromagnetik. Metode GPR memanfaatkan analisa pantulan dari gelombang elektromagnetik yang dihasilkan dari perbedaan nilai konstanta dielektrik dari lapisan yang berada di bawah permukaan. Adapun penggunaan dari metode GPR ini antara lain untuk mendeteksi struktur bawah permukaan, penelitian arkeologi, dan penerapan dalam geoteknik mengenai struktur bangunan (Astutik, 2001).

Data GPR (radargram) menampilkan refleksi gelombang elektromagnetik terhadap kondisi di bawah permukaan bumi. Refleksi ditunjukkan oleh variasi warna yang merupakan kontras (perbedaan) nilai amplitudo gelombang di bawah permukaan. Nilai amplitudo dipengaruhi oleh nilai konduktivitas listrik material. Amplitudo tinggi ditandai dengan warna yang terang (putih). Amplitudo gelombang juga berkaitan dengan atenuasi (pelemahan) gelombang. Kecepatan rambat gelombang dipengaruhi oleh permitivitas relatif. Semakin besar nilai konstanta dielektrik maka kecepatan rambat gelombang akan semakin kecil (Luga, 2019).

Berdasarkan penelitian terdahulu dengan menggunakan metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) untuk penyelidikan pola retakan di Bendungan Batu Tegi, Lampung oleh Aji dkk (2016). Kemudian selanjutnya penelitian yang dilakukan Syamsurijal (2022) mengenai metode GPR yang dimanfaatkan untuk mengidentifikasi tiang pancang konstruksi bangunan. Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwasannya metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) dapat memberikan suatu informasi

mengenai gambaran kondisi lapisan bawah permukaan dan juga mengetahui pola retakan suatu bangunan dengan baik. Sehingga berdasarkan hasil penelitian ini akan memberikan informasi pendukung pada proses pembangunan suatu infrastruktur tersebut.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam pelaksanaan Penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat menentukan lokasi dan pola retakan pada struktur beton dermaga pelindo lampung menggunakan citra radargram GPR (*Ground Penetrating Radar*).
2. Dapat menganalisis deformasi dan degradasi struktur beton berdasarkan karakteristik gelombang refleksi dalam radargram.
3. Dapat mengidentifikasi potensi korosi pada tulangan beton melalui interpretasi anomali sinyal elektromagnetik dari citra radargram GPR (*Ground Penetrating Radar*).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu data penelitian yang digunakan merupakan data akuisisi *Ground Penetrating Radar* (GPR) di Dermaga D Pelabuhan Pelindo, Bandarlampung menggunakan AKULA 9000c dengan frekuensi 1 Ghz, yang selanjutnya dilakukan pengolahan untuk menghasilkan radargram 2D kemudian di interpretasi mengenai pola retakan, deformasi struktur, dan korosi tulangan beton yang muncul pada Pelabuhan Pelindo, Panjang, Bandarlampung.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian tugas akhir ini adalah dapat memberikan data dan interpretasi awal mengenai kondisi beton dermaga Pelindo Lampung yang dapat digunakan sebagai dasar dari perencanaan pemeliharaan atau rehabilitasi struktur.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

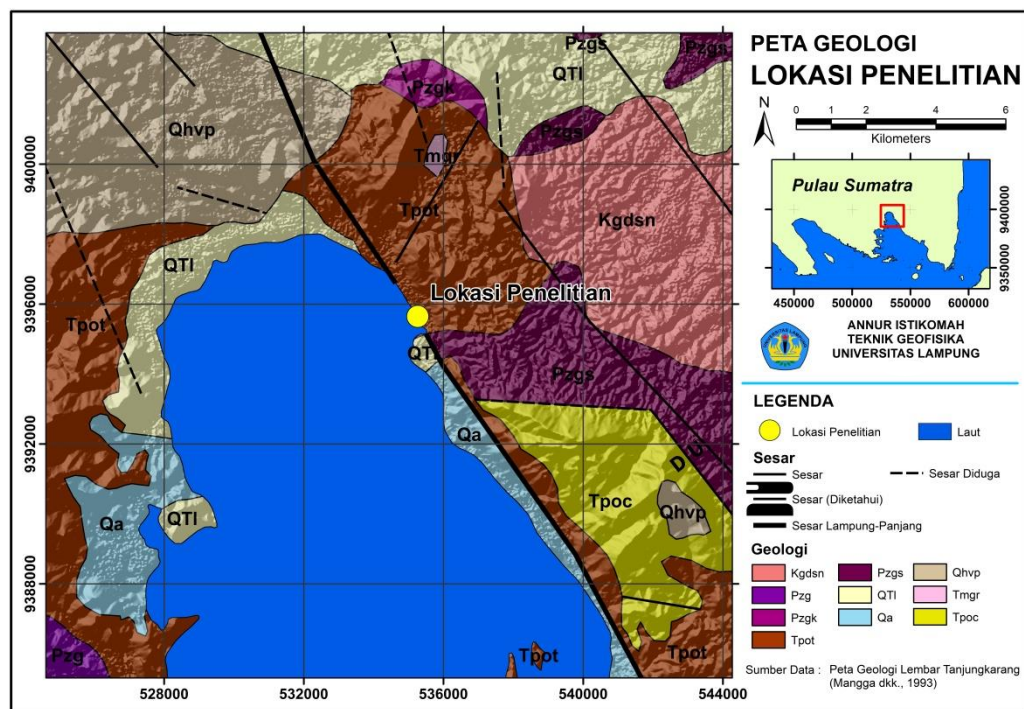
Lokasi daerah penelitian yang digunakan pada penelitian ini terletak di Dermaga “D” Pelabuhan Pelindo, Panjang, Bandarlampung. Pelabuhan ini merupakan salah satu pelabuhan besar di Indonesia, dan juga Pelabuhan ini sedang memperluas area dermaga dengan mereklamasi pantai serta revitalisasi jalur kereta api Pidada. Secara geografi daerah ini terletak pada koordinat $5^{\circ}28'02.2''\text{S}$ dan $105^{\circ}19'00.8''\text{E}$. Untuk peta lokasi daerah penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

2.2 Geologi Regional

Berdasarkan peta lembar Tanjung Karang, Pulau Sumatra merupakan hasil subduksi dari batas lempeng Samudera Hindia yang menunjam di bawah lempeng Benua Eurasia pada Masa Kenozoikum yang diperkirakan telah menyebabkan terjadinya rotasi dari Pulau Sumatra searah jarum jam (Hall,1997; Hall,2002; Hall,2014). Perubahan posisi Pulau Sumatra ini yang pada awalnya berarah barat-timur menjadi baratlaut-tenggara (Hamilton,1979). Perubahan deformasi Pulau Sumatra yang mengalami rotasi yaitu terjadi pada Kala Oligo-Miosen (Barber, 2005). Deformasi ini menyebabkan terjadinya pergerakan sesar Sumatera yang mulai aktif pada kala tersebut. Menurut (Barber., dkk 2005) struktur geologi yang terbentuk di Pulau Sumatra umumnya berupa sesar mendatar yang membentuk segmen sesar. Beberapa formasi yang menyusun Pulau Sumatra ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.Peta geologi daerah penelitian

Dari peta geologi daerah penelitian di atas, lokasi penelitian terletak pada formasi Tarahan (Tpot) yang tersusun oleh tuf padu, breksi dengan sisipan rijang. Sedangkan daerah sekitarnya terdiri dari beberapa formasi lainnya seperti Formasi Granodiorit (Kgdsn), Formasi paling tua yang merupakan

satuan batuan kompleks Gunung Kasih (Pzg) yang terdiri dari Kuarsit Sidodadi (Pzgk) berupa kuarsit dengan sisipan sekis-kuarsa serisit, kemudian ada Formasi Sekis Way Galih (Pzgs) yang tersusun oleh sekis amfibol hijau dan amfibolit orthogenes dioritan, Formasi Lampung (QTI) tersusun oleh tuf berbatuapung, tuf riolitik, tuf padu tufit, batulempung tufan, dan batupasir tufan. Aluvium (Qa) tersusun oleh kerakal, kerikil, pasir, lempung dan gambut. Endapan Gunungapi Muda Pesawaran (Qhvp) berupa lava (andesit-basal), breksi dan tuf, Batuan Granit tak terpisahkan (Tmgr) terdiri dari granit dan granodiorit, serta adanya Formasi Campang (Tpoc) yang mana bagian bawah terdiri dari perselingan batulempung, serpih dan tuf padu, bagian atas terdiri dari breksi aneka bahan dengan sisipan batupasir dan batulanau.

2.3 Stratigrafi

Stratigrafi regional merujuk pada lembar Tanjung Karang, Sumatra (Mangga dkk.,1993), urutan stratigrafi pada area penelitian terbagi atas beberapa bagian yaitu Batuan Pra-Tersier, Batuan Tersier, dan Batuan Kuarter.

Batuan Pra-Tersier pada Lembar Peta Geologi Tanjung Karang menjelaskan satuan batuan yang terbentuk merupakan satuan batuan malihan derajat rendah-sedang Kompleks Gunung Kasih (Pzg). Satuan batuan Kompleks Gunung Kasih (Pzg) diasumsikan bahwa penyebaran litologi ini cukup kompleks, dengan dugaan kuat oleh peneliti terdahulu bahwa satuan ini merupakan susunan dari batuan beku serta bagian dari sisa busur magmatik yang mengalami metamorfisme.

Batuan Tersier tersusun dari batuan yang berasal dari busur magmatic (gunungapi) dan sedimen yang terendapkan di tepi busur gunungapi, kemudian diendapkan bersama-sama secara luas, maka membentuk satuan Formasi Campang (Tpoc) dan Formasi Tarahan (Tpot) yang berumur Paleosen sampai Oligosen.

Batuan Kuarter yang mengalami aktivitas pembentukan mulai Plistosen sampai Holosen, maka menghasilkan satuan batuan beraneka ragam berupa batuan produk gunungapi, sedimen dan endapan permukaan. Pada masa Plistosen terjadi aktivitas vulkanik dan diendapkannya batuan piroklastik

secara luas membentuk satuan Formasi Lampung (Qtl). Pada masa Holosen terjadi pengendapan berupa alluvium dan sedikit endapan rawa (Mangga dkk., 1993). Berikut merupakan stratigrafi daerah penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Litologi	Zaman	Masa	Kala	Umur (Juta)
Qhvp	HOLOSEN HOLOCENE	Kuartar Quartary	KENOZOIKUM	— 1
Qa	PLISTOSEN PLEISTOCENE			— 2,6
QTI	PLOSEN PLIOCENE			— 5,3
Tmgr	Akhir Last	Tersier Tertiary		— 11,2
	Tengah Middle			— 17,1
	Awal Early			— 23,0
Tpoc	OLIGOSEN	Tersier Tertiary		— 33,9
	OLOGOCENE			— 56,0
	EOSEN EOCENE			— 66,0
	PALEOSEN PALEOCENE			— 92,3
Pzgs	Akhir Last	Kapur Cretaceous	MESOZOIKUM	— 113
	Tengah Middle			— 145
	Awal Early			— 201
JURA JURRASIC	— 252			
Pzgs	TRIAS TRIASSIC			
	PALEOZOIKUM PALEOZOIC			

Gambar 3.Stratigrafi daerah penelitian (Mangga dkk.,1993)

Berdasarkan peta geologi regional dan susunan stratigrafi pada Gambar 3, terdapat beberapa formasi dari tua hingga muda yaitu sebagai berikut.

1. Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg (k,s))

Kompleks Gunung Kasih terdiri atas runtunan sedimen-malih dan batuan beku-malih terdiri dari sekis, kuarsit, gnes. Sekis terdiri dari dua jenis sekis kuarsa mika grafit dan sekis amfibol. Ditafsirkan sebagai batuan gunung api malihan. Kuarsit, putih kecoklatan sampai kemerahan berbutir sedang-kasar tekstur

granoblastik jelas, sedimen malihan tak murni. Untuk ketebalannya bisa mencapai lebih dari 2500 meter.

2. Formasi Tarahan (Tpot)

Formasi Tarahan berumur Paleosen–Oligosen awal yang terdiri dari tuf dan breksi dikuasai oleh sisipan rijang dengan ketebalan mencapai 500 meter-1000 meter. Tersebar di sekitar Telukbetung, Gunung Balu sampai Tarahan, penampang tipe di Sungai Tarahan 10 kilometer tenggara Tanjung Karang. Diendapkan dilingkungan benua, mungkin busur gunungapi. Formasi Tarahan tersusun oleh batuan tuf padu, breksi dengan sisipan rijang, breksi tufaan dengan sedikit lava andesit-basal.

3. Formasi Campang (Tpoc)

Formasi Campang tersusun dari perselingan batulempung, serpih, breksi, dan tuf padu, batuan breksi dengan sisipan batupasir, batulanau, klastika gampingan, tuf dan breksi konglomeratan polimik.

4. Batuan Granit Tak Terpisahkan (Tmgr)

Batuan Granit Tak Terpisahkan terdiri atas batuan granit dan granodiorit. Batuan terobosan dengan umur Oligosen sampai Miosen-Tengah Tersier Kenozoikum. Dengan ketebalan lebih dari 2000 meter. Terbentuk karena proses alterasi dari mineral utama pembentuk batuan granit yaitu terdiri dari kuarsa, potasium *feldspar* dari jenis ortoklas dan mikroklin, plagioklas dari jenis albit-oligoklas dan sedikit andesit, biotit, *hornblende*. Dan mineral tambahan terdiri dari zirkon, apatit, rutil *sphen* dan oksida besi.

5. Formasi Lampung (Qtl)

Formasi Lampung terdiri dari riolit–dasit dan vulkanoklastika tufan, berumur Plistosen, tersebar luas diseluruh lembar tanjung karang, khususnya di bagian timur dan timurlaut dengan ketebalan mencapai 500 meter. Diendapkan di lingkungan terestrial-fluvial air payau. Menindih tak selaras batuan-batuan yang lebih tua.

6. Endapan Gunungapi Muda (Qhv (r,p,b))

Endapan Gunungapi muda berumur Plistosen dan Holosen dengan komposisi lava andesit-basal, breksi dan tuf yang mencapai ketebalan beberapa ratus meter yang tersebar di dekat gunung dan juga menyisip di formasi-formasi lain.

7. Aluvium (Qa)

Endapan Aluvium merupakan formasi muda yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung dan gambut yang berasal dari endapan permukaan dengan umur holosen.

2.4 Penelitian Terdahulu

Aji Soemantri dkk. (2016) dalam judul “Aplikasi Metode *Ground Penetrating Radar* Terhadap Pola Retakan Di Bendungan Batu Tegi Lampung” menjadi dasar penting dalam penerapan metode GPR pada struktur beton di wilayah Lampung. Metode dan teknik interpretasi yang digunakan dalam penelitian tersebut menjadi referensi dalam menganalisis pola retakan beton pada struktur dermaga, yang memiliki karakteristik serupa sebagai struktur masif dan terpapar beban lingkungan serta beban dinamis secara terus menerus.

Hans Elmaury Andreas Siregar (2016) dalam judul “Analisis Data *Ground Penetrating Radar* Menggunakan Pemodelan Dengan Metode *Finite Difference* : Studi Kasus Dermaga Belawan”, dengan menggunakan metode *Finite difference* ini akan didapatkan persamaan gelombang elektromagnetik dan juga gambaran dari citra simulasi numeriknya. Sejalan dengan citra radar dari simulasi numerik, maka akan didapat hubungan antara frekuensi dan penetrasi kedalaman dari media/material bawah permukaan. Keterkaitan dengan penelitian kali ini yaitu menunjukkan aplikasi GPR di lingkungan dermaga, relevan dengan fokus penelitian pada Dermaga Panjang.

Putranto dan Sunargono (2022) dalam judul “Penggunaan Metode GPR 2D Untuk Identifikasi Korosi Tulangan Besi Beton Penahan Air di Lokasi X” Penelitian ini difokuskan pada struktur penahan air di sebuah lokasi yang memiliki tingkat kelembapan tinggi dan paparan air yang intens, sehingga rawan menyebabkan degradasi pada elemen tulangan dalam beton. Hasil

radargram dianalisis untuk mengidentifikasi penurunan amplitudo refleksi serta ketidakaturan pola pantulan di sekitar lokasi tulangan, yang diinterpretasikan sebagai indikasi awal korosi. Kaitannya dengan penelitian kali ini yaitu mendeteksi korosi tulangan beton, khususnya pada struktur yang berada di lingkungan basah atau maritim seperti dermaga. Teknik identifikasi anomali dan pendekatan interpretasi yang digunakan menjadi referensi dalam menganalisis hasil radargram pada struktur beton Dermaga Panjang, Bandar Lampung.

Derobert dan Villain (2017) dalam judul “Pengaruh Kandungan Air dan Klorida serta karbonasi Pada Karakterisasi Elektromagnetik Beton Pada Frekuensi GPR Melalui Rancangan Percobaan” dijelaskan bahwasannya kandungan air, klorida, dan juga karbonasi merupakan indikator daya tahan yang mempengaruhi sifat dan integritas beton. Kandungan air dan klorida serta karbonasi pada sifat elektromagnetik dengan frekuensi tinggi yaitu sekitar 50 MHz hingga 1000 Mhz akan mengakibatkan efek dispersi permitivitas yang relatif kompleks dari beton itu sendiri. Karena Dermaga Panjang berada di area maritim dengan tingkat kelembaban dan kandungan klorida tinggi, pemahaman tentang dampak kimia terhadap gelombang GPR sangat penting agar interpretasi korosi dan retakan tidak bias.

Marleny dkk. (2023) dalam judul “Segmentasi Citra Keretakan Dinding Beton Menggunakan Teknik Perbandingan Evaluasi Metrik” yang mana dalam artikel ini dijelaskan bahwasannya segmentasi citra digunakan untuk memisahkan area yang berbeda pada citra, seperti area keretakan dan area non-keretakan. Segmentasi citra keretakan dinding beton tersebut dapat di evaluasi melaui evaluasi metric dengan berbagai metode salah satunya yaitu metode *Ground Penetrating Radar* (GPR). Dalam konteks penelitian ini, metode segmentasi citra dapat menjadi pelengkap atau validasi visual dari data radargram GPR. Selain itu, pendekatan visual digital dari penelitian ini membuka peluang integrasi antara hasil GPR dan citra visual permukaan, terutama untuk mengkonfirmasi keberadaan retakan yang menjalar dari dalam ke luar.

2.5 Sampling Interval (t)

Sampling frekuensi merupakan suatu pencuplikan sinyal analog menjadi digital dengan nilai tertentu dalam frekuensi, pencuplikan ini secara langsung juga dapat menyebabkan pencuplikan dalam waktu dengan interval tertentu yang disebut sebagai *sampling interval* atau *sampling rate*. Ketika dipadukan dengan nilai jumlah sampel dalam satu *trace* maka sampling ini akan menentukan panjang rekaman yang mampu diambil/didapatkan. Dengan mengecilkan sampling frekuensi akan menyebabkan *sampling rate* membesar sehingga akan menambah panjang rekaman. Maka dari itu hubungan antara sampling interval dengan frekuensi tengah (Annan,2001).

$$t = \frac{1000}{6fc} \quad (ns) \quad (1)$$

Keterangan :

t = Waktu tempuh dalam mikrodetik (μs)

fc = Frekuensi pusat (center frequency) (Mhz)

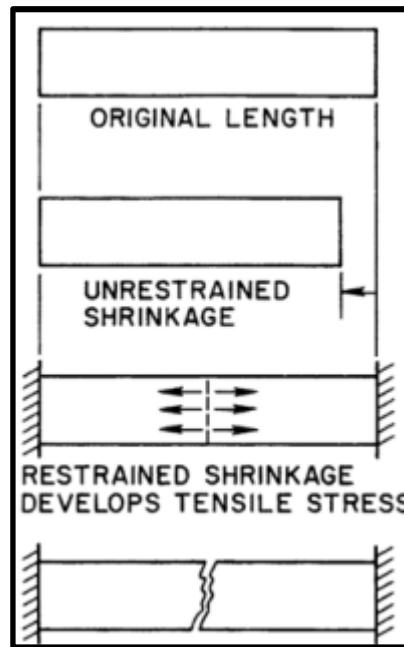
2.6 Retak Pada Beton

Retak yang terjadi pada beton dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu retak nonstruktural dan retak struktural. Retak nonstruktural dapat terjadi akibat adanya tegangan yang diinduksi secara internal dalam material bangunan. Retak jenis ini tidak berpengaruh secara langsung terhadap kekuatan struktur. Sedangkan untuk tipe retak nonstruktural memiliki beberapa tipe yaitu sebagai berikut (Hidayat & M, 2009) (Saputra Gunawan, Taran, Sudjarwo, & Buntoro, 2014).

1. *Crazing*, retak ini terjadi karena pasir yang ukurannya halus digunakan dalam jumlah yang banyak dan biasanya terjadi pada pekerjaan plesteran dinding.
2. *Map Cracking*, retak ini terjadi akibat semen yang digunakan terlalu banyak.
3. Retak plastis akibat penyusutan, biasanya terjadi dalam waktu 1 hingga 8 jam setelah placing pada cetakan, hal ini terjadi karena beton sangat cepat

mengalami kehilangan air yang dipengaruhi udara, suhu, kelembaban, dan kecepatan angin di permukaan beton.

4. Retak plastis akibat penurunan, beton yang selesai dicor memiliki kecenderungan untuk terus mampat. Selama periode ini, beton plastis mungkin ditahan oleh tulangan. Perletakan setempat ini dapat menyebabkan rongga di bawah tulangan dan retak di atas tulangan. Retak plastis akibat penurunan akan meningkat seiring dengan meningkatnya diameter tulangan dan nilai slump serta berkurangnya tebal selimut beton.
5. Retak akibat susut pengeringan (*drying shrinkage cracking*), terjadi akibat pengeringan yang mana kadar air dalam pasta semen berkurang. Perilaku retak akibat *drying shrinkage cracking* dijelaskan pada gambar berikut.



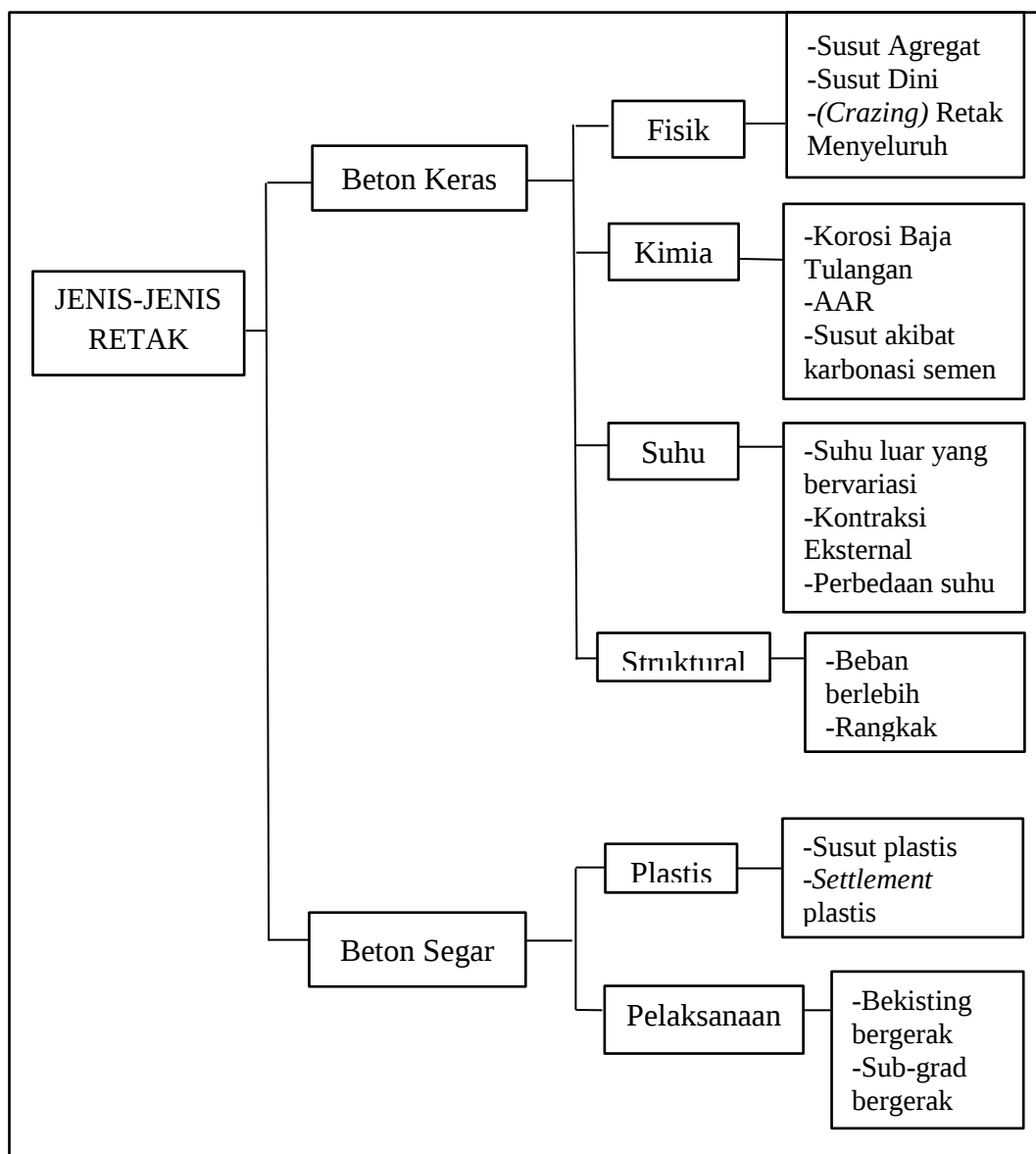
Gambar 4. Retak akibat pengaruh *drying shrinkage* (ACI, 2008).

Pada saat terjadi susut pengeringan, tidak terjadi retak pada elemen beton yang tidak terkekang. Namun pada elemen yang terkekang, apabila tegangan tarik yang terjadi lebih besar dari kekuatan tarik beton, maka akan terjadi retak.

6. Retak akibat perubahan temperatur, perbedaan suhu antara bagian luar dan dalam beton akan menghasilkan perubahan volume yang pada akhirnya menyebabkan retak.
7. Retak akibat reaksi kimia, beton dapat pecah seiring dengan waktu akibat reaksi ekspansif yang berkembang secara perlahan antara agregat yang

mengandung silika aktif dan basa yang berasal dari hidrasi semen, bahan tambah atau sumber eksternal (air curing, air tanah, dan alkaline yang ditaruh atau digunakan pada permukaan beton yang sudah kering.

Retak struktural dapat disebabkan karena pengaruh getaran (vibrasi), gempa dan beban yang bekerja melebihi kapasitas sehingga dapat membahayakan bangunan (Saputra Gunawan dkk., 2014). Retak nonstruktural dapat disebabkan oleh pengaruh lentur, geser, dan torsi yang biasa terlihat pada elemen struktural seperti balok, kolom, dan pelat lantai. Secara garis besar retak pada beton segar dan beton keras ditunjukkan pada diagram berikut.

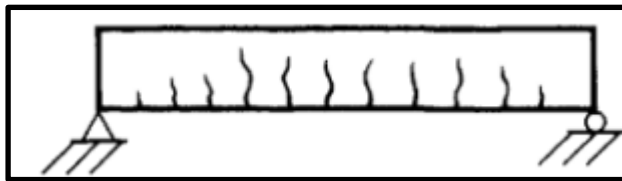


Gambar 5. Diagram jenis retak beton (Lani Djakranata, 2021)

Retak yang terjadi pada balok beton bertulang dibedakan menjadi beberapa yaitu sebagai berikut (Jack C. McCormac; James K. Nelson, 2005).

1. Retak Lentur

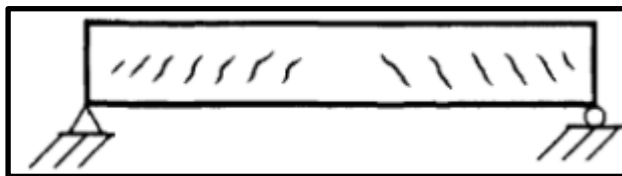
Retak ini terlihat vertikal yang dimulai dari sisi balok yang menerima gaya tarik sampai pada sumbu netral. Untuk balok dengan beban merata yang seragam, lebar retak pada bagian tengah balok lebih besar karena momen lentur yang terjadi pada bagian tengah balok lebih besar dibanding bagian lain.



Gambar 6. Retak lentur

2. Retak Miring

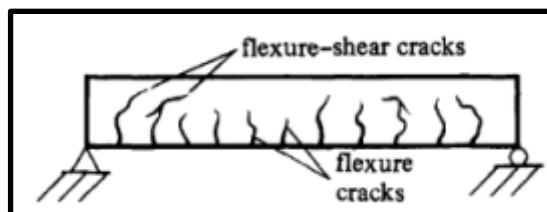
Retak ini disebut juga sebagai retak geser web karena terjadi pada bagian web (badan) balok beton bertulang, dapat terjadi secara bebas atau kelanjutan dari retak lentur.



Gambar 7. Retak geser web

3. Retak Geser lentur

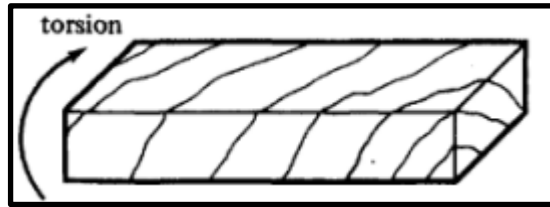
Retak ini terjadi akibat pengaruh gaya geser dan momen lentur secara bersamaan. Umumnya retak ini terjadi balok prategang dan non prategang.



Gambar 8. Retak geser lentur

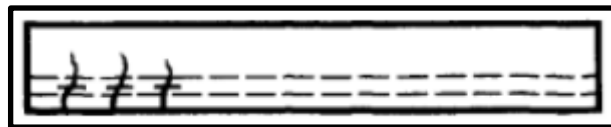
4. Retak Puntir (*torsion crack*)

Retak ini sama halnya dengan retak miring hingga melingkar di sekeliling balok.



Gambar 9. Retak puntir

5. Retak lekatan, retak ini terjadi akibat pemisahan antara beton dan tulangan di sepanjang tulangan.



Gambar 10. Retak lekatan

Pengaruh pembebanan, *drying shrinkage*, taraf pembebanan yang tinggi dalam waktu lama akan berpengaruh pada penambahan jumlah dan ukuran retak mikro (*microcracking*) (Mehta & Paulo J. M. Monteiro, 2006). Retak mikro terjadi di sepanjang batas antara agregat dan pasta semen (ACI, 2008).

Setelah dilakukan pemeriksaan baik secara visual dan juga pemeriksaan khusus maka akan diketahui jenis retak pada balok, apakah retak non structural atau retak struktural. Berikut beberapa metode perbaikan retak (Isneini, 2009).

1. *Caulking*, teknik ini digunakan untuk melakukan perbaikan retak beton dengan ukuran kecil/menengah dengan menggunakan material yang bersifat plastic.
2. *Routing* dan *Sealing*, teknik ini digunakan untuk perbaikan retak beton yang bersifat *dormant* dan tidak memiliki pengaruh structural. *Sealant* dapat menggunakan senyawa *epoxy* dan *urethane* yang akan tetap fleksibel pada suatu perubahan temperature yang besar.
3. *Coating*, teknik ini digunakan untuk perbaikan retak yang terjadi pada bagian permukaan (*near surface*).
4. *Grouting*, teknik perbaikan yang dilakukan dengan cara pengecoran menggunakan bahan *non-shrink* mortar dapat dilakukan secara manual ataupun menggunakan pompa. Kelebihan dari teknik ini yaitu dapat digunakan pada

lingkungan yang lembab, dan juga dapat digunakan untuk mengisi retakan yang sangat halus. Sedangkan kekurangannya yaitu membutuhkan tenaga yang terampil dan juga beberapa jenis *grout* mudah terbakar serta tidak dapat digunakan dalam ruang yang tertutup (Woodson,2009).

5. Injeksi, teknik ini digunakan untuk memperbaiki retak yang sempit dengan menyuntikkan *epoxy resin*.
6. *Shotcreting*, teknik ini digunakan untuk perbaikan dengan cara menembakkan beton atau mortar pada lubang atau permukaan beton yang akan diperbaiki.

2.7 Kuat Tekan Beton

Penurunan mutu atau kuat tekan beton harus tetap berada dalam batas toleransi agar struktur tersebut dapat memenuhi syarat kondisi batas, yang meliputi aspek kekuatan, kemampuan layan, kestabilan, serta daya tahan. Besaran penurunan mutu tersebut dijadikan dasar dalam penyusunan langkah antisipasi sejak tahap perencanaan hingga tahap pemeliharaan bangunan. Dengan demikian, diharapkan struktur tetap memenuhi persyaratan kondisi batas sekaligus efisien dalam penggunaan sumber daya selama masa konstruksi.

Kuat tekan beton mengidentifikasikan mutu sebuah struktur dimana semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan (Mulyono, 2004). Berdasarkan SK-SNI-T-15-1990-03 nilai kuat tekan dihitung dengan rumus :

$$\sigma = P/A \quad (2)$$

Keterangan :

σ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (Kg)

A = Luas penampang benda uji (Cm²)

Adapun faktor lain yang dapat mempengaruhi mutu kekuatan beton seperti yang dikemukakan oleh Mulyono (2004) yaitu:

1. Proporsi bahan penyusun.
2. Metode pencampuran.
3. Perawatan.
4. Keadaan pada saat pengecoran.

Sifat-sifat dan karakteristik material penyusun beton akan mempengaruhi kinerja beton yang dibuat. Kinerja beton ini harus disesuaikan dengan kelas dan mutu beton yang dikerjakan, sehingga dalam penggunaannya dapat disesuaikan dengan bangunan ataupun konstruksi yang akan dibangun untuk mendapatkan hasil yang memuaskan dan sesuai kebutuhan.

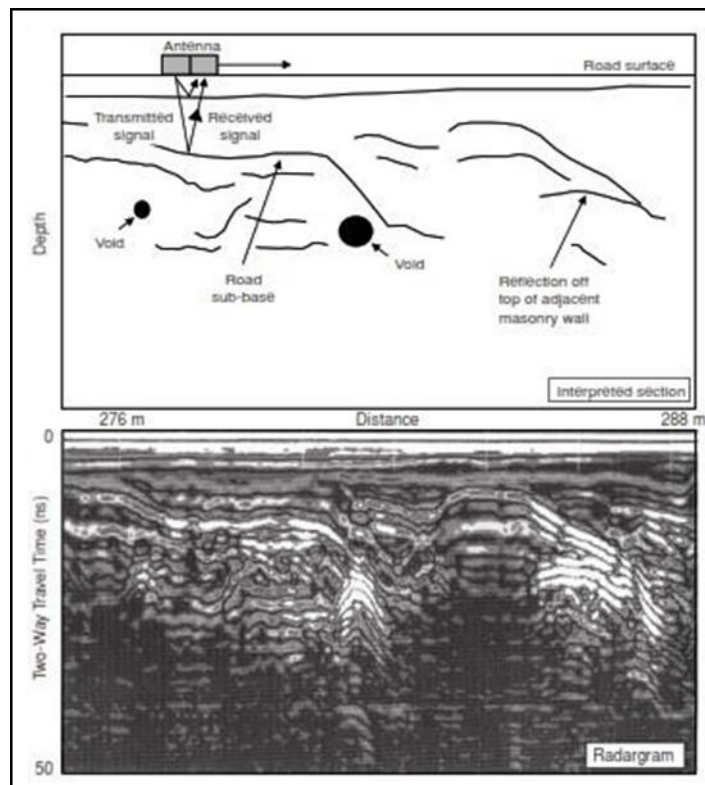
III. TEORI DASAR

3.1 Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) pada bidang geofisika sering dikenal sebagai *Ground Radar* atau Georadar, metoda geofisika ini menggunakan sinyal gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik akan dipancarkan ke dalam bumi dan direkam oleh antena pada saat gelombang telah mencapai ke permukaan. Gelombang elektromagnetik diteruskan, dipantulkan dan dihamburkan oleh struktur permukaan dan anomali jika terdapat di bawah permukaan. Gelombang elektromagnetik yang dipantulkan dan dihamburkan akan direkam oleh antena di permukaan. Metoda ini dapat menghasilkan gambaran bawah permukaan dengan resolusi yang tinggi, karena gelombang yang dipancarkan oleh GPR memiliki frekuensi sekitar 10-1000 Mhz ke dalam tanah oleh antena pemancar lalu mengenai suatu lapisan atau objek dengan suatu konstanta dielektrik berbeda selanjutnya pulsa akan dipantulkan kembali dan diterima oleh antena penerima, waktu dan besar pulsa direkam (Allen, 1979).

Metode GPR ini menggunakan analisa refleksi/pantulan dari gelombang elektromagnetik yang dihasilkan akibat dari perbedaan sifat/konstanta dielektrik benda-benda di bawah permukaan. Secara umum peralatan GPR terdiri dari dua komponen utama yaitu peralatan pemancar gelombang radar (*transmitter*) dan peralatan penerima pantulan/refleksi gelombang radar (*transceiver*). Sistem yang digunakan adalah merupakan sistem aktif dimana dilakukan ‘penembakan’ pulsa-pulsa gelombang elektromagnetik (pada

interval gelombang radar) untuk kemudian dilakukan perekaman intensitas gelombang radar yang berhasil dipantulkan kembali ke permukaan (Quan & Harris, 1997). Skema pengambilan data GPR ditunjukkan seperti gambar dibawah.

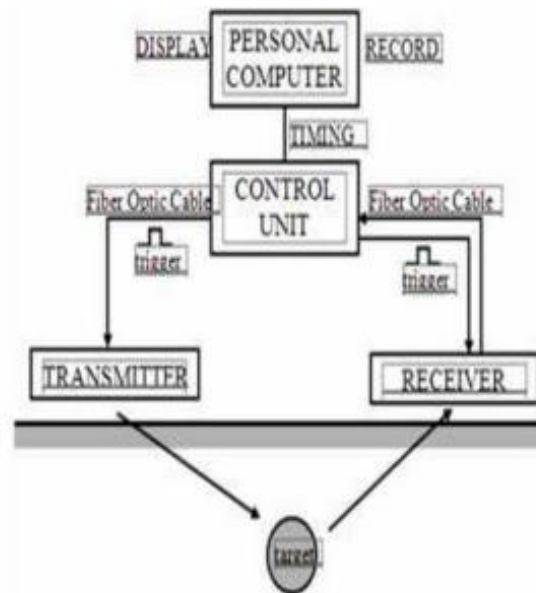


Gambar 11. Skema pengambilan data GPR (Reynolds, 2011).

3.2 Prinsip dasar Metode GPR

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan suatu alat yang digunakan untuk proses deteksi benda – benda yang terkubur di bawah tanah dengan tingkat kedalaman tertentu, dengan menggunakan gelombang radio, biasanya dalam range 10 MHz sampai 1GHz. Seperti pada sistem radar pada umumnya, sistem GPR terdiri atas pengirim (*transmitter*), yaitu antenna yang terhubung ke sumber pulsa, dan bagian penerima (*receiver*), yaitu antenna yang terhubung ke unit pengolahan sinyal dan citra. Adapun dalam menentukan tipe antenna yang digunakan, sinyal yang ditransmisikan dan metode pengolahan sinyal tergantung pada beberapa hal, yaitu jenis objek yang akan dideteksi, kedalaman objek, dan karakteristik elektrik medium tanah. Dari proses

pendeteksian seperti di atas, maka akan didapatkan suatu citra dari letak dan bentuk objek yang terletak di bawah tanah (Ligthart, 2004).



Gambar 12. Diagram kerja GPR (Arisona, 2009).

Control unit berfungsi sebagai pengatur pengumpulan data. Komputer memberikan informasi lengkap bagaimana prosedur yang harus dilakukan, dan saat sistem diaktifkan, *control unit* mengatur *transmitter* dan *receiver*. *Control unit* menyimpan data mentah dalam sebuah *buffer* sementara, dan saat dibutuhkan, dapat diambil dan ditransfer ke komputer. *Transmitter* menghasilkan energi elektromagnetik dan mengirimnya pada daerah sekitar, khususnya ke dalam medium yang diobservasi. Energi dalam bentuk pulsa pada amplitudo tinggi (370 V) yang dipindahkan ke bagian antenna. *Receiver* mengkonversi sinyal yang diterima oleh antenna menjadi nilai integer. Dalam unit *receiver* terdapat dua konektor optic. Pertama digunakan untuk mentransfer sinyal terkontrol dari *control unit* (bertanda R) dan lainnya mengirim data yang diperoleh ke *control unit* (bertanda D). Antena *receiver* menerima pulsa yang tidak terabsorpsi oleh bumi tetapi dipantulkan dalam domain waktu tertentu.

Mode konfigurasi antenna *transmitter* dan *receiver* pada GPR terdiri dari mode monostatik dan bistatik. Mode monostatik yaitu bila *transmitter* dan *receiver* digabung dalam satu antenna, sedangkan mode bistatik bila kedua antenna

memiliki jarak pemisah. Prinsip kerja GPR adalah *transmitter* membangkitkan pulsa gelombang elektromagnetik pada frekuensi tertentu sesuai dengan karakteristik antenna tersebut (10 MHz - 4GHz). *Receiver* diset untuk melakukan *scan* yang secara normal mencapai 32 – 512 *scan* per detik. Setiap hasil *scan* ditampilkan pada layar monitor sebagai fungsi waktu *two-way time travel time*, yaitu waktu tempuh gelombang elektromagnetik menjalar dari *transmitter* – target – *receiver*. Tampilan ini disebut dengan radargram (Lane, 1998).

3.3 Persamaan Dasar Metode GPR

3.3.1 Persamaan Maxwell

Gelombang secara singkat didefinisikan sebagai getaran yang merambat, sedangkan gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang memiliki komponen medan listrik dan medan magnetik, dimana keduanya saling tegak lurus terhadap arah perambatan. Persamaan pertama yang mendasari gelombang elektromagnetik adalah persamaan Maxwell yang menjelaskan sifat-sifat medan magnet dan medan listrik dengan sumbernya.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (6)$$

Keterangan :

∇ = Operator divergensi

E = Medan listrik (V/m)

ρ = Rapat muatan (C/m³)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa (F/m)

B = Medan magnet (Wb/m² atau T)

$\nabla \times$ = Operator curl

μ_0 = Permeabilitas ruang hampa (H/m) atau N/A²

j = Rapat arus A/m²

$\frac{\partial}{\partial t}$ = Turunan parsial terhadap waktu

Muatan listrik yang berbeda jenis maka akan tarik menarik sedangkan muatan yang memiliki jenis yang sama maka akan tolak menolak, persamaan Maxwell I (Hukum *Gauss* untuk Listrik) menjelaskan bagaimana muatan listrik dapat mengubah suatu medan listrik.

Persamaan Maxwell ini adalah landasan teori dari perambatan gelombang elektromagnet. Pada material dielektrik murni, suseptibilitas magnetik (μ), dan permitivitas listrik (ϵ) adalah konstan dan tidak terdapat atenuasi dalam perambatan gelombang. Tidak sama halnya jika berhadapan dengan material dielektrik (Reynolds, 2011). Sifat-sifat dari material bumi bergantung dari komposisi dan kandungan air material tersebut. Kedua hal ini mempengaruhi cepat rambat perambatan gelombang dan atenuasi gelombang elektromagnet. Keberhasilan dari metoda GPR bergantung pada variasi bawah permukaan yang dapat menyebabkan gelombang tertransmisikan.

3.3.2 Koefisien Refleksi Gelombang Elektromagnetik

Gelombang yang ditransmisikan pada variasi bawah permukaan mempengaruhi keberhasilan dari suatu metode GPR (*Ground Penetrating radar*). Koefisien refleksi (R) merupakan suatu perbandingan energy yang direfleksikan. Hal ini ditentukan oleh perbedaan suatu nilai cepat rambat gelombang atau konstanta dielektrik relative dua medium yang berdekatan (Kunz & Luebbers, 1993).

$$R = \frac{(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (7)$$

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2})}{(\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})} \quad (8)$$

Keterangan :

R = Koefisien refleksi

V_1 = Cepat rambat gelombang elektromagnet pada lapisan pertama

V_2 = Cepat rambat gelombang elektromagnet pada lapisan kedua

$V_1 < V_2$

ϵ_1 = Konstanta dielektrik relatif lapisan pertama

ϵ_2 = Konstanta dielektrik lapisan kedua

Persamaan di atas diaplikasikan untuk keadaan normal pada permukaan bidang datar, dengan asumsi tidak ada sinyal yang hilang berhubungan dengan amplitudo sinyal. Besarnya R akan berada di antara nilai -1 dan 1. Daya koefisien refleksi sama dengan R^2 dan energi yang ditransmisikan sama dengan $1-R$. Jejak yang terdapat pada rekaman GPR merupakan konvolusi dari koefisien refleksi dan impuls GPR.

3.3.3 Parameter Fisis Batuan

Sifat electromagnet meliputi sifat kelistrikan dan juga sifat kemagnetan. Permivitas dan konduktivitas termasuk sifat kelistrikan, sedangkan permeabilitas magnet termasuk dari sifat kemagnetan. Permivitas dielektrik (ϵ) menjelaskan mengenai kemampuan suatu material menyimpan arus listrik. Permivitas dielektrik menjelaskan rasio antara medan listrik (E) dengan suatu pergeseran medan listrik (D).

$$D = \epsilon E \quad (9)$$

Keterangan :

ϵ = Permivitas dielektrik (F/m)

D = Pergeseran medan listrik

E = Medan listrik V/m

Permeabilitas magnetic (μ) menjelaskan mengenai tingkat kemagnetan suatu material di bawah pengaruh medan magnet eksternal. Permeabilitas magnetic juga menjelaskan bahwa rasio antara medan magnet (B) dan kuat medan magnet (H).

$$B = \mu H \quad (10)$$

Keterangan :

μ = Permeabilitas magnetic (H/m)

H = Kuat medan magnet (A/m)

B = Medan magnet (Wb/m²) atau T

Konduktivitas elektrik (σ) menjelaskan seberapa mudah suatu aliran listrik dapat bergerak menembus suatu material yang terdapat medan listrik. Konduktivitas elektrik juga menjelaskan rasio antara rapat arus (J) di dalam material terhadap medan listrik (E).

$$j = \sigma E \quad (11)$$

Keterangan :

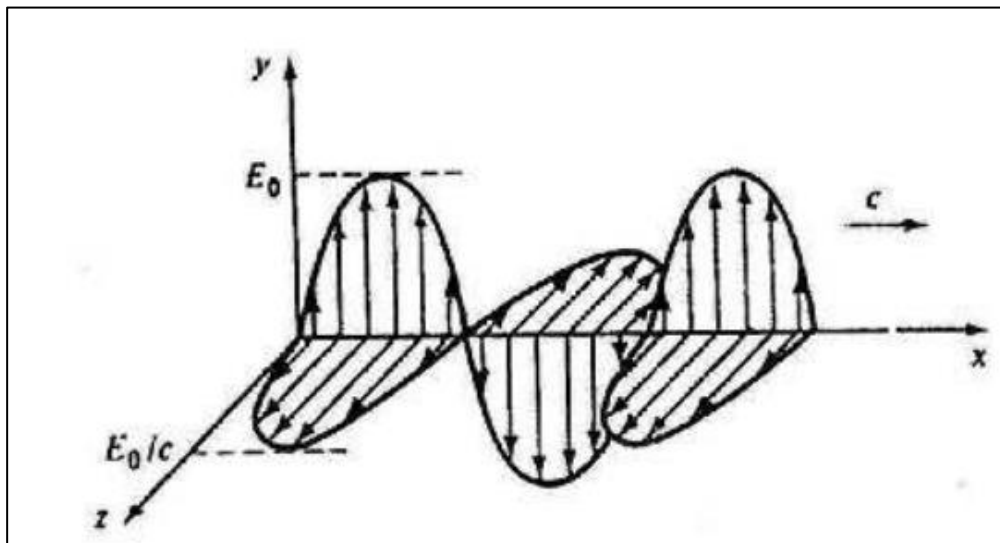
σ = Konduktivitas elektrik (S/m)

j = Rapat arus (A/m²)

E = Medan listrik (V/m)

3.3.4 Perambatan Gelombang

Rangkaian pemancar akan menghasilkan pulsa listrik berbentuk PRF (*pulse repetition frequency*), pulsa akan dipancarkan oleh antenna ke dalam tanah dalam durasi tertentu secara terus menerus. Pulsa ini akan mengalami absorpsi, atenuasi, dan cacat sinyal lainnya selama perambatan di tanah. Absorpsi merupakan penyerapan suatu energi yang diakibatkan oleh penjalaran gelombang yang melewati medium yang berbeda, sedangkan atenuasi merupakan gejala pelemahan sinyal yang diakibatkan bertambahnya jarak penetrasi suatu gelombang.



Gambar 13. Perambatan gelombang elektromagnet (Supriyanto,2007).

Secara singkat, jika suatu medium bersifat homogen maka suatu sinyal yang dipantulkan akan sangat kecil, sedangkan jika melewati suatu medium yang heterogen, maka akan ada sinyal yang dipantulkan kembali. Sinyal ini yang kemudian diproses oleh antenna *receiver*.

Untuk kedalaman suatu objek, dapat diketahui dengan cara menghitung waktu antara pulsa dipancarkan dan juga diterima. Dalam selang waktu

tersebut, pulsa akan bolak-balik dari suatu *transmitter-objek-receiver* (Bahri dkk.,2009).

$$h = \frac{1}{2} vt \quad (12)$$

Keterangan :

h = Kedalaman objek (m)

v = Kecepatan propagasi gelombang (m/ns)

t = Waktu (ns)

Untuk mengetahui kedalaman suatu objek yang dideteksi kecepatan perambatan dari gelombang elektromagnetik harus diketahui. Kecepatan gelombang radar dalam beberapa medium tergantung pada suatu kecepatan cahaya di udara dan parameter fisis seperti konstanta dielektrik relatif.

Untuk kecepatan gelombang radar dalam material diberikan oleh persamaan berikut (Bahri dkk., 2009).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (13)$$

Keterangan :

c = Kecepatan cahaya (300 mm/ns)

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif (F/m)

Tabel 1. Tabel konstanta dielektrik relatif dan kecepatan gelombang elektromagnetik (Reynolds, 2011).

<i>Material</i>	ϵ_1	V (mm/ns)	<i>Conductivity</i> (mS/m)
<i>Air</i>	1	300	0
<i>Water (fresh)</i>	81	33	0,5
<i>Water (sea)</i>	81-88	33	3000
<i>Polar snow</i>	1,4-3	194-252	~0.5
<i>Polar ice</i>	3-3,15	168-172	$\leq 0,06-0,08$
<i>Temperate ice</i>	3,2	167	5×10^{-8}
<i>Pure ice</i>	3,2	167	5×10^{-8}
<i>Freshwater lake ice</i>	4	150	$1-10^{-6}$
<i>Sea ice</i>	2,5-8	78-157	10-100
<i>Permafrost</i>	2-8	106-212	0,1-10
<i>Active layer permafrost</i>	25	60	
<i>Gravel</i>	5	134	10
<i>Sand and gravel</i> (unsaturated)	3,5-6,5	118-160	0,007-0,06

<i>Material</i>	ϵ_1	<i>V (mm/ns)</i>	<i>Conductivity (mS/m)</i>
<i>Sand and gravel (saturated)</i>	15,5-17,5	72-76	0,7-9
<i>Coastal sand (dry)</i>	5-10	95-134	0,01-10
<i>Sand (dry)</i>	3-6	122-173	10^{-4} -1
<i>Sand (wet)</i>	25-30	53-95	0,01-1
<i>Sand (golf course)</i>	10-25	60-95	0,1-10
<i>Silt (unsaturated)</i>	2,5-5	134-190	10
<i>Silt (saturated)</i>	22-30	55-64	1-100
<i>Clay (dry)</i>	2-5	134-212	≤ 100
<i>Clay (wet)</i>	8-40	47-106	2-100
<i>Till (unsaturated)</i>	7-21	65-113	2,5-10
<i>Till (saturated)</i>	24-34	51-61	2-5
<i>Moraine</i>	7-14	80-113	10^{-5} - 10^{-7}
<i>Marsh</i>	12	86	
<i>Peat (freshwater)</i>	57-80	33-40	≤ 40
<i>Agricultural land</i>	15	77	
<i>Pastoral land</i>	13	83	
<i>Soil (fine-grained)</i>	41-49	43-47	40
<i>Average 'soil'</i>	16	75	5
<i>Granite</i>	5-8	106-120	10^{-3} - 10^{-5}
<i>Limestone (dry)</i>	4-8	100-113	
<i>Limestone (wet)</i>	6-15	77-122	10-100
<i>Dolomite</i>	6,8-8	106-115	
<i>Basalt (wet)</i>	8	106	
<i>Norite</i>	7,4	110	
<i>Anorthosite</i>	7,2-8	106-112	
<i>Feldspathic pyroxenite</i>	7,6-8,6	102-109	
<i>Chromitite</i>	11,7-12,2	86-90	
<i>Pegmatite feldpathiv</i>	8,3	104	
<i>melanorite</i>	8,2	105	
<i>Shale (wet)</i>	6-9	100-122	10-100
<i>Sandstone (dry)</i>	4-7	113-150	10^{-3} - 10^{-7}
<i>Sandstone (wet)</i>	6	122	10^{-2} - 10^{-3}
<i>Coal</i>	4-5	134-150	
<i>Quartz</i>	4.3	145	1-100
<i>Concrete</i>	4-30	55-150	1-100
<i>Asphalt</i>	3-5	134-173	
<i>PVC, Epoxy, Polyesters</i>	3	173	

3.4 Skin Depth

Pada suatu medium konduktor kedalaman penetrasi (*skin depth*) pada metode GPR dipengaruhi oleh frekuensi yang digunakan pada saat pengambilan data. Besar kecilnya frekuensi yang digunakan yaitu semakin tinggi frekuensi maka akan semakin dangkal kedalaman penetrasinya akan tetapi memiliki resolusi yang

tinggi. Begitupun sebaliknya, apabila frekuensi yang digunakan rendah maka kedalaman penetrasinya akan semakin dalam tetapi memiliki resolusi yang rendah. Besarnya penetrasi juga dipengaruhi oleh konduktivitas material, dimana konduktivitas yang tinggi akan menyebabkan penetrasi lebih dangkal karena terjadinya absorpsi oleh lapisan-lapisan yang memiliki konduktivitas (Musset & Khan, 1993). Dalam menentukan *skin depth* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut (Kearey dkk.,2002).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0}} \approx \frac{503,8}{\sqrt{\sigma \cdot f}} \quad (14)$$

Keterangan :

δ = Skin depth (m)

σ = Konduktivitas (S/m)

f = Frekuensi (Hz)

μ_0 = Permeabilitas magnet di udara/ruang vakum = $4 \pi \times 10^{-7}$ (H/m)

Penentuan suatu frekuensi gelombang radar yang dipancarkan dapat disesuaikan dengan mengganti antenna. Pemilihan suatu antenna yang digunakan bergantung pada ukuran target, aproksimasi *range* kedalaman dan juga aproksimasi kedalaman maksimum seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Besaran frekuensi dan penetrasi (Lehman dan Green, 1999).

Frekuensi antenna (MHz)	Ukuran target minimum yang terdeteksi (m)	Aproksimasi range kedalaman (m)	Penetrasi kedalaman maksimum (m)
25	≥ 1.0	5 – 30	35 – 60
50	$\geq 0,5$	5 – 20	20 – 30
100	0,1 – 1,0	5 – 15	15 – 25
200	0,5-0.50	1 – 10	5 – 15
400	0.05	1-5	3-10
1000	0,01	0,05 – 2	0,5 – 4

Gelombang elektromagnetik yang menjalar ke dalam bumi akan mengalami penghilangan suatu energi dikarenakan oleh beberapa faktor yaitu terjadinya absorpsi dan atenuasi gelombang, dimana terjadi hilangnya energy gelombang

elektromagnetik yang melewati sebuah batas atau objek yang memiliki dimensi yang sama dengan panjang gelombang elektromagnetik dan sering terjadi di batas lapisan (Syahril, 2007). Absorbs merupakan energi gelombang elektromagnetik yang berubah menjadi energy panas, sedangkan atenuasi merupakan pelemahan gelombang elektromagnetik. Faktor yang mempengaruhi terjadinya atenuasi (α) adalah konduktivitas listrik (σ), dan permitivitas dielektrik (ϵ). Besarnya harga atenuasi dapat dilihat pada persamaan berikut (Davis dan Annan, 1989).

3.5 Pengolahan data GPR (*Ground Penetrating Radar*)

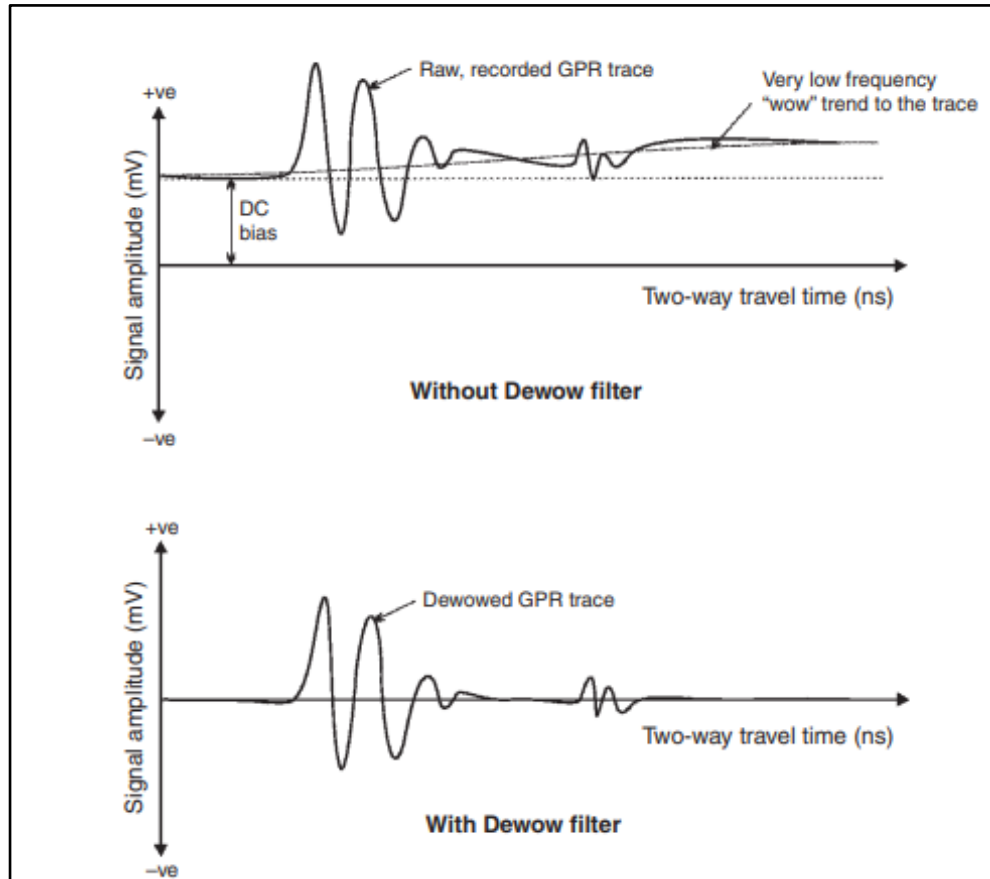
Terdapat beberapa komponen yang dapat merusak sinyal yang diperlukan, sinyal-sinyal ini menyebar secara acak. Oleh karena itu, sinyal tersebut harus di hilangkan untuk meningkatkan mutu hasil pemcitraan (Daniels, 2004). Sehingga digunakan beberapa sekuen *filtering* dalam penerapannya. Sekuen *filtering* yang akan digunakan untuk pengolahan data *Ground Penetrating Radar* (GPR) sampai pada tahap interpretasi antara lain:

1. *Static Correction*

Proses *filtering* pertama adalah *static correction*, filter ini digunakan untuk setiap *trace*, tidak bergantung satu sama lain. Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan suatu pengaruh gelombang udara dengan cara memindahkan waktu tiba gelombang pada titik nol. Pengaruh ini disebabkan oleh adanya kontras yang tinggi antara daya konduktivitas udara dan tanah dapat menciptakan gelombang *direct* dan gelombang udara yang dapat mengaburkan refleksi dari objek penting di bawah permukaan.

2 *Subtract-Mean (Dewow)*

Filter ini digunakan untuk menghilangkan *noise* yang memiliki frekuensi sangat rendah. *Wow* merupakan *noise* atau gangguan yang memiliki nilai frekuensi sangat rendah, hal ini terjadi akibat adanya instrument elektronik yang tersaturasi oleh nilai amplitudo besar dari gelombang langsung dan gelombang udara (Van overmeeren, 1997). Cara kerja filter ini yaitu dengan cara menghitung nilai frekuensi rata-rata dari *trace*. Kemudian nilai frekuensi pada setiap parameter *time window* akan dikurangi dengan nilai rata-rata frekuensi yang telah dihitung sehingga *noise* dengan frekuensi rendah dapat dihilangkan (Jol, 2008) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13 .



Gambar 14. Dewow filtering pada trace data GPR (Jol,2008).

3. Gain

Filter ini digunakan karena pada lapisan tanah, frekuensi tinggi diserap lebih cepat dibandingkan dengan frekuensi rendah dan terjadi juga *spherical* divergensi, yaitu energi gelombang yang menjalar berkurang berbanding terbalik dengan kuadrat dari sumber dan hal ini sejalan dengan jarak dan waktu, maka untuk menghilangkannya dilakukan penguatan kembali *amplitude* yang hilang sehingga seolah-olah di setiap titik energinya sama (Pasasa, 1999). *Gain* dilakukan untuk memperjelas suatu sinyal/memperkuat sinyal yang terjadi pelemahan, intensitas pelemahan ini terkait dengan konduktivitas listrik dari medium yang dilewati.

Adapun bentuk umum dari fungsi *gain* yang bervariasi terhadap waktu dapat terlihat pada persamaan berikut.

$$y'(n) = Y(n) \cdot k \cdot n \quad (15)$$

Dimana $y'(n)$ merupakan suatu sampel ke- n dari *trace* dalam domain waktu, dan k merupakan *gaining function* dari sampel ke- n .

4. *Frequency filtering*

Filtering ini dilakukan untuk menghilangkan suatu frekuensi yang lebih tinggi atau rendah dari sinyal GPR utama yang tidak ingin disertai pada saat proses interpretasi. Kemudian ada beberapa jenis filter yang dapat dilakukan yaitu *high pass filter* yang akan menghilangkan frekuensi rendah dan mempertahankan yang tinggi sementara *low passfilter* merupakan sebaliknya yaitu mempertahankan suatu frekuensi yang sangat rendah. Kemudian *band pass* yang akan menyaring frekuensi dalam rentang tertentu.

5. *2D filter-Background removal*

Pada tahap filter ini dilakukan untuk menghilangkan suatu gangguan-gangguan yang konsisten muncul pada seluruh profil sehingga menutupi sinyal yang sebenarnya. Proses pemfilteran diaktifkan sesuai dengan domain waktu dan juga domain jarak.

6. *FK-filter*

Pada tahap ini merupakan filter dengan domain frekuensi dan domain bilangan gelombang. Pada proses ini maka akan dipilih frekuensi pada rentang tertentu yang diharapkan sesuai dengan sinyal reflector dan menghilangkan *noise* yang tidak diinginkan.

7. *Migration/Time Depth Conversion*

Untuk tahap selanjutnya yaitu migrasi yang mana proses ini merupakan suatu proses untuk mengubah permukaan yang telah terekam dalam data GPR ke data dengan lokasi heterogenitas bawah permukaan pada posisi yang benar (Yulius dkk.,2008).

3.6 Beton (*concrete*)

Beton merupakan campuran semen *Portland* atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan. Beton sebagai sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi dari material pembentuknya. Campuran beton harus menghasilkan beton yang kuat, awet, dan ekonomis (Mulyono,2004). Pada umumnya beton biasanya digunakan sebagai struktur dalam konstruksi suatu bangunan. Dalam teknik sipil beton digunakan untuk bangunan fondasi, kolom, balok, dan pelat. Berdasarkan berat volumenya, betoon

dapat dibedakan menjadi beberapa yaitu beton normal, beton ringan, dan beton berat (Mulyono,2004). Berikut ini merupakan jenis-jenis beton.

1. Beton normal merupakan beton yang mempunyai berat isi (2200-2500 kg) atau menggunakan agregat alam yang di pecah (SNI 03-2834-2000).
2. Beton ringan merupakan beton yang menggunakan agregat ringan yang berasal dari hasil pembakaran *shale*, lempung, *slates*, residu *slag*, residu batubara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik (Mulyono,2004).
3. Beton berat merupakan beton yang dihasilkan dari agregat yang mempunyai berat isi lebih besar dari berat beton normal atau lebih dari 2400 kg. beton yang memiliki berat yang besar biasanya digunakan untuk kepentingan tertentu seperti menahan radiasi, menahan benturan dan lainnya (Mulyono,2004).

Hasil ketentuan berat jenis dari ketiga beton diatas dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Ketentuan berat jenis beton (Tjokrodimulyo,2007).

Jenis beton	Berat jenis	Pemakaian
Beton sangat ringan	<1.00	Non struktur
Beton ringan	1.00-2.00	Struktur ringan
Beton normal	2.30-2.40	Struktur
Beton berat	>3.00	Perisai sinar X

Kemudian pada pembuatan beton itu sendiri diawali dengan mencampurkan semen dan air sehingga membentuk pasta semen. Pasta tersebut kemudian ditambahkan agregat halus hingga menjadi mortar. Kemudian mortar dicampurkan dengan agregat kasar agar menjadi beton. Agregat merupakan butiran mineral alami pengisi campuran beton, yaitu pasir (agregat halus) dan kerikil atau split (agregat kasar) (Putra,2021). Beton itu sendiri harus dirancang sedemikian rupa sehingga menghasilkan kuat tekan rata-rata yang tidak boleh kurang dari 17.5 Mpa dan memenuhi kriteria keawetan beton seperti rasio air semen, pengaruh permeabilitas, lingkungan yang mengandung klorida dari garam atau air laut.

3.7 Ground Penetrating Radar (GPR) Pada Kontruksi Maritim

Ground Penetrating Radar (GPR) merupakan metode yang sering digunakan untuk inspeksi beton. Untuk mendeteksi korosi beton terdapat dua metode yaitu

metode tradisional dan metode *non-destruktif*. Metode tradisional yang digunakan seperti inspeksi visual, uji ketukan dengan palu, pengukuran potensial setengah sel, dan pengambilan inti beton (*coring*), metode ini memiliki keterbatasan yaitu cakupan area pemeriksaan yang hanya dapat dilakukan pada titik-titik tertentu dan akan efektif jika kerusakan telah mencapai tahap lanjut, yang ditandai dengan munculnya gejala visual seperti retak, noda karat, atau kerusakan permukaan beton. Oleh karena itu, metode ini dinilai kurang efisien dalam mendeteksi korosi dini yang belum menunjukkan gejala fisik yang jelas (Elsener dkk.,2003).

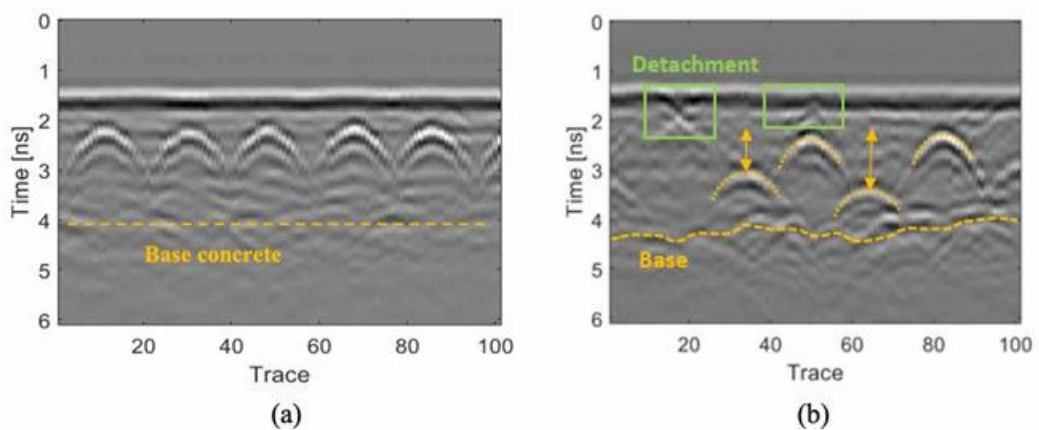
Sedangkan metode pengujian *non-destruktif* (NDT) merupakan metode yang lebih efisien dan berkelanjutan dalam mendeteksi korosi serta degradasi beton. Beberapa teknik yang digunakan dalam NDT antara lain metode *Ground-Penetrating Radar* (GPR). Teknik ini memungkinkan identifikasi dini terhadap kerusakan struktural sebelum muncul gejala visual pada permukaan beton (Alani dkk., 2013). Di antara metode tersebut, GPR dianggap sebagai salah satu yang paling menjanjikan karena kemampuannya dalam mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan seperti korosi, retak, dan delaminasi secara cepat dan mendalam tanpa merusak struktur beton yang diperiksa (Dinh dan Gucunski, 2020).

Penggunaan *Ground Penetrating Radar* (GPR) telah terbukti secara efektif dalam menilai kondisi struktur beton dan jembatan secara non-destruktif. *Ground Penetrating Radar* (GPR) mampu mendeteksi indikasi korosi pada beton bertulang melalui analisis sinyal elektromagnetik (Solla,2013). Sedangkan menurut (Trela,2008) peran *Ground Penetrating Radar* (GPR) dalam mengidentifikasi cacat bawah permukaan seperti rongga dan juga retak. Keduanya memperkuat relevansi *Ground Penetrating Radar* (GPR) sebagai alat diagnostik dalam pemantauan keadaan struktur. Meskipun awalnya metode ini diterapkan pada jalan dan jembatan, metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) terbukti relevan untuk struktur dermaga karena mampu mengidentifikasi ketebalan lapisan, keretakan, serta degradasi beton secara akurat (Feranie, 2022).

Perubahan pada bentuk hiperbola, waktu rambat sinyal, amplitudo, dan polaritas merupakan indikator utama dari kemungkinan kerusakan dan potensi kondisi yang mendukung perkembangan korosi. Ketika kelembaban dan tingkat korosi

meningkat, bentuk hiperbola menjadi lebih sempit. Penyebaran sinyal (*signal scattering*) menunjukkan adanya kerusakan beton, retak, dan kemungkinan keberadaan korosi. Selain itu, waktu rambat sinyal meningkat dan amplitudo sinyal menurun drastis seiring dengan bertambahnya kandungan garam mineral, kelembaban, dan korosi (Solla dkk.,2024).

Gambar 15 menunjukkan perbandingan antara pelat beton bertulang yang sehat (a) dan yang rusak (b). Pada pelat yang sehat (a), seluruh batang tulangan dapat terdeteksi dalam bentuk refleksi hiperbolik yang berurutan, pada jarak waktu tempuh (ns) yang sama. Selain itu, dasar pelat menghasilkan refleksi datar yang kontinu. Konsistensi refleksi ini mengindikasikan keseragaman kondisi material. Sedangkan pada pelat yang rusak, refleksi dari batang-batang tulangan tercatat pada jarak waktu tempuh yang berbeda-beda. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh perubahan konstanta dielektrik, yang mungkin terjadi akibat perbedaan kadar kelembaban. Korosi pada batang baja menyebabkan kerusakan pada beton di sekitarnya, sehingga menghasilkan perubahan signifikan pada sifat dielektriknya. Akibatnya, terjadi penurunan kecepatan perambatan gelombang radar pada area yang mengalami korosi.



Gambar 15.Perbandingan antara pelat beton bertulang yang sehat (a) dan pelat yang rusak (b) (Solla dkk.,2024).

IV. METODE PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dilaksanakannya penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

Waktu : Juli s.d September 2025

Tempat : Laboratorium Geofisika Lingkungan dan Rekayasa Teknik
Geofisika, Universitas Lampung

Alamat : Jl. Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota
Bandar Lampung, Lampung 35142

4.2 Alat dan Bahan

Untuk kelancaran pelaksanaan penelitian ini diperlukan alat-alat sebagai penunjang. Adapun alat dan bahan yang diperlukan selama penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data sekunder *Ground Penetrating Radar* (GPR)
2. *Software* Reflexw
3. Laptop

4.3 Tahapan Penelitian

4.3.1 Studi Literatur

Studi literatur ini merupakan tahap yang dilakukan pada tahapan awal untuk mengumpulkan data-data yang berkaitan dengan penelitian sebagai bahan acuan atau referensi seperti tinjauan pustaka dan teori dasar sehingga dapat mempermudah dalam penelitian.

4.3.2 Pengolahan Data

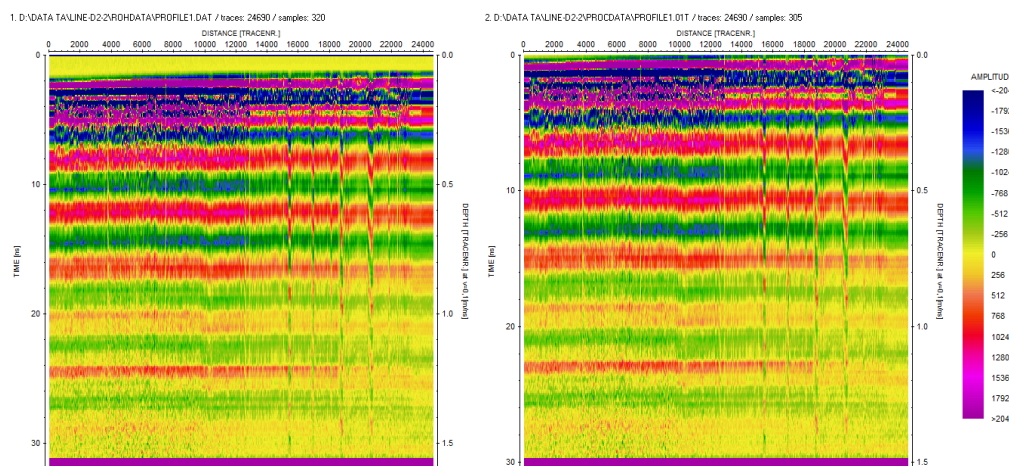
Berikut merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melakukan pengolahan data untuk penelitian kali ini.

a. Input data

Hal pertama yang dilakukan dalam pengolahan data yaitu input data. Dalam hal ini format data yang digunakan yaitu GEOSCANNER_GFS.

b. *Static Correction*

Pada tahap ini dilakukan untuk mengembalikan waktu tiba ke posisi awal gelombang yang kembali ke titik nol untuk memudahkan proses selanjutnya. Berikut untuk tampilan raw data sebelum dan sesudah dilakukan *static correction*.

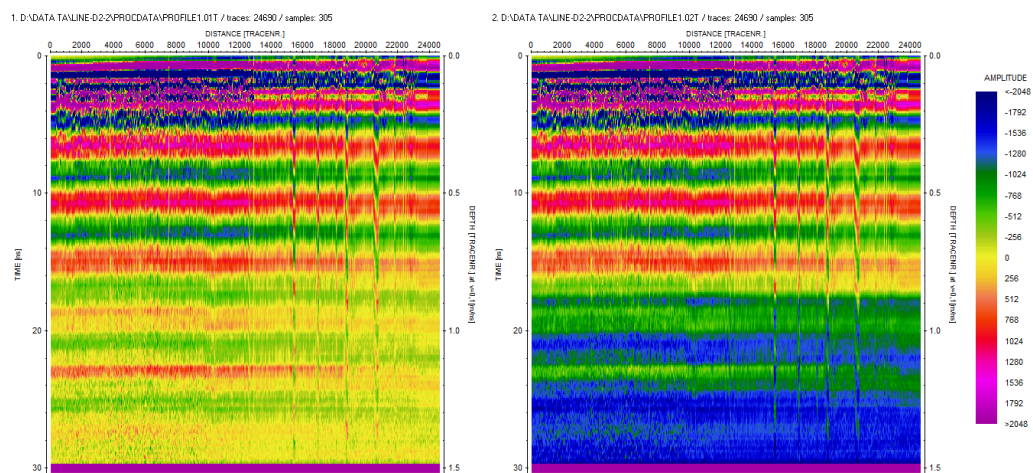


Gambar 16. Raw data lintasan (kiri) dan sesudah dilakukan *static correction* (kanan)

Dari Gambar 16 dapat dilihat perbedaan waktu tiba dari raw data dan data yang telah dilakukan *static correction*.

c. Substract mean (Dewow)

Pada tahap pengolahan ini bertujuan untuk menghilangkan frekuensi yang sangat rendah (*wow*) pada radargram yang disebabkan oleh suatu instrument elektronik yang tersaturasi oleh nilai amplitudo yang besar dari gelombang langsung (*direct wave*) dan gelombang udara. Pada *filter parameter timewindow* di *input* dengan memperhatikan gelombang *filtered spectrum* mendekati gelombang pada *original spectrum*. Untuk hasil sebelum dan sesudah dilakukan *substract mean (dewow)* sebagai berikut.

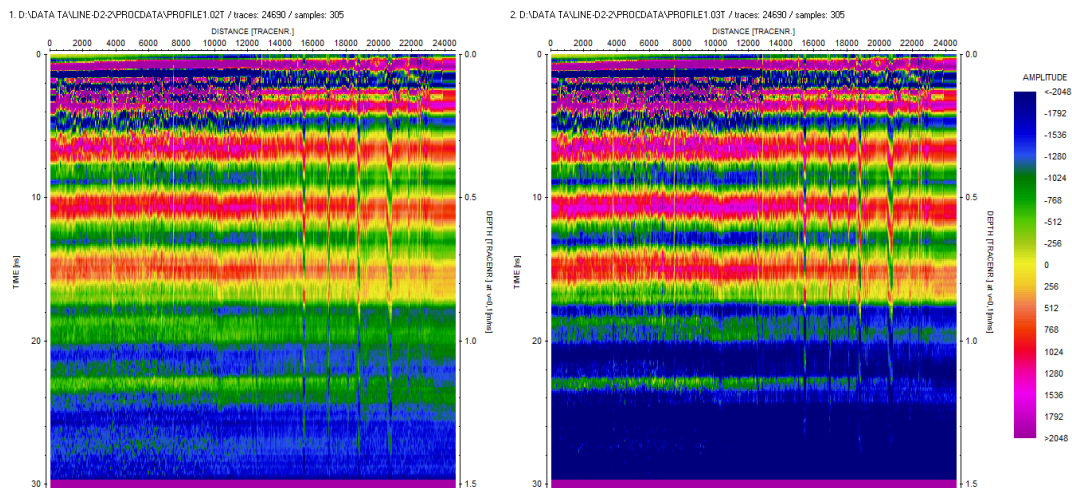


Gambar 17. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses *substract mean (dewow)* (kanan)

Pada filter parameter *time window* di input dengan memperhatikan gelombang *filtered spectrum* mendekati gelombang pada *original spectrum*.

d. Gain

Pada proses ini sinyal akan diperjelas untuk menghilangkan efek atenuasi ketika menjalar ke dalam permukaan bumi akibatnya sinyal pada kedalaman yang besar menjadi kecil. Proses ini dilakukan pada rentang waktu tertentu dengan memasukkan nilai *start time*. Kemudian untuk nilai *linier gain* disesuaikan pada target yang diinginkan.

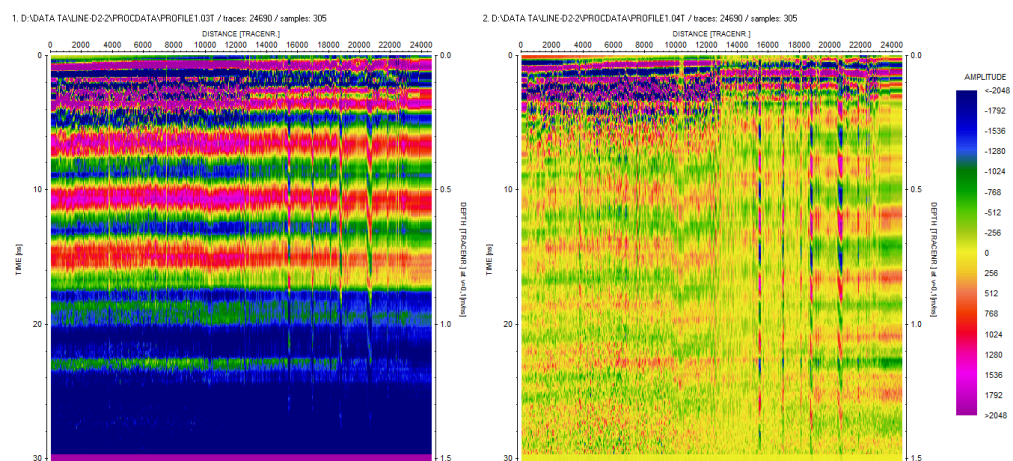


Gambar 18. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses gain (kanan)

Pada proses *gain* ini menggunakan tipe *gain function*. Proses *gain* dilakukan pada rentang waktu tertentu dengan memasukkan nilai *start time*. Kemudian untuk nilai linier *gain* disesuaikan pada target yang diinginkan. Hasil dari *gain* dapat dilihat pada Gambar 18.

e. *Background removal*

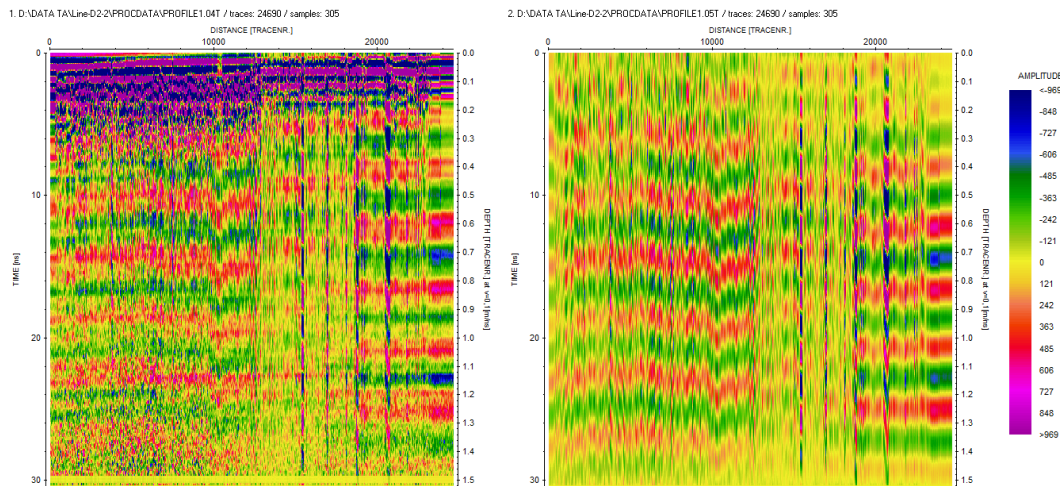
Background Removal ini berguna untuk menghilangkan *noise* yang muncul dalam radargram secara konsisten sehingga *noise* ini dapat menutupi frekuensi yang sebenarnya dengan cara menghilangkan energi koheren horizontal. untuk hasil *background removal* ditunjukkan pada Gambar 19 sebagai berikut.



Gambar 19. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses *background removal* (kanan)

f. *Bandpass Frequency*

Pada tahap proses ini dilakukan untuk menghilangkan frekuensi atau *noise* yang tidak diinginkan. Frekuensi yang dipilih akan dilakukan *filtering* berdasarkan waktu penjalaran frekuensi yang diperlukan.

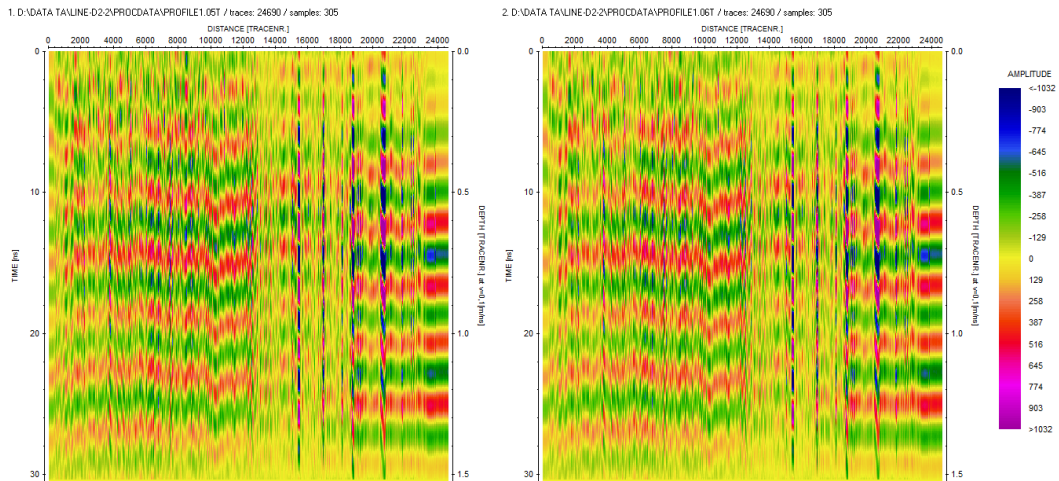


Gambar 20. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses *bandpass frequency* (kanan)

Pada filter parameter menunjukkan nilai batas frekuensi yang akan dipotong meliputi *lower cutt off*, *lower plateau*, *upper plateau*, dan *upper cut off*. Untuk hasil dari proses *bandpass frequency* dapat dilihat pada Gambar 20.

g. *F-K filter*

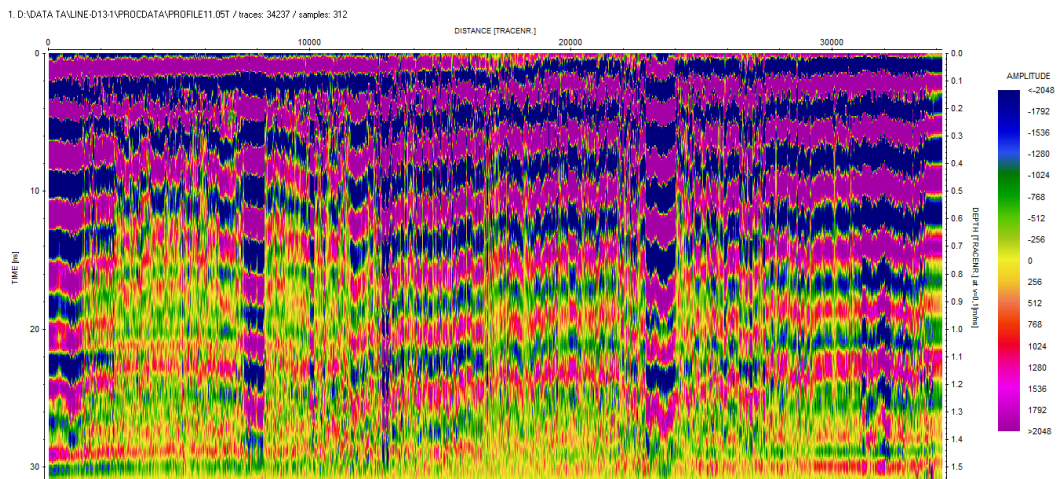
Pada tahap ini dilakukan untuk menghilangkan suatu *noise* pada data radargram yang belum dihilangkan sepenuhnya pada proses sebelumnya. F-K filter akan ditentukan kedalam domain bilangan gelombang dan frekuensi ke data yang dipilih pada rentang tertentu. Pada tahap ini akan dipilih frekuensi tertentu yang diharapkan sesuai dengan sinyal *reflector*. Untuk hasil sebelum dan sesudah dilakukan F-K *filter* yaitu sebagai berikut.



Gambar 21. Tampilan sebelum (kiri) dan setelah proses *fk-filter* (kanan)

h. *Migration/time depth Conversion*

Pada proses ini yaitu mentransformasikan satuan kedalaman yang berupa satuan waktu ke satuan jarak. Transformasi ini dilakukan berdasarkan distribusi kecepatan tertentu pada setiap lapisan. Kemudian kecepatan dari masing-masing lapisan kemungkinan dapat merubah bentuk sinyal dan juga besar frekuensi sinyal yang muncul. Berikut untuk tampilan sebelum dan sesudah dilakukan *time depth conversion*.



Gambar 22. Tampilan sebelum dilakukan *time depth conversion*



Gambar 23. Tampilan setelah dilakukan *time depth conversion*

4.4 Interpretasi

Setelah dilakukan pengolahan data maka dari itu tahap selanjutnya yaitu melakukan interpretasi. Interpretasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui informasi yang terkandung pada setiap data yang diperoleh dari hasil pengukuran dan juga pengolahan data. Dalam metode GPR (*Ground Penetrating Radar*) hasil pengolahan data ditampilkan dalam bentuk radargram. Dari data radargram setiap lintasan menunjukkan intensitas warna yang berbeda-beda, intensitas warna pada tampilan radargram merupakan pencitraan dari kuat lemahnya amplitudo tiap lintasan. Sehingga semakin kuat intensitas warna maka akan semakin kuat pula amplitudo yang muncul pada radargram, dan sebaliknya. Pada tiap-tiap refleksi yang terekam pada radargram menggambarkan kondisi lapisan bawah permukaan dari daerah penelitian.

Retakan pada beton umumnya ditunjukkan dalam radargram sebagai gangguan atau patahan pada pola refleksi. Pola refleksi yang normal biasanya tampak sejajar dan berulang, sementara keberadaan retakan akan menghasilkan refleksi putus-putus atau terdistorsi pada kedalaman tertentu, anomali gelombang yang menunjukkan terjadinya perubahan densitas atau pemisahan antar lapisan beton, pola gelombang tidak teratur yang melintang atau sejajar dengan permukaan, retakan dapat bersifat vertikal, horizontal,

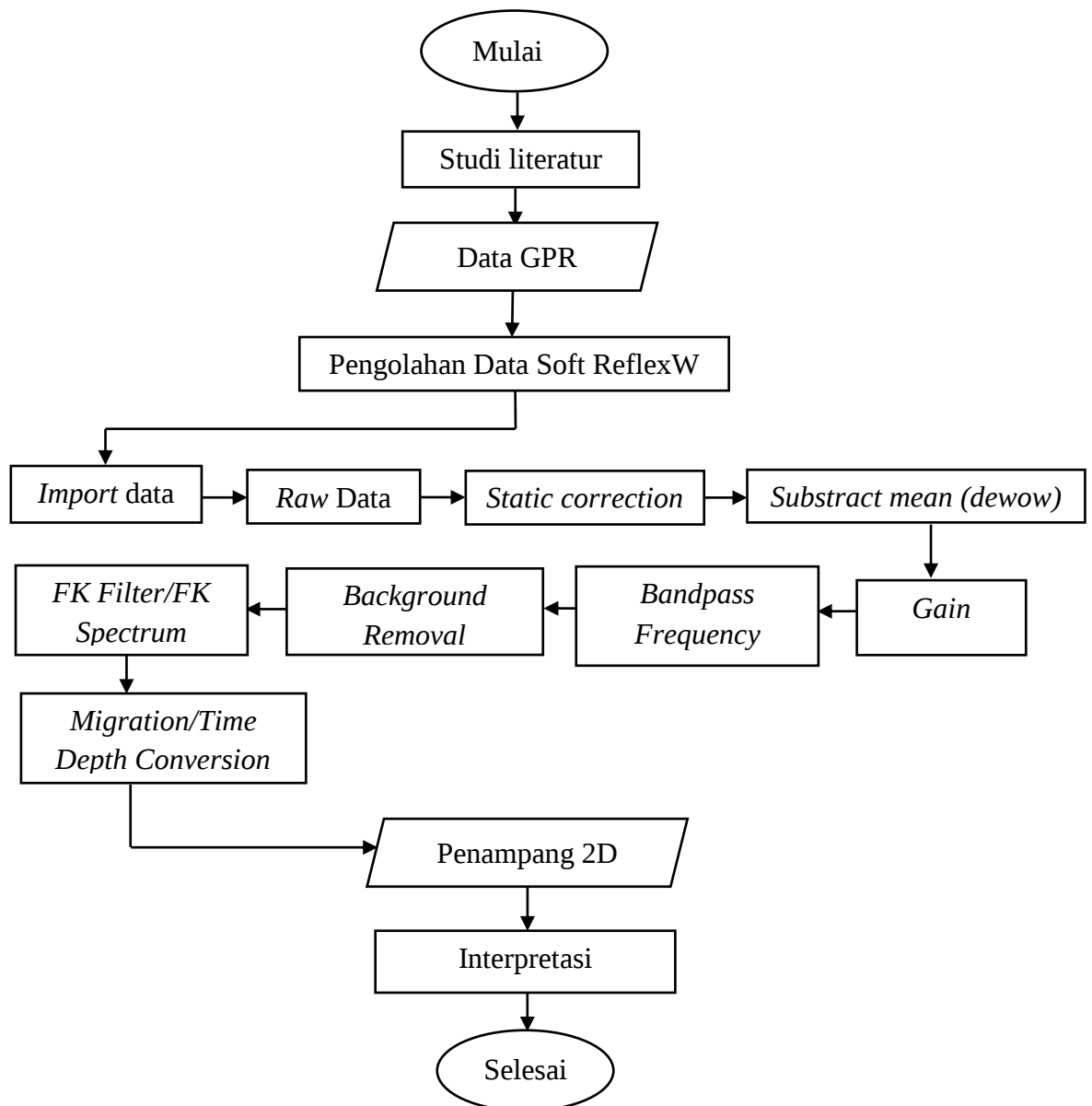
atau miring, dan pola tersebut akan divisualisasikan serta dianalisis untuk mengetahui arah retak, panjang, dan kedalamannya.

Deformasi struktur beton ditunjukkan oleh perubahan geometri dari pantulan gelombang dalam radargram. Beberapa indikasi deformasi meliputi pola refleksi melengkung atau bergelombang, menandakan adanya lendutan atau penurunan elemen struktur akibat beban berlebih. Ketebalan lapisan beton yang bervariasi, yang bisa menandakan pelapukan atau tekanan diferensial di bawah struktur dan perubahan pola pantulan yang konsisten dalam suatu zona, yang menunjukkan adanya pergeseran atau deformasi lokal pada pelat atau balok beton. Deformasi ini penting untuk dianalisis karena dapat menjadi awal dari kegagalan struktural, terutama di area dermaga yang menerima beban dinamis tinggi.

Tulangan baja dalam beton memiliki pantulan khas pada radargram. Ketika korosi terjadi, pantulan tersebut akan mengalami perubahan, yang dapat dikenali melalui penurunan amplitudo refleksi pada area yang seharusnya menunjukkan keberadaan rebar. Distorsi pola pantulan di sekitar rebar terjadi karena korosi mengganggu homogenitas beton. Kerusakan permukaan yang teridentifikasi melalui interpretasi GPR (*Ground Penetrating Radar*) berpotensi mempercepat proses korosi pada tulangan baja, terutama jika retakan tersebut memungkinkan masuknya air dan ion klorida ke dalam struktur beton.

4.5 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian kali ini yaitu seperti pada Gambar 23.



Gambar 24. Diagram alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berdasarkan pengolahan data yang telah dilakukan bahwasannya indikasi keretakan beton berada pada kedalaman dangkal hingga menengah yaitu bagian pelat atau balok atas, pada kedalaman sekitar 0-1,5 meter yang ditunjukkan oleh refleksi radar tidak kontinu, terputus, serta adanya perubahan amplitudo lokal pada beberapa lintasan sebesar $\pm 30-60\%$.
2. Berdasarkan pengolahan data GPR (*Ground Penetrating Radar*) deformasi beton terindikasi pada balok utama atau pelat dengan kedalaman sekitar 0,5-1,5 meter yang ditandai dengan distorsi dan juga pelengkungan pola refleksi radar yang menyimpang dari susunan lapisan beton normal, serta menunjukkan adanya perubahan geometri internal beton.
3. Berdasarkan hasil dari beberapa lintasan, korosi disebabkan oleh masuknya air dan zat agresif melalui retakan beton sehingga indikasi korosi tulangan beton ditemukan pada zona tulangan balok atau kolom bawah dengan kedalaman sekitar 0,6-1,4 meter hingga $\pm 1,6$ meter, yang ditunjukkan oleh perubahan amplitudo refleksi yang tidak seragam di sekitar zona tulangan sebesar $\pm 20-50\%$, yang mengindikasikan degradasi material beton akibat proses korosi.

6.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dalam melakukan pengolahan data hasil interpretasi disarankan menggunakan metode non-destruktif atau destruktif lain untuk memastikan kembali jenis dan tingkat kerusakan beton serta disarankan menambah

jumlah lintasan GPR agar pola retakan, deformasi, dan indikasi korosi tulangan teridentifikasi dengan lebih menyeluruh. Atau dengan dilakukan kolaborasi antara metode GPR dengan metode geofisika lainnya seperti *Seismic Refraction* atau *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) untuk dapat memberikan validasi silang terhadap indikasi retakan, deformasi, dan korosi, serta memperluas cakupan analisis struktur beton secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, S., Arya, P., & Iryanti, M. (2016). Aplikasi Metode Ground Penetrating Radar Terhadap Pola Retakan Di Bendungan Batu Tegi Lampung. *Wahana Fisika*, 1(1), 32-41.
- Allen, J. R. L. (1979). Studies in fluviatile sedimentation: an elementary geometrical model for the connectedness of avulsion-related channel sand bodies. *Sedimentary Geology*, 24(3-4), 253-267.
- American Concrete Institute. (2008). *Control of cracking in concrete structures (ACI 224.2R-08)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Annan, A.P. (2001). Ground Penetrating Radar Workshop Notes. Canada.pp 118-131.
- Arisona, A. (2009). Migrasi data georadar dengan metode pergeseran fasa. *Jurnal Aplikasi Fisika*, 5(1).
- Astutik, S. (2001). Penggunaan Ground Penetrating Radar (GPR) Sebagai Metal Detector. *Jurnal ILMU Dasar*, 2(1), 9-16.
- Bahri, Ayi Syaeful, Supriyanto, Sentosa, B, J. (2009). Penentuan Karakteristik Dinding Gua Seropan Gunung Kidul dengan Metode Ground Penetrating Radar. *Jurnal Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 1-12.
- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. (Eds.). (2005). Sumatra: geology, resources and tectonic evolution. Geological Society of London.
- Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar, 2nd edn., The Institute of Engineering and Technology, London, UK.
- Davis, J. L. dan Annan, A.P. (1989). Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 37 (5): 531-551.
- Derobert, X. Villain, G (2017). *Effect of water and chloride contents and carbonation on the electromagnetic characterization of concretes on the GPR frequency band through designs of experiment*. Elsevier.

- Hall, R. (1997): Cenozoic Plate Tectonic Reconstruction of SE Asia, Geological Society of London, Special Publication, 126, 11-23.
- Hall, R. (2002): Cenozoic Geological and Plate tectonic Evolution of SE Asia and the SW Pasific: Computer Based Reconstruction, Model and Animation, *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353-356.
- Hall, R. (2014): Indonesia tectonics: subduction, extention, provenance, and more, Indonesian Petroleum Association, Proceedings 38th Annual Exhibition and Convention, Jakarta, Indonesia, IPA14-G-360.
- Hamilton, W. B. (1979). Tectonics of the Indonesian region. Professional Paper 1078. *US Govt. Print. Off.*, 345pp.
- Hidayat, S., & M, A. S. (2009). Semen : Jenis & Aplikasinya. Jakarta: Kawan Pustaka.
- Isneini, M. (2009). Kerusakan dan kekuatan struktur beton bertulang. *Jurnal Rekayasa*, 13(3).
- Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.
- Kearey, P., Brooks, M., dan Hill, I. (2002). *An Intoduction to Geophysical Exploration 3rd edition*. United State of America: Blackwell Science Ltd.
- Kunz, K. S., & Luebbers, R. J. (1993). *The finite difference time domain method for electromagnetics*. CRC press.
- Lane, J. W., Haeni, F. P., & Versteeg, R. (1998). Use of a multi-offset borehole-radar reflection method in fractured crystalline bedrock at Mirror Lake, Grafton County, New Hampshire. *Journal of Applied Geophysics*, 39(3), 359–368.
- Ligthart, L. P., & E. E. (2004). *Lecture notes for the intensive course on ground penetrating radar*.
- Lehmann, Frank and Green, Alam G. (1999). Semi-Automated Georadar Data Acquisition In Three Demensions. Switzerland-swiss Federal *Institute Of Technology, Institute Of Geophysics*, ETH-Honggerberg, CH-8093 Zurich.
- Luga, A., Ivansyah, O., & Muliadi. (2019). Identifikasi Pipa Metal Bawah Permukaan Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR). *Prisma Fisika*, 7, 20-29.
- Marleny, F., Fitriansyah, M., Saputri, W. A. N., & Ansari, R. (2023). Segmentasi Citra Keretakan Dinding Beton Menggunakan Teknik Perbandingan Evaluasi Metrik. *TEMATIK*, 10(1), 28-33.

- Mangga, S. A., Suwarti, T., & Gafoer, S. (1993). Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatera, skala 1: 250.000.
- McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2005). *Design of reinforced concrete: ACI 318-05* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Mulyono, T. (2004). Teknologi Beton (edisi kedua). *Penerbit Andi Offset, Yogyakarta*.
- Musset, A. E., dan Khan, M. A. (1993). *Looking Into the earth*. Buku. Cambridge University Press.
- Nasional, B. S. (2000). Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. *SK SNI*, 3, 2834-2000.
- Pasasa, L. (1999). Modelling of Ground Penetrating Radar Data. PIT HAGI ke - 24. Surabaya.
- Putra, E. H. (2021). *Beton Sebagai Material Konstruksi*. Gre Publishing.
- Putranto, I. D., & Sumargana, L. (2022). Penggunaan Metode GPR 2D Untuk Identifikasi Korosi Tulangan Besi Beton Penahan Air di Lokasi X. *PRISMA FISIKA*, 10(3), 451-455.
- Quan, Y., & Harris, J. M. (1997). Seismic attenuation tomography using the frequency shift method. *Geophysics*, 62(3), 895–905.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics (2nd Editio)*. Wiley-Blackwell.
- Saputra Gunawan, A., Taran, R., Sudjarwo, P., dan Buntoro, J. (2014). Identifikasi Penyebab Kerusakan pada Beton dan pencegahannya. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 3(2), 1–7.
- Siregar, H. E. A. (2016). Ground Penetrating Radar Data Analysis By Using Modelling With Finite Difference Method: Case Study In Belawan Port
- Sulardi, S. (2017). Menentukan Kualitas Hasil Perbaikan Beton Bangunan Dermaga Dengan Metode Inspeksi Teknik. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 6(1), 23-29.
- Supriyanto, E., & Fisika-FMIPA, D. (2007). Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi. *Diklat Jurusan Fisika Komputasi Universitas Indonesia*.

- Syahril. (2007). Studi Rekahan Pada Terowongan Kereta Api dengan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) (Studi Kasus di Daerah Sasaksaat) Padalarang Jawa Barat. *Jurnal Geliga Sains*. 1 (2):36-44.
- Syamsurijal, G. R., Rasimeng, S., Yogi, I.B.S., Fikri, A. dan Alhadi, A. (2022). Spun Pile Identification of Buildings Using The Ground Penetrating Radar Method (GPR). *The 47th Annual Scientific Meeting of Himpunan Geofisika Indonesia*. Malang: 10-13 Oktober 2022.
- Timotius. Putra, Y. S., & Lapanporo, B. P. (2014). Identifikasi Keretakan Beton Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas. *Prisma Fisika*, 2(3).
- Tjakranata, L. (2021). *Short course: Asesmen struktur gedung dan jembatan beserta permasalahannya*.
- Tjokrodimujo, K., (2007). Teknologi Beton, Biro Penerbit KMTS FT UGM, Yogyakarta.
- Van Overmeeren, R.A. (1997). Radar Facies of Uncosolidated Sediments in The Netherlands: A Radar Startigraphy Interpretation Method For Hydrogeology. 2600 JA Delf, The Netherlands. *Geophysics* 30: 1-18.
- Woodson, R. D. (2009). *Concrete structures: Protection, repair and rehabilitation*. Elsevier.
- Yulius, Y., Wahyu, Y. dan Oktafiani, F. (2008). Studi Pemrosesan dan Visualisasi Data Ground Penetrating Radar. *Jurnal Informatika, Sistem Kendali, dan Ilmu Komputer*. 2(1):2-4.