



TESIS SF 142502

**IDENTIFIKASI SEDIMENTASI DAN EROSI BADAN
SUNGAI BENGAWAN SOLO MENGGUNAKAN
METODE *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR) DI
DESA KANOR, BOJONEGORO**

**MOH HASAN BASRI
NRP. 1113 201 038**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng
Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si, M.Si**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN FISIKA BUMI
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



TESIS SF 142502

**IDENTIFICATION OF SEDIMENTATION AND
EROSION SOLO RIVER BOARD USING *GROUND
PENETRATING RADAR* (GPR) IN VILLAGE
KANOR, BOJONEGORO**

**MOH HASAN BASRI
NRP. 1113 201 038**

ADVISOR

**Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng
Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si, M.Si**

**MAGISTER PROGRAM
STUDY OF EARTH SCIENCE
DEPARTEMENT OF PHYSICS
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**

**IDENTIFIKASI SEDIMENTASI DAN EROSI BADAN SUNGAI
BENGAWAN SOLO MENGGUNAKAN METODE *GROUND
PENETRATING RADAR (GPR)* DI DESA KANOR, BOJONEGORO**

Nama Mahasiswa : Mohammad Hasan Basri

NRP : 1113201038

Jurusan : Fisika FMIPA-ITS

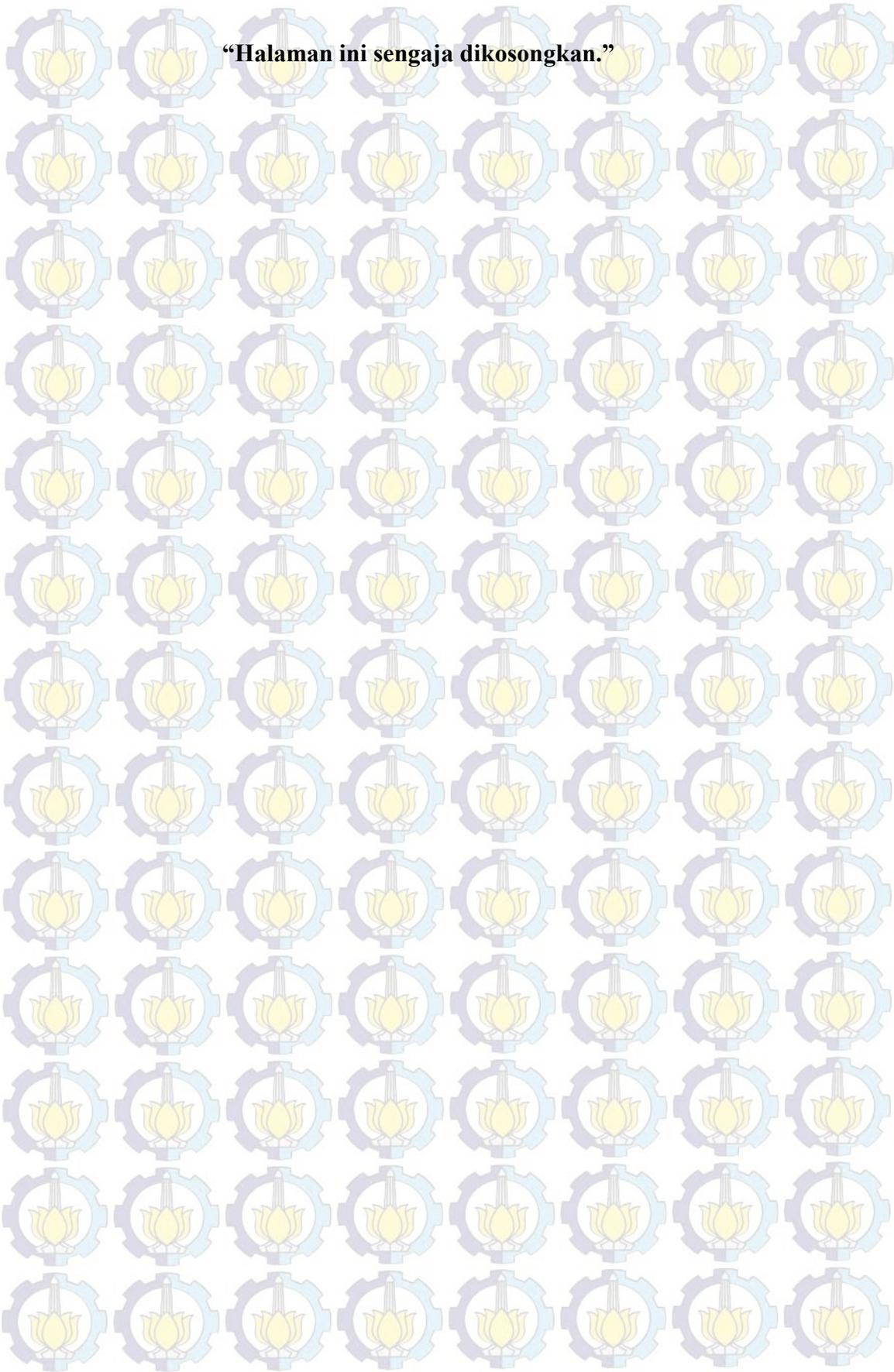
Dosen Pembimbing : Dr. Yono Hadi Pramono, M. Eng.

Dr. Dwa Desa Warnana, M.Si

ABSTRAK

Metode *Ground Penetrating Radar* telah digunakan pada penelitian ini untuk mengidentifikasi *sedimentasi* dan erosi pada badan Sungai Bengawan Solo di Desa Kanor, Kabupaten Bojonegoro. Antena GPR yang digunakan adalah frekuensi 90 MHz. Keuntungan menggunakan antena ini adalah penetrasi ke dalam permukaan yang cukup dalam (10-20 meter). Pola refleksi gelombang elektromagnetik yang didapatkan nantinya akan menggambarkan sistem perlapisan *sedimentasi* dan *scouring* Sungai Bengawan Solo. Hasil interpretasi mengenai kondisi struktur bawah permukaan dan erosi pada Sungai Bengawan Solo dan dibandingkan dengan hasil data bor secara umum didapatkan bahwa lintasan 1 pada kedalaman 2,5-7,5 meter terlihat reflector yang teratur dengan horizon yang tajam, diinterpretasikan sebagai pasir. Kemudian lintasan 2 pada kedalaman 1 sampai 7,5 meter terdapat pasir berlempung dan pada kedalaman 7,5 sampai 20 meter merupakan pasir berlanau. Selain itu didapatkan juga fenomena yang menunjukkan pasir berselingan dengan lempung pada kedalaman 1-7,5 meter pada lintasan 3. Sedangkan hasil identifikasi menunjukkan bahwa Sungai Bengawan Solo memiliki pola *sedimentasi fluvial* yang didominasi oleh lempung, pasir dan lanau. Terdapat lintasan yang mempunyai sejarah *scouring* yang menyebabkan proses erosi, pengendapan dan *sedimentasi* tidak seimbang terlihat pada radagram pada kanor.

Kata kunci : sedimentasi, scouring, GPR, Badan Sungai



“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

IDENTIFICATION OF SEDIMENTATION AND EROSION SOLO RIVER BOARD USING GROUND PENETRATING RADAR (GPR) IN VILLAGE KANOR, BOJONEGORO

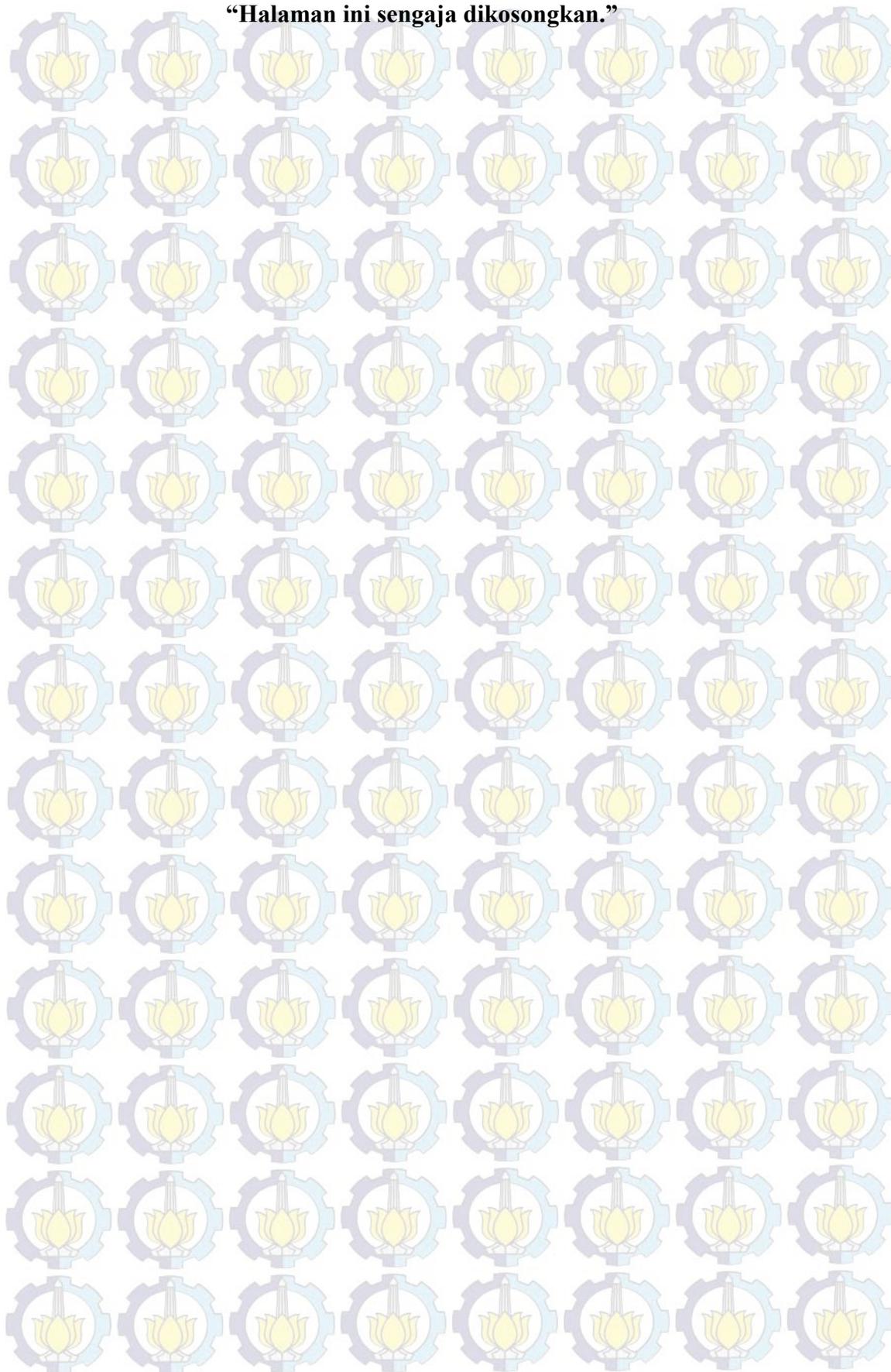
Name : Mohammad Hasan Basri
NRP : 1113201038
Department : Fisika FMIPA-ITS
Thesis Advisor : Dr. Yono Hadi Pramono, M. Eng.
Dr. Dwa Desa Warnana, M.Si

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar method has been used in this study to identify *sedimentation* and erosion on the body of the Solo River in the village of Kanor, Bojonegoro. GPR antenna used is the frequency of 90 MHz. The advantage of using this antenna is penetration into the surface deep enough (10-20 meters). Pattern reflection of electromagnetic waves obtained will describe the system bedding sedimentation and *scouring* Solo River. Results of interpretation on the condition of subsurface structures and erosion on the river Bengawan Solo and compared with the results of the drill data generally shows that track 1 at a depth of 2.5-7.5 meters are visible reflector regularly with sharp horizon, interpreted as sand. Then the track 2 at a depth of 1 to 7.5 meters are argillaceous and sand at a depth of 7.5 to 20 meters of a sand berlanau. In addition it also obtained phenomena that demonstrate alternating sand with clay at a depth of 1 to 7.5 meters on the track 3. While the identification result reveals that the Solo River *fluvial sedimentation* patterns dominated by clay, sand and silt. There is a path that has a history *scouring* which led to the erosion, precipitation and *sedimentation* unbalanced look at radagram on Kanor.

Keyword : sedimentation, scouring, GPR, Rivers Agency

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Mohammad Hasan Basri

NRP. 1113201038

Tanggal Ujian : 26 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :

1. **Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng.**
NIP : 19690904 199203.1.003


(Pembimbing I)

2. **Dr. Dwa Desa Warnana, S.Si, M.Si.**
NIP: 19760123 200003.1.001


(Pembimbing II)

3. **Dr.rer.nat. Eko Minarto, M.Si.**
NIP: 19750205 199903.1.004


(Penguji)

4. **Dr. Melania Suweni Muntini, MT.**
NIP: 19641229 199002.2.001


(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 19640405 199002 1 001

KATA PENGANTAR

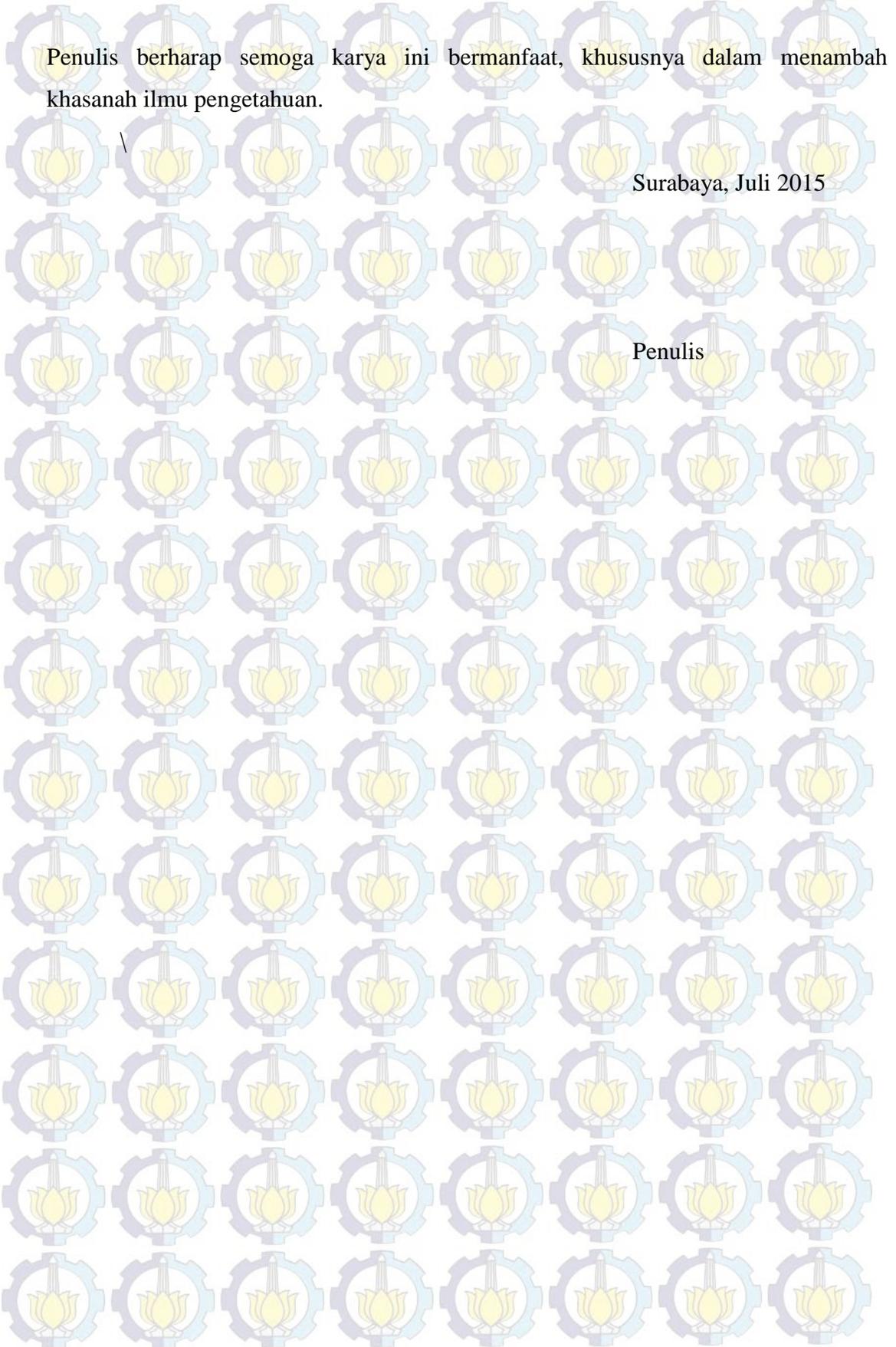
Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, yang melimpahkan segala rahmat-Nya. Semoga shalawat dan salam senantiasa terlimpahkan kepada junjungan kita, yakni Nabi besar Muhammad S.A.W, keluarga Rosulullah, para sahabat dan pengikutnya hingga datang hari kiamat. Alhamdulillah Rabbil Alamin, atas limpah Rahmat, Petunjuk, dan Pertolongan Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **“Identifikasi Sedimentasi dan Erosi Badan sungai Bengawan Solo menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR) Desa Konor Bojonegoro”**.

Tesis ini merupakan hasil penelitian sebagai salah satu syarat untuk menempuh gelar Magister Sains (M.Si) pada Program Studi Magister Fisika Bidang Keahlian Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut teknologi Sepuluh November Surabaya. Penulis menyadari bahwa tesis ini dapat diselesaikan dengan baik atas bimbingan dan arahan maupun bantuan materi dari pihak lain. Seiring dengan itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng, selaku kepala jurusan, dosen wali sekaligus pembimbing tesis yang telah memberikan saran, bimbingan serta motivasi kepada penulis dengan sabar dan penuh perhatian, sehingga penulisan tesis ini berjalan dengan baik dan lancar.
2. Dr. Dwa Desa Warnana S.Si, M.Si, selaku dosen pembimbing tesis yang telah memberikan saran, bimbingan serta motivasi kepada penulis dengan sabar dan penuh perhatian, sehingga penulisan tesis ini berjalan dengan baik dan lancar.
3. Dr.rer.nat Eko Minarto, M.Si, selaku dosen penguji I tesis yang telah memberikan saran, bimbingan dan semangat untuk menulis sebaik mungkin, sehingga tesis ini bisa menjadi lebih baik.

4. Dr. Melania Suweni Muntini , M.T, selaku dosen penguji II tesis yang membantu dalam memberikan saran dan masukan dalam penyelesaian tesis ini
5. Bapak Prof Eddy Yahya, PhD, selaku coordinator Program Studi Magister Jurusan Fisika FMIPA ITS Surabaya.
6. Seluruh Staf Pengajar di Jurusan Fisika ITS, terima kasih atas ilmu pengetahuan, arahan, dan motivasinya yang semoga bermanfaat.
7. Seluruh staf administrasi, staf Laboratorium dan staf ruang baca fisika FIMPA ITS Surabaya yang telah memberikan pelayanan dengan baik.
8. Bapak Abdullah Fuad, M.Si selaku Kepala Laboratorium Universitas Negeri Malang (UM) yang telah membantu peminjaman alat dan pengambilan data eksplorasi yang telah dilakukan oleh peneliti.
9. Kedua orang tua, Bapak Muhammad Syamsuri dan ibuku Ruhama serta saudaraku Rodi Khoirul Basori dan Mohammad Rifki atas segala perhatian dukungan, semangat dan do'anya yang tulus dan ikhlas.
10. Semua guru yang pernah mendidik dan mengajar penulis, terima kasih ilmu, nasehat, serta do'anya yang Insya Allah dikhijabahi. Semoga menjadi ilmu yang bermanfaat.
11. Sahabat-sahabatku , Rohim Aminullah Firdaus , Nurhadi, dan Crismast Antoni yang telah memberikan bantuan, motivasi dan arahan serta do'a nya selama penulis melaksanakan studi di ITS.
12. Teman-teman di Optoelektronika dan Geofisika serta lainnya atas bantuan dan kerjasamanya.
13. Semua teman S-2 angkatan 2013 Program Pascasarjana Fisika ITS Surabaya atas semua bantuan dan kerjasamanya.
14. Semua pihak yang tidak mungkin disebutkan satu-persatu, yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan tesis ini.

Tak ada gading yang tak retak, penulis yakin masih banyak kekurangan yang masih harus disempurnakan dari penulisan tesis ini. Semoga tulisan ini bisa mendorong kita menjadi lebih baik dalam mengembangkan fisika di masa mendatang.



Penulis berharap semoga karya ini bermanfaat, khususnya dalam menambah khasanah ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2015

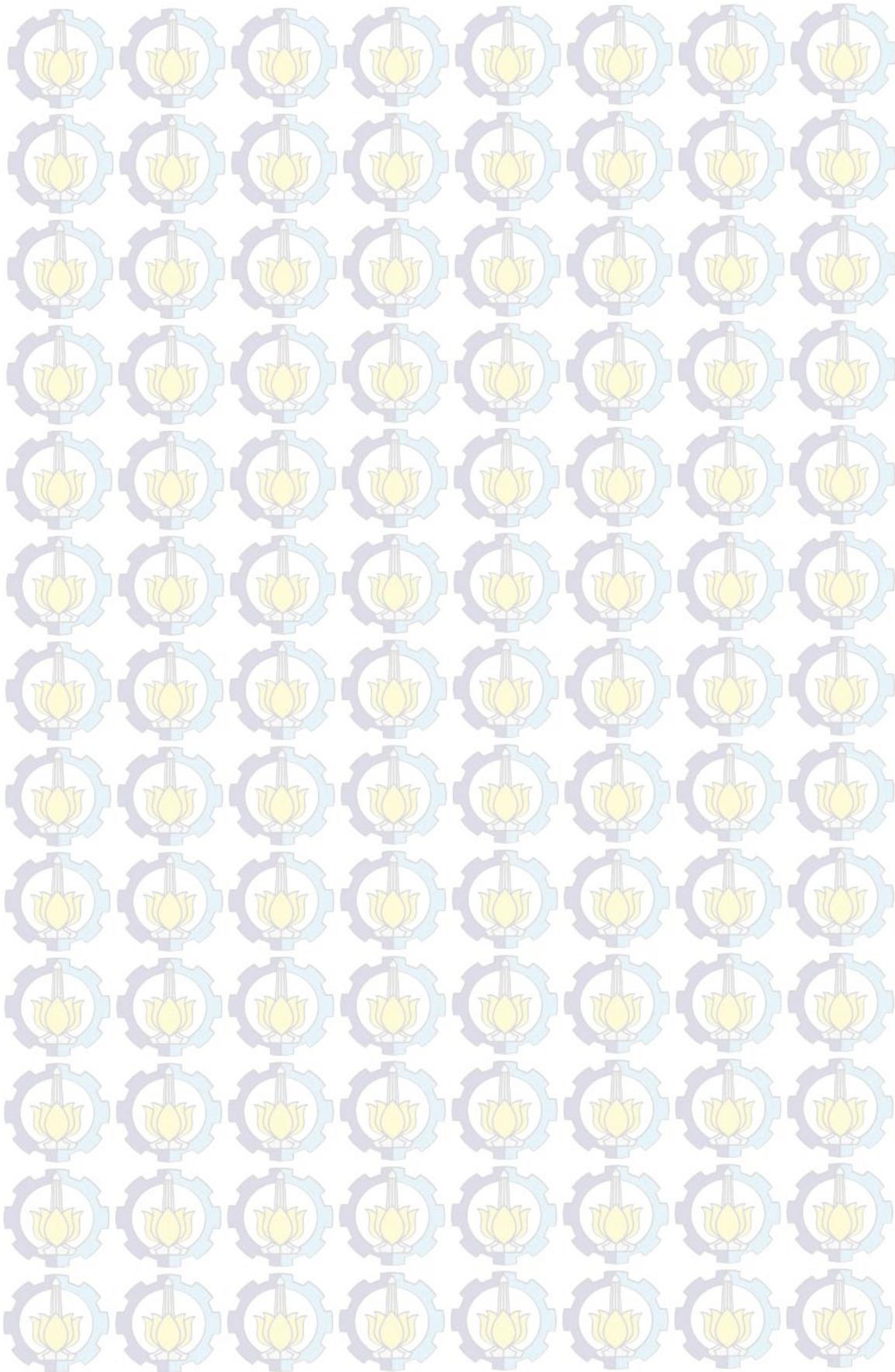
Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I : PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	3
1.3. Batasan Permasalahan	3
BAB II : DASAR TEORI	5
2.1. Karakteristik dan Morfologi Sungai	5
2.1.1. Karakteristik Sungai.....	5
2.1.2. Daerah Aliran Sungai (<i>Catchment Area</i>).....	7
2.1.3 Denah Sungai	9
2.2 <i>Sedimentasi</i>	12
2.2.1. Pengertian <i>Sedimentasi</i>	12
2.2.2. Klasifikasi Lingkungan sedimentasi (<i>Depositional Environment Sedimentary</i>).....	13
2.2.3. <i>Scouring</i>	17
2.3 <i>GROUND PENETRATING RADAR (GPR)</i>	18
2.3.1. Prinsip Dasar GPR.....	19
2.3.2. Gelombang Elektromagnetik.....	20
2.3.3. Koefisien refleksi	22
2.3.4. <i>Skin depth</i>	24
2.4 Data Penelitian yang terdahulu pada Sungai Bengawan Solo.....	25
2.4.1 Penelitian di Desa Widang.....	25
2.4.2 Penelitian di Desa Kedung Harjo.....	26

	2.4.3 Perencanaan Peningkatan Kapasitas <i>Floodway</i> Pelangwot-Sedayulawas Sungai Bengawan Solo.....	26
	2.4.4 Identifikasi Zona Rawan Banjir Menggunakan Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus: Sub DAS Dengkeng).....	27
	2.5 Penerapan GPR di Sungai.....	29
BAB III	: METODOLOGI	31
	3.1. Kondisi Umum Daerah Penelitian	31
	3.1.1. Pemilihan Lokasi.....	31
	3.1.2. Kondisi Geomorfologi.....	31
	3.1.3 Stratigrafi.....	32
	3.2. Akuisisi Data GPR	32
	3.2.1. <i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i>	32
	3.2.2 Cara Kerja Dari <i>Ground Penetrating Radar (GPR)</i>	34
	3.2.3. Pengambilan Data	35
	3.3. Pengolahan Data	38
	3.3.1. <i>Import Data</i>	38
	3.3.2. <i>Filtering</i>	39
	3.3.3. <i>Predictive Dekonvolusi</i>	41
	3.4. Interpretasi Data	42
BAB IV	: ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	45
	4.1. Analisa Data.....	45
	4.2 Pembahasan	52
	4.2.2. Interpretasi.....	53
BAB V	: KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
	5.1 Kesimpulan.....	62
	5.2 Saran.....	63
	DAFTAR PUSTAKA	55
	DAFTAR LAMPIRAN.....	68

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



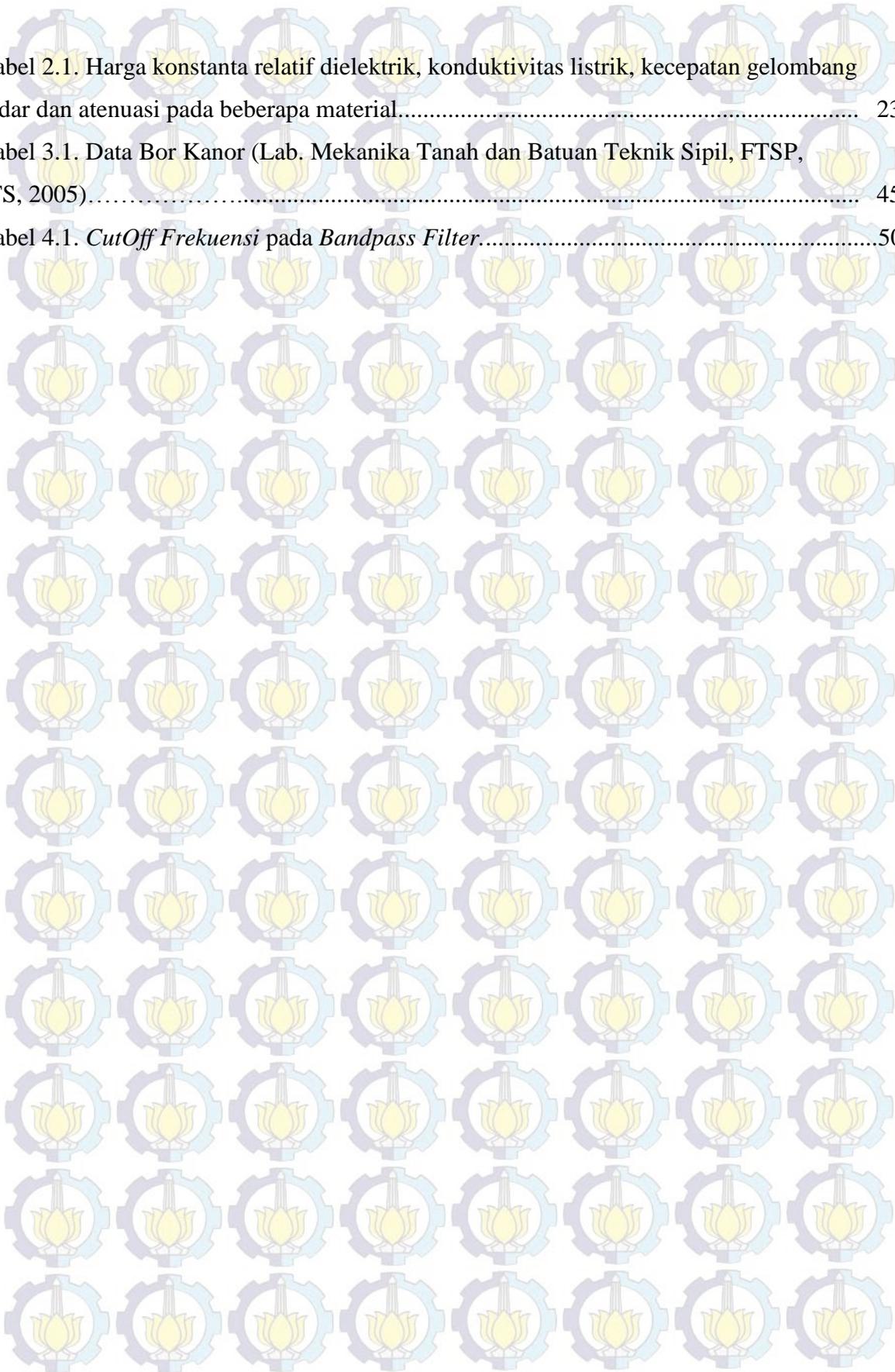
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 tanah yang mulai longsor.....	2
Gambar 2.1. Sungai <i>Perennial</i>	5
Gambar 2.2. Sungai <i>Intermittent</i>	6
Sungai 2.3. Sungai <i>Ephemeral</i>	6
Gambar 2.4. Daerah Aliran Sungai (<i>Catchment Area</i>).....	7
Gambar 2.5 Sungai Ideal.....	10
Gambar 2.6 Sungai Lurus.....	10
Gambar 2.7 Sungai berbelok.....	11
Gambar 2.8 Pertumbuhan <i>meander</i>	11
Gambar 2.9 Sungai berkelabang.....	12
Gambar 2.10 Hasil sedimentasi <i>alluvial fans</i>	14
Gambar 2.11 Hasil pengendapan <i>Fluvial</i>	14
Gambar 2.12 Sistem lingkungan pengendapan <i>continental</i>	15
Gambar 2.13 Pengendapan <i>Delta</i>	16
Gambar 2.14. <i>Scouring</i> pada sedimentasi sungai.....	17
Gambar 2.15. Salah satu contoh hasil penampang GPR yang menunjukkan adanya <i>scouring</i> di dasar sungai.....	18
Gambar 2.16. Ilustrasi penjalaran gelombang elektromagnetik.....	23
Gambar 2.17 Prinsip Pengukuran GPR dan Radagram.....	29
Gambar 2.18 <i>Rawdata Radagram</i>	30
Gambar 3.1. Peta Geomorfologi Kabupaten Bojonegoro.....	32
Gambar 3.2. Ilustrasi <i>Radar Reflection Profiling</i>	34
Gambar 3.3. <i>Control Unit GPR</i>	34
Gambar 3.4. <i>Trasmitter dan Receiver</i> pada <i>GPR</i>	35
Gambar 3.5. Alur kerja <i>GPR</i>	36
Gambar 3.7. Ilustrasi Akuisisi Data.....	38
Gambar 3.8. Posisi Lintasan Dalam Foto Satelit.....	39
Gambar 3.9. Diagram alir kerja pengolahan data	40
Gambar 3.10. Tampilan menu import data.....	41
Gambar 3.11. Tampilan menu <i>Substract Mean Dewow</i>	42
Gambar 3.12. Tampilan menu <i>Background Removal</i>	42

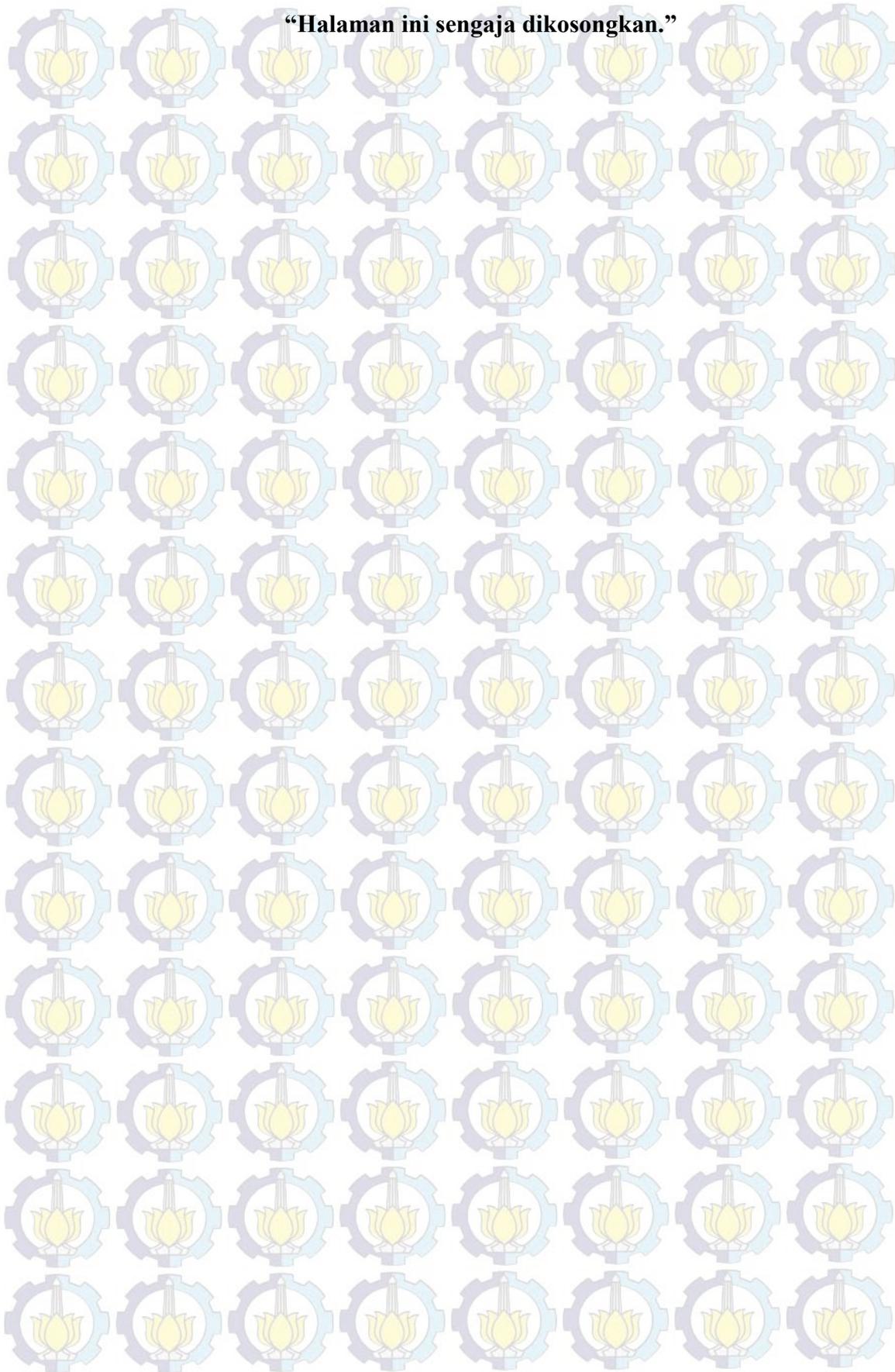
Gambar 3.13. Tampilan menu <i>Bandpass Filter</i>	43
Gambar 3.14. Tampilan menu <i>Predictive Deconvolution</i>	44
Gambar 3.15. Tipe sedimen sungai dengan menggunakan GPR (Beres Haeni, 1991).....	45
Gambar 4.1. Tampilan menu import data lintasan 1.....	46
Gambar 4.2. <i>Raw Data</i> lintasan 1.....	47
Gambar 4.3. Tampilan menu <i>Substract Mean Dewow</i> lintasan 1.....	48
Gambar 4.4. Tampilan menu <i>Background Removal</i> lintasan 1.....	49
Gambar 4.5. <i>CutOff Frekuensi</i>	49
Gambar 4.6. Tampilan menu <i>Bandpass Filter</i> lintasan 1.....	50
Gambar 4.7. Tampilan menu <i>Predictive Deconvolution</i> lintasan 1.....	52
Gambar 4.8. Penampang radagram GPR Kanor 1 yang dikorelasikan dengan data bor.....	54
Gambar 4.9. Penampang radagram GPR Kanor 2 yang dikorelasikan dengan data bor.....	55
Gambar 4.10. Penampang radagram GPR Kanor 3 yang dikorelasikan dengan data bor.....	56
Gambar 4.11. Penampang radagram GPR Kanor 4 yang dikorelasikan dengan data bor.....	58
Gambar 4.12. Penampang radagram GPR Kanor 5 yang dikorelasikan dengan data bor.....	59
Gambar 4.13. Penampang radagram GPR Kanor 6 yang dikorelasikan dengan data bor.....	61
Gambar 4.14. Peta Google Maps dari hasil interpretasi.....	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Harga konstanta relatif dielektrik, konduktivitas listrik, kecepatan gelombang radar dan atenuasi pada beberapa material.....	23
Tabel 3.1. Data Bor Kanor (Lab. Mekanika Tanah dan Batuan Teknik Sipil, FTSP, ITS, 2005).....	45
Tabel 4.1. <i>CutOff Frekuensi pada Bandpass Filter</i>	50



“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan piranti dan teknologi elektronika dalam beberapa tahun ini, telah melahirkan suatu metode yang relative baru dalam dunia eksplorasi geofisika, yaitu *Ground Penetrating Radar (GPR)*. Perkembangan piranti elektronika juga mempengaruhi perkembangan piranti radar yang digunakan dalam eksplorasi.

Karakteristik antara radiasi gelombang elektromagnetik pada medium/struktur bumi (diteruskan, dihamburkan dan dipantulkan) ditentukan oleh kontras parameter fisika, yaitu : permeabilitas magnetic, permetivitas listrik, serta konduktivitas. Pulsa radar diteruskan, dipantulkan dan dihamburkan oleh struktur bawah permukaan dan oleh adanya anomaly bawah permukaan. Keunggulan yang dimiliki metode georadar ini antara lain adalah ke akurataannya dalam mendeteksi/memetakan struktur bawah permukaan.

Berdasarkan uraian tersebut dalam penelitian ini kami memanfaatkan keunggulan metode georadar untuk melihat kontras antara bidang gelincir tanah longsor dengan material longsor yang ada diatas bidang gelincir dengan mengamati parameter kecepatan gelombang elektromagnetik dalam suatu medium.

Beberapa jenis perkuatan tersebut telah dilaksanakan pada tanggul Bengawan Solo, namun banyak yang mengalami kegagalan. Kegagalan tersebut diperkirakan karena tanah dasar tanggul sungai adalah tanah lunak yang tidak bisa menahan beban yang berat, sehingga perkuatan-perkuatan yang dilaksanakan tidak dapat berfungsi dengan baik. Rusaknya tanggul Bengawan Solo juga terjadi di Desa Kanor, Kabupaten Bojonegoro. Pada daerah ini tanggul-tanggul yang telah dibuat mengalami penurunan tanah (longsor). Berikut ini merupakan gambar 1.1 dari daerah yang mengalami kelongsoran.

Dampak dari erosi adalah menipisnya lapisan permukaan tanah bagian atas, yang akan menyebabkan menurunnya kemampuan lahan (degradasi lahan). Akibat lain dari erosi adalah menurunnya kemampuan tanah untuk meresapkan air

(*infiltrasi*). Penurunan kemampuan lahan meresapkan air ke dalam lapisan tanah akan meningkatkan limpasan air permukaan yang akan mengakibatkan banjir di sungai. Selain itu butiran tanah yang terangkut oleh aliran permukaan pada akhirnya akan mengendap di sungai (*sedimentasi*) yang selanjutnya akibat tingginya *sedimentasi* akan mengakibatkan pendangkalan sungai.



Gambar 1.1 tanah yang mulai longsor

Untuk itu perlu dilakukan penelitian terhadap kondisi struktur bawah permukaan di sungai Bengawan Solo, terutama mengenai proses dan bentuk dari sedimentasi sungai. Karena sedimentasi sungai sangat besar pengaruhnya pada penggerusan lapisan tanah, baik tepi maupun dasar sungai yang nantinya akan mempengaruhi pola dan arah aliran air sungai.

Pada penelitian Tesis ini, antenna GPR yang digunakan dengan frekuensi 90 MHz. Keuntungan menggunakan antenna ini adalah penetrasi ke dalam bawah permukaan yang cukup dalam (10-20 meter). Sinyal-sinyal elektromagnetik ini diradiasikan kedalam tanah untuk mendeteksi beberapa anomaly pada sifat dielektrik material geologi. Pola refleksi gelombang elektromagnetik yang didapatkan nantinya akan menggambarkan system per lapisan *sedimentasi* dan *scouring* Sungai Bengawan Solo.

1.2. Tujuan

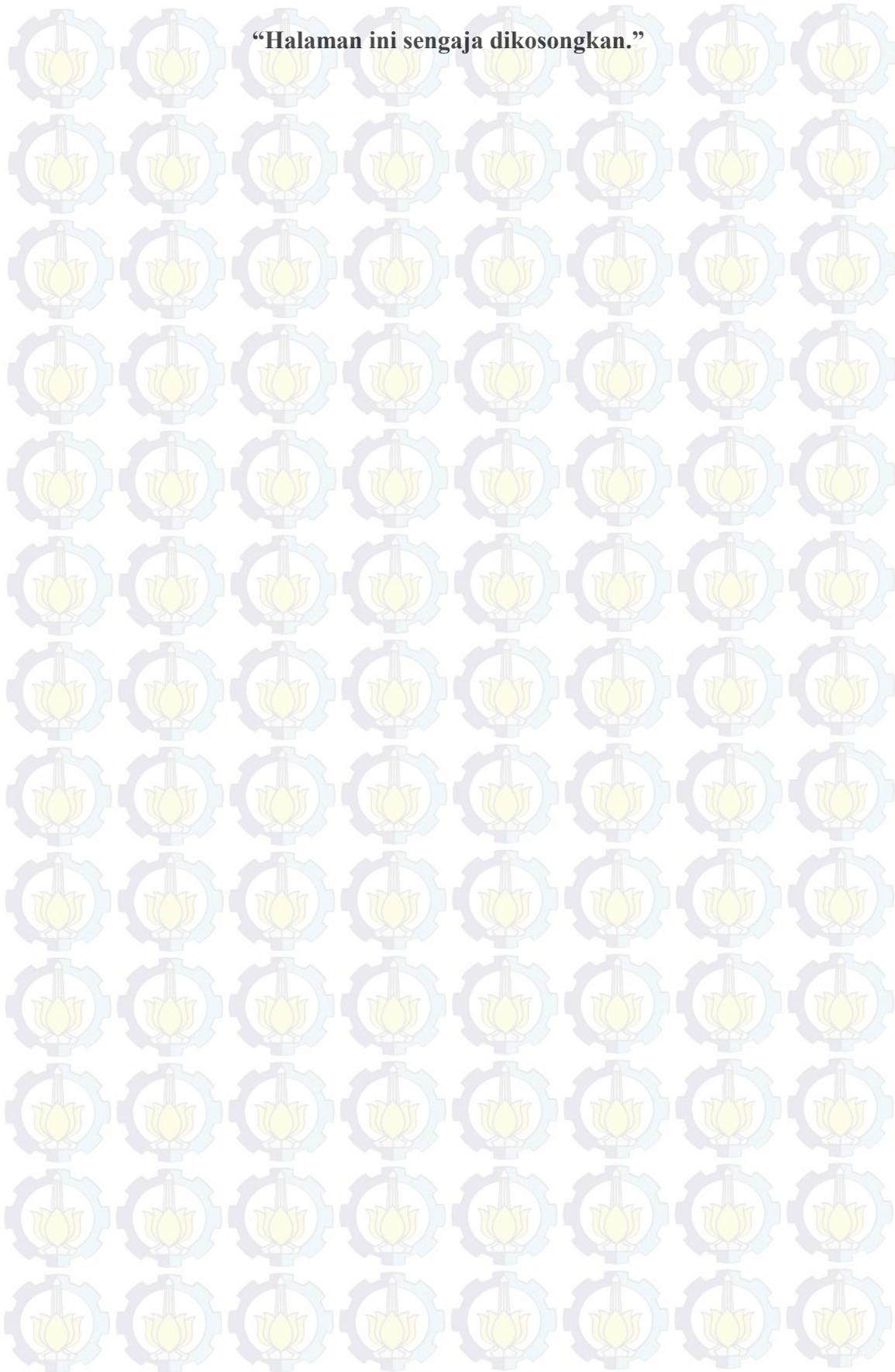
Adapun tujuan dilakukannya Tesis ini antara lain :

- 1) Untuk mengetahui kondisi struktur bawah permukaan dan erosi pada Sungai Bengawan Solo berdasarkan karakteristik perambatan gelombang elektromagnetis dalam medium (tanah).
- 2) Untuk mengidentifikasi pola sistem penyebaran *sedimentasi* dan *scouring* Sungai Bengawan Solo di Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro.

1.3. Batasan Permasalahan

- 1) Daerah penelitian Tesis dilakukan hanya pada daerah aliran sungai yang mengalami kerusakan pada tanggulnya, tepatnya di Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro.
- 2) Kajian pembahasan hanya dilakukan berdasarkan aspek geofisika dan geologis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



BAB II TEORI DASAR

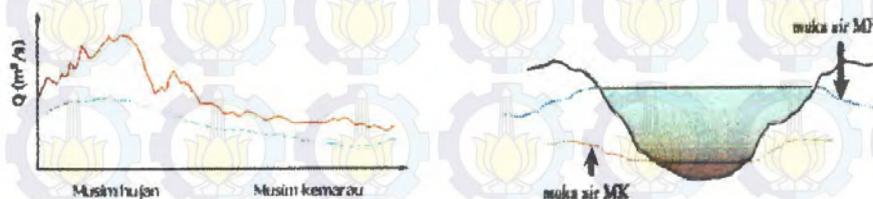
2.1 Tinjauan Karakteristik dan Morfologi Sungai

Erosi adalah peristiwa pindahnya atau terangkutnya tanah atau bagian-bagian tanah dari suatu tempat ke tempat lain oleh media alami. Pada peristiwa erosi, tanah atau bagian bagian tanah terkikis dan terangkut, kemudian diendapkan di tempat lain (Arsyad, 2010). Pengikisan, pengangkutan dan pemindahan tanah tersebut dilakukan oleh media alami yaitu air dan angin.

2.1.1. Karakteristik Sungai

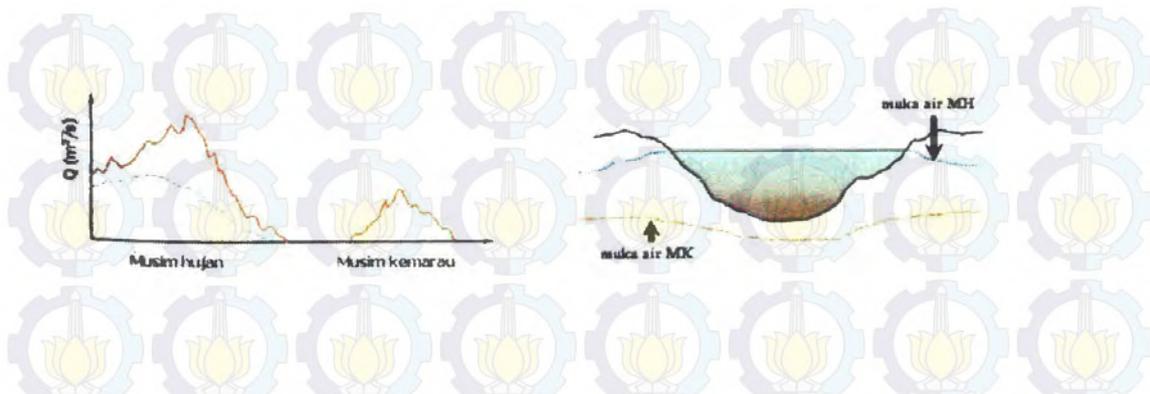
Berdasarkan adanya aliran di sungai, secara garis besar sungai diklasifikasikan sebagai berikut :

- Sungai *Perennial***, yaitu sungai yang mengalir air sepanjang tahun. Pada musim kemarau masih kita dapati air yang berasal dari mata air maupun yang berasal dari rembesan tebing sungai. Hal ini disebabkan karena muka air tanah selalu lebih tinggi daripada sungai. **Bengawan Solo termasuk jenis sungai ini** yang terlihat pada gambar 2.1.



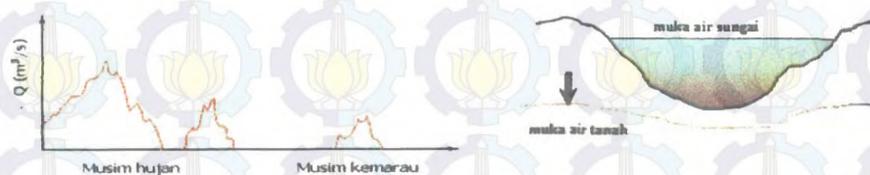
Gambar 2.1. Sungai *Perennial*

- Sungai *Intermittent***, yang hanya mengalir air pada musim hujan saja, karena pada musim kemarau muka air tanah lebih rendah daripada dasar sungai. Lihat gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sungai *Intermitten*

- c. **Sungai *Ephemeral***, yaitu sungai yang berair hanya pada saat hujan saja. Hal ini disebabkan karena muka air tanah selalu berada di bawah dasar sungai. Lihat pada gambar 2.3.



Sungai 2.3. Sungai *Ephemeral*

Berdasarkan pembentukannya dan menurut batuan dasarnya dimana sungai mengalir, sungai dapat dibagi menjadi 2 (dua), yaitu:

- Sungai alluvial**, yaitu sungai yang mengalir di atas endapan dasar yang dibentuknya sendiri. Sungai ini bebas membentuk dimensinya yang dipengaruhi oleh perubahan hidroliknya. Sungai Bengawan Solo termasuk sungai jenis ini.
- Sungai dengan tanah dasar cadas**, dimana sifat-sifatnya tergantung pada jenis batuan yang membentuknya.

Apabila ditinjau dari perkembangan proses erosi, maka sungai dapat digolongkan menjadi :

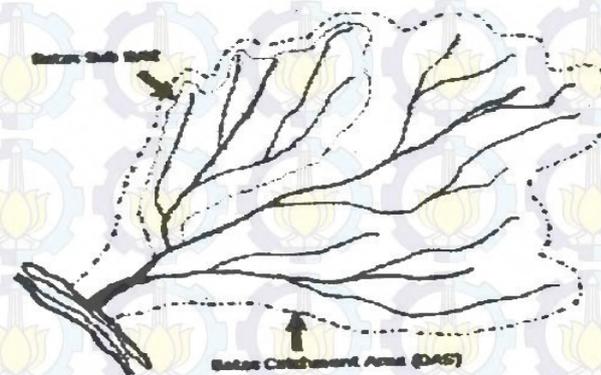
- Sungai muda (*youthfull*)**, pada umumnya sungai-sungai di pegunungan, dengan penampang berbentuk V, ber arus deras, banyak terjadi erosi pada bagian-bagian nya.

- b. **Sungai dewasa (*mature*)**, penampang sungai dan lembah sungai lebih melebar, kemiringan lebih landau, erosi kearah tebing banyak disbanding erosi dasar, pada sungai-sungai ini terdapat *meander*.
- c. **Sungai tua (*old*)**, erosi terus berlangsung, penampang lebar dan dangkal, *meander* dan sabuk *meander* (*meander belt*) tidak selebar lembah sungai. Terbentuk tanggul alam sepanjang sungai, pada daerah-daerah rendah di dekat sungai terbentuk rawa-rawa.

Masalah-masalah yang timbul pada sungai-sungai di atas berbeda. Pada sungai-sungai dewasa umumnya dibuat stabilisasi saluran dan perbaikan sungai untuk mencegah sungai bermigrasi lateral. Lembah sungai dimanfaatkan untuk daerah pertanian dan perkembangan pemukiman penduduk. Pada sungai-sungai tua, masalah yang sering didapati adalah masalah banjir dan pengendapan, tanggul-tanggul diperlukan untuk mencegah luapan. Bengawan Solo termasuk dalam kategori yang terakhir ini.

2.1.2. Daerah Aliran Sungai (*Catchment Area*)

Daerah Aliran Sungai (*Catchment Area*) adalah suatu luasan dimana aliran permukaan mengalir menuju satu titik konsentrasi tertentu. Daerah pengaliran dibatasi oleh garis imajiner, yang dapat ditentukan di peta topografi dengan cara menghubungkan titik-titik tertinggi disekeliling daerah tersebut yang terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Daerah Aliran Sungai (*Catchment Area*)

Sungai termasuk salah satu wilayah keairan. Wilayah keairan dapat di bedakan menjadi beberapa kelompok yang berbeda berdasarkan sudut pandang yang berbeda-beda. Sudut pandang yang biasa digunakan dalam pengelompokan jenis wilayah keairan ini antara lain adalah *morfologi*, *ekologi*, dan *antropogenic* (campur tangan manusia pada wilayah keairan tersebut).

Menurut Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air, wilayah sungai merupakan gabungan dari beberapa Daerah Aliran Sungai (DAS). Sedangkan system alur sungai (gabungan antara alur badan sungai dan alur sempadan sungai) merupakan system *river basin* yang membagi DAS menjadi beberapa sub-DAS yang lebih kecil. Oleh karena nya segala perubahan yang terjadi di DAS akan berakibat pada alur sungai. Areal DAS meliputi seluruh alur sungai ditambah areal dimana setiap hujan yang jatuh di areal tersebut mengalir ke sungai yang bersangkutan. Alur sempadan sungai didefinisikan sebagai alur pinggir kanan dan kiri sungai yang terdiri dari bantaran banjir, bantaran longsor, bantaran ekologi serta bantaran keamanan pada saat erosi.

Guna lebih mengetahui secara detail tentang sungai maka dibuat zona memanjang maupun melintang. Tampang memanjang merupakan zonasi makro dari hulu sampai ke hilir dan tampang melintang adalah zonasi mikro dari daerah bantaran sisi sungai yang satu sampai bantaran sisi yang lainnya.

Konsep hidrolik murni biasanya mengabaikan komponen *ekologi* (misalnya tumbuhan yang ada) dalam membuat tampang melintang sungai dan cenderung membuat profil dasar sungai secara teratur (lurus). Dalam pemahaman *ekohidrolik*, profil memanjang dan melintang sungai berisi baik komponen fisik *hidraulik* (dasar sungai atau sendimen, tebing sungai dan bantaran sungai) lengkap dengan *flora* (tumbuhan) yang hidup di atasnya serta *fauna* (binatang) yang menyertainya. Disamping tumbuhan, juga perlu ditampilkan komponen kimia air sungai yang bersangkutan.

Zona Memanjang

Zona ini pada umumnya diawali dengan kali dari mata air di daerah pegunungan, kemudian sungai menengah di daerah antara pegunungan dan dataran, dan selanjutnya sungai besar pada dataran rendah sampai di daerah

pantai. Dari literature morfologi sungai yang ada (Rosgen, 1996, Kern, 1994, Schumm, 1981, Leopold et al., 1966, Leopold et al., 1964) pada umumnya ditemukan tiga pembagian zona sungai memanjang yaitu sungai bagian hulu (*Up Stream*), bagian tengah (*Middle Stream*), dan bagian hilir (*Down Stream*). Dari hilir sampai ke hulu ini dapat ditelusuri perubahan-perubahan komponen sungai seperti kemiringan sungai, debit, temperatur, kandungan oksigen, kecepatan aliran, dan kekuatan aliran terhadap erosi.

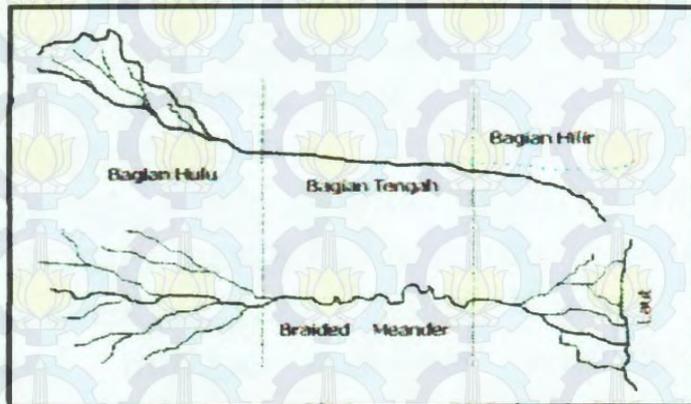
Faktor yang sangat berpengaruh dari perubahan-perubahan komponen tersebut adalah kemiringan sungai, disamping juga jenis material dasar dan tebing yang dilewati sungai. Perubahan kemiringan sungai menentukan perubahan temperatur, kandungan oksigen, kecepatan air, dan lain-lain. Sedangkan perubahan kemiringan dikombinasi dengan jenis *sedimen* dasar sungai dan iklim mikro akan menentukan jenis vegetasi sungai.

Zona Melintang

Pada zonasi sungai secara melintang dapat dibedakan menjadi tiga zona, yaitu *zona akuantik* (badan sungai), *zona amphi* (daerah tebing sungai sampai pertengahan bantaran), dan *zona teras sungai* (daerah pertengahan bantaran yang sering tergenang air saat banjir sampai batas luar bantaran yang hanya kadang-kadang kena banjir). Kondisi biotik dan abiotik di tiga zona ini dipengaruhi oleh lama, ketinggian dan frekuensi banjir yang ada. Banjir (tinggi genangan air) merupakan faktor dominan yang mempengaruhi perubahan kualitas dan kuantitas habitat serta morfologi sungai.

2.1.3 Denah Sungai

Suatu sungai yang ideal terdiri dari bagian hulu (*Head Waters*), bagian tengah yang biasa berpola kelabang (*Braided*), atau berbelok (*Meander*), dan bagian hilir di dataran rendah dimana delta terbentuk. Pada kenyataannya jarang sungai yang berpola ideal seperti diatas, denah sungai sangat tergantung pada kondisi topografi setempat. Sungai *alluvial* dapat mempunyai bentuk : lurus (*Straight*), berbelok (*Meander*), dan berkelabang (*Braided*), pada gambar 2.5.

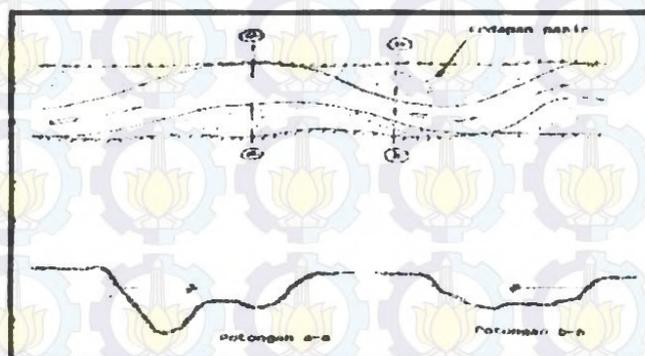


Gambar 2.5 Sungai Ideal

a) *Sungai Lurus (Straight)*

Pada debit besar, sungai nampak lurus, tetapi pada debit kecil terlihat alur berbelok-belok atau berpola *meander* dan terlihat adanya gosong-gosong pasir (*Sand Bar*). Sungai macam ini tidak stabil, *sinuosity* (yaitu panjang sungai dibanding dengan panjang lembah sungai, $P \approx 1,30$).

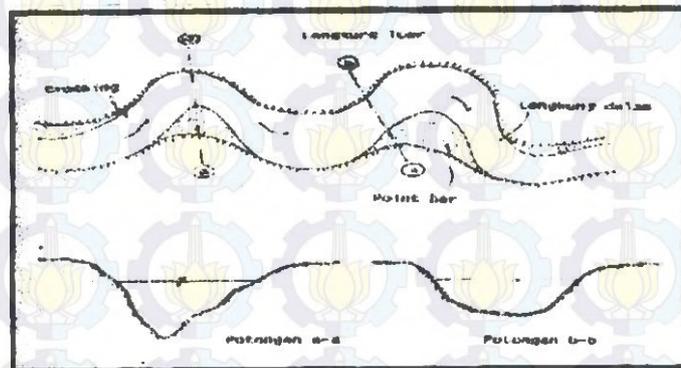
Sungai lurus sangat jarang terdapat, umumnya adalah hasil campur tangan manusia (*Kanalisasi, Normalisasi*), namun demikian kecenderungan untuk membentuk gosong-gosong pasir tetap ada. Sudetan buatan (*Cut off*) mengakibatkan meningkatnya kecepatan aliran yang berarti meningkatkan erosi dasar pengendapan di hilir. Lihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sungai Lurus

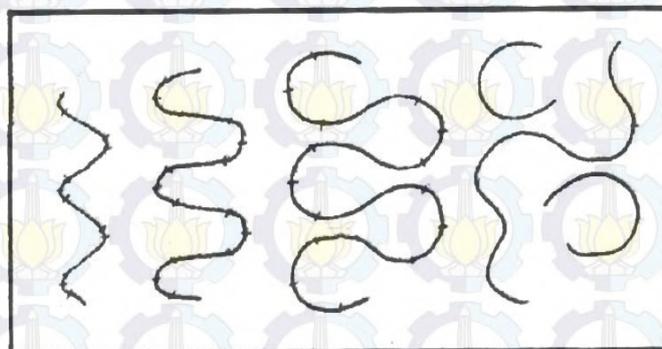
b) Sungai berbelok (Meander)

Sungai ini berpola berbelok-belok dengan jari-jari lengkung yang bervariasi. *Sinuosity* umumnya berkisar antara 1,50 – 2,50. Kemiringan dasar relative kecil dengan penggerusan di lengkung luar dan pengendapan di lengkung dalam. Dibagian tikungan, timbul gaya sentripetal yang mengakibatkan aliran terdesak ke tikungan luar lalu membelok ke bawah sehingga menyebabkan terjadinya penggerusan di tebing luar dan dasar sungai. Dua buah tikungan dihubungkan oleh bagian sungai yang lurus. Bagian ini umumnya dangkal. Material hasil erosi diendapkan di bagian lurus (*Crossing*). Bagian alur terdalam disebut *Thalweg*. Lihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Sungai berbelok

Peristiwa erosi dan pengendapan berlangsung terus dan *meander* bertendensi bergerak kearah hilir, lengkungan bertambah tajam dan rapat, hal ini memungkinkan puncak lengkungan putus sehingga terbentuk *cut off* dan tanduk sapi (*Oxbow Lake*). Lihat pada gambar 2.8.

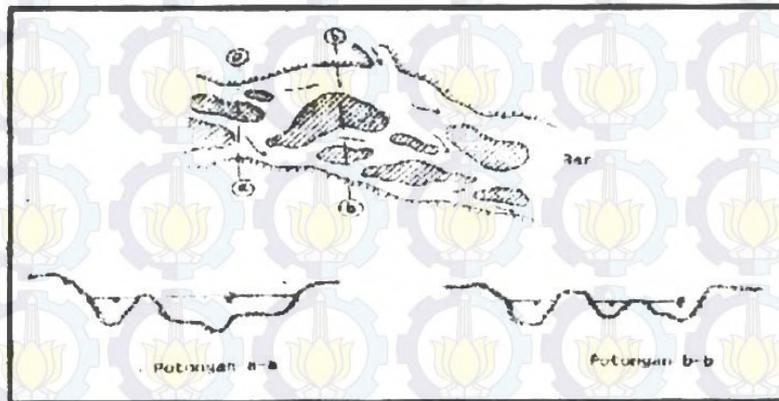


Gambar 2.8 Pertumbuhan *meander*

c) *Sungai Berkelabang*

Bagian sungai ini sangat tidak stabil, tampang sungai lebar dengan alur majemuk dan pulau-pulau pasir. Pulau-pulau ini sebagian terangkut pada saat banjir. Perubahan tampang sulit diperkirakan.

Sebab terjadinya sungai kelabang adalah karena *sedimen* yang terangkut ke bagian ini sangat besar dan lebih besar dari kapasitas angkutnya, sehingga sebagian akan diendapkan. Pengendapan menyebabkan kemiringan bertambah dan membentuk banyak alur. Tebing sungai tererosi sehingga sungai bertambah lebar. Lihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sungai berkelabang

2.2 *Sedimentasi*

2.2.1. *Pengertian Sedimentasi*

Makna kata *sedimentasi* secara umum dapat diartikan sebagai endapan. Namun secara spesifiknya *sedimentasi* dapat diartikan sebagai adanya kumpulan materi yang dapat dipindahkan oleh aliran fluida dimana materi tersebut nantinya akan terkumpul (tersimpan) menjadi lapisan materi yang memadat. Sedangkan arti dari sedimentasi adalah pengumpulan suatu materi karena adanya penumpukan yang terjadi akibat adanya aliran yang mengandung materi menjadi terganggu atau tersendat. Tentunya materi yang dimaksud apabila ditinjau dari segi geologi adalah batuan atau lapisan tanah.

Sedimentasi tidak hanya disebabkan karena adanya aliran fluida, namun bisa juga disebabkan karena angin atau lapisan es yang mencair. Laut, danau,

sungai merupakan tempat berkumpulnya sedimen dari waktu ke waktu. Setiap lapisan sedimen yang berbentuk memiliki karakteristik berbeda-beda, misalnya pori batuan, butiran, volume, densitas dan bentuk. Hal ini dikarenakan oleh perbedaan kecepatan pengendapan pada saat pembentukan lapisan sedimen.

2.2.2. Klasifikasi Lingkungan sedimentasi (*Depositional Environment Sedimentary*)

Depositional environment adalah bagian dari permukaan bumi yang memiliki karakteristik tertentu akibat adanya kombinasi pembentukan proses fisis, kimia dan biologisnya. Proses tersebut mengendalikan bagaimana lapisan sedimen dipindahkan dan terakumulasi. Proses tersebut dapat dimisalkan komposisi kimia yang terendapkan, dan jenis organisme yang terdapat di daerah pengendapan sehingga mempengaruhi proses pengendapan. Pada proses akhir peristiwa ini akan menghasilkan karakteristik dan tipe pengendapan yang berbeda pada setiap areal lingkungan pengendapan.

Depositional environment dapat diklasifikasikan menjadi 3 (tiga), antara lain :

a. ***Continental Environment***, yaitu lingkungan pengendapan yang terjadi di daratan. Pada *Continental Environment*, pada daerah pengendapannya dapat diklasifikasikan menjadi 5 (lima) jenis, antara lain :

- *Alluvial fans*, merupakan pengendapan yang terjadi pada dataran pegunungan. *Alluvial fans* kebanyakan terjadi pada daerah yang kering dimana memiliki curah hujan yang tidak tetap dan tingkat erosi yang tinggi. Tipe sedimen dari *alluvial fans* adalah kasar, *sortasi gravel* (kerikil), dan pasir. Lihat pada gambar 2.10.



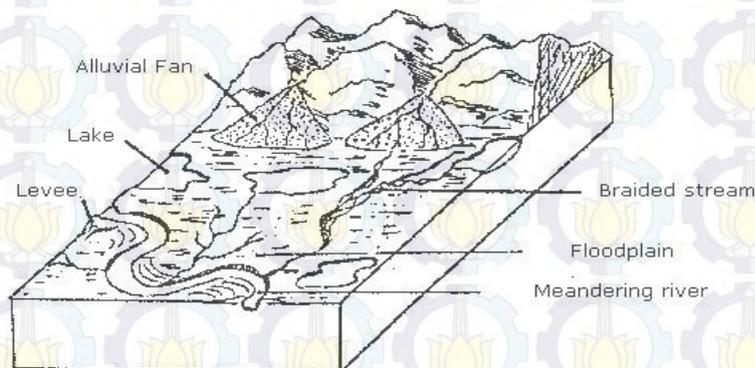
Gambar 2.10 Hasil sedimentasi *alluvial fans*

- *Fluival environment*, merupakan pengendapan yang terjadi di sekitar sungai, *meander* sungai yang terjadi akibat adanya system aliran sungai. Terbagi atas 4 (empat) *subenvironment*, yaitu :
 - i. *Channel*, yang memiliki pembentukan sendimen : batuan kasar, *gravel* (kerikil) berbentuk bulat-bulat, dan pasir.
 - ii. *Bars*, yang memiliki pembentukan sedimen berupa : pasir dan *gravel*.
 - iii. *Leeves*, yang terdiri dari atas butiran pasir yang lembut atau lanau.
 - iv. *Floodpains*, yang terdiri atas lanau dan lempung (*clay*).



Gambar 2.11 Hasil pengendapan *Fluvial*

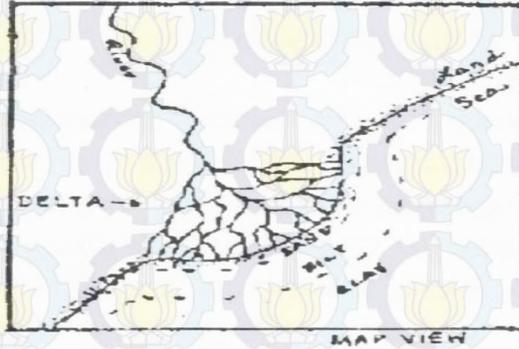
- *Lacustrine environment* atau lanau, yaitu pengendapan yang terjadi pada daerah danau yang hasil sedimentasinya bermacam-macam. Ada yang membentuk lapisan yang dangkal dan dalam dan terisi oleh karbonat, atau *evaporit sediment*.
- *Desert (Aeolian atau Aolian Environment)*, biasanya membentuk areal yang sangat luas yang mengendapkan pasir menjadi bukit pasir. Tipe sedimen dari bukit pasir ini adalah sortasi batuan yang bagus, membentuk butiran yang bulat, tanpa adanya komposisi *gravel* atau lempung di dalamnya.
- *Swamps (Paluda environment)*, terbentuk di daerah rawa, dimana material dari tumbuhan akan mengendap dengan air pada lapisan tanah. Biasanya membentuk pengendapan batu bara. Lingkungan pengendapan *continental* secara lebih jelas dapat digambarkan pada gambar di bawah ini (2.12) :



Gambar 2.12 Sistem lingkungan pengendapan *continental*

b. *Transitional Environment*, yaitu lingkungan pengendapan yang terjadi pada daerah transisi antara daratan dan laut. Lingkungan pengendapan ini dapat diklasifikasikan menjadi 4 (empat) macam, antara lain :

- *Delta*, merupakan pengendapan yang terjadi dimana aliran sungai mengalir menuju perairan, seperti danau atau lautan. Sedimen pasir yang kasar akan diendapkan pada pinggiran sungai, sedangkan sedimen yang halus akan dibawa menuju laut dan diendapkan pada perairan yang lebih dalam. Lihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Pengendapan *Delta*

- *Pantai*, merupakan pengendapan di pantai yang dipengaruhi energy gelombang di pantai. Tipe sendimen ini didominasi pasir dan pengendapan organik atau fauna lautan.
- *Lagoon* atau *Laguna*, merupakan perairan / danau yang terjadi di pulau antara pembatas kepulauan dan lautan. Tipe sendimen lebih halus dari pada pengendapan pantai, biasanya tersiri atas lempung (*clay*) dan lumpur (*mud*).
- *Tidal flats*, merupakan pengendapan yang terjadi pada pinggiran laguna.

Berikut ini merupakan gambar 2.13. penampang daratan dari lingkungan pengendapan transisi (*Transitional Environment*).

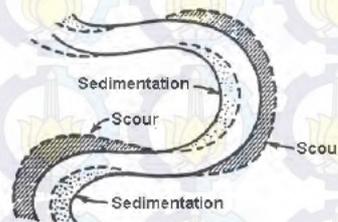
c. ***Marine Environment***, merupakan lingkungan pengendapan yang terjadi di laut atau lautan luas (*samudra*). *Marine environment*, terbagi atas (*R.R. Churchill, The Law, 108*).

- *Continental shelf* (dataran kontinen), yaitu wilayah dasar laut yang berbatasan dengan benua atau pulau-pulau yang turun ke bawah secara bertahap yang diukur dengan garis air rendah sampai kedalaman mencapai 130 meter.
- *Continental slope*, yaitu wilayah dasar laut yang berbatasan dengan *Continental shelf* yang mempunyai kemiringan yang lebih curam, yang menurun sampai sekitar kedalaman 1500-3500 meter.

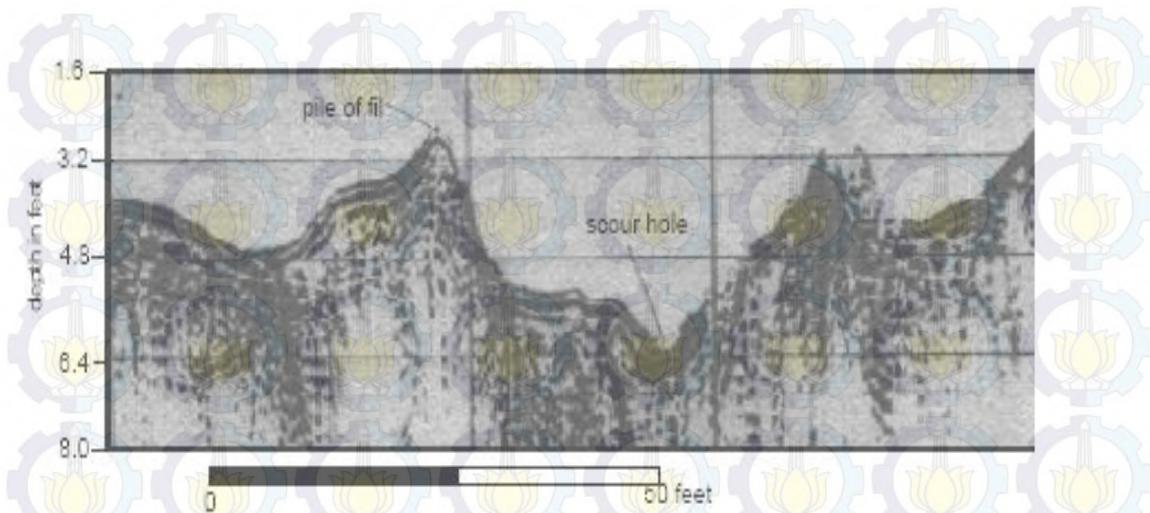
- *Continental rise*, yaitu bagian dasar laut yang berbatasan dengan *continental slope* menurun dari kedalaman 3500 meter sampai 5500 meter.
- *Abyssal plain* atau dasar laut dalam yang tidak lagi merupakan bagian dari *Continent*, meliputi kawasan di luar *continental margin*. Pada bagian-bagian tertentu di dasar laut, dalam ini terdapat lembah-lembah yang dalam dan curam (*trench*) yang pada bagian lainnya dari dasar laut, dalam ini terdapat dasar laut yang bergunung-gunung atau *mountain ranges* (O'Connell, *The Int.*, 1984).

2.2.3. Scouring

Adanya erosi pada bagian dinding sungai merupakan akibat dari proses alami aliran arus sungai yang terjadi secara perlahan. Tingkat erosi ini bergantung pada musim-musim tertentu. Sehingga mempengaruhi tingkat kedalaman dasar sungai dan kecepatan arus sungai. Jika erosi secara terus menerus berlangsung, maka keadaan ini dapat menjadikan dasar sungai menjadi tidak datar (bergelombang). Apabila pada dasar sungai terdapat suatu daerah yang dasarnya lebih dalam dari sekitarnya (membentuk suatu palung), maka daerah ini disebut sebagai **scouring** (Lihat pada gambar 2.14. dan 2.15.). Kedalaman maksimum dari *scouring* dapat diperkirakan dengan mengasumsikan bahwa kedalaman *scouring* seimbang dengan kenaikan kemiringan permukaan sungai (Xanthakos 1995).



Gambar 2.14. *Scouring* pada sedimentasi sungai.



Gambar 2.15. Salah satu contoh hasil penampang GPR yang menunjukkan adanya *scouring* di dasar sungai.

2.3 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

Perkembangan teknologi elektronika dalam kurun waktu beberapa tahun ini, telah melahirkan sebuah metode baru dalam bidang ilmu kebumih/eksplorasi geofisika yaitu metode *Ground Penetrating Radar (GPR)*, dimana pulsa elektromagnetik dipancarkan ke dalam bumi dan direkam oleh antenna di permukaan. Pulsa radar diteruskan, dipantulkan, dan dihamburkan oleh struktur permukaan dan anomaly di bawah permukaan. Gelombang EM yang dipantulkan dan dihamburkan diterima oleh antenna penerima di permukaan bumi.

Hubungan antara radiasi gelombang EM dengan media dapat diperoleh dari persamaan *Maxwell*. Karakteristik radiasi gelombang EM pada struktur bumi ditentukan parameter fisika : permeabilitas (μ), permitivitas listrik (ϵ), dan konduktivitas (σ).

GPR terdiri dari sebuah pembangkit sinyal, antenna *transmitter* dan *receiver* sebagai pendeteksi gelombang EM yang dipantulkan. Sinyal radar ditransmisikan sebagai pulsa-pulsa. Antenna *receiver* menerima pulsa yang tidak terabsorpsi oleh bumi tetapi dipantulkan dalam 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. *Transmitter* membangkitkan pulsa gelombang EM 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 EM menjalar dari *transmitter* – target – *receiver*. Tampilan ini disebut radagram.

Pola refleksi yang diamati pada radagram dapat bersifat unik, artinya bahwa reflector yang sama dapat disebabkan oleh objek yang berbeda. Refleksi yang sangat kuat merupakan ciri khas dari bahan metal, *water table*, dan lapisan lempung. Bahan metal seperti pipa akan memberikan respon seperti hiperbola dengan amplitudo besar pada radagram. Akan tetapi bahan-bahan dari kabel, *boulder* dan pipa terbuat dari beton dapat juga memperlihatkan pola radagram yang serupa. Radagram dari *water-table* dan lapisan lempung memiliki ciri khas amplitudo besar tapi relatif datar.

2.3.1. Prinsip Dasar GPR

Ground Penetrating Radar GPR, juga di kenal sebagai *Ground Radar* atau *Georadar*, merupakan teknik resolusi tinggi penggambaran lapisan dangkal dan struktur tanah menggunakan prinsip-prinsip perambatan gelombang elektromagnetik yang kedalaman penetrasinya dan besar amplitudo yang terekam tergantung pada sifat kelistrikan dari batuan atau media bawah permukaan dan frekuensi antenna yang digunakan. Keuntungan menggunakan gelombang elektromagnetik adalah bahwa sinyal-sinyalnya memiliki panjang gelombang relatif pendek yang dapat dibangkitkan dan diradiasikan kedalam tanah untuk mendeteksi beberapa anomali pada sifat dielektrik material geologi. Sifat elektromagnetik yang biasa diukur menggunakan data GPR adalah konstanta dielektrik relatif (ϵ_r), untuk frekuensi dan survei lapangan yang dipengaruhi oleh air tanah, *Travel time* dan amplitudo dari sinyal GPR dapat digunakan untuk

memperkirakan konstanta relatif dielektrik (Davis and Annan, 1977; Top et al, 1980).

2.3.2. Gelombang Elektromagnetik

Metode *GPR* didasarkan atas persamaan *Maxwell* yang merupakan perumusan matematis untuk hukum-hukum alam yang mendasari semua fenomena elektromagnetik (Zaki, 1996). Persamaan *Maxwell* untuk medium isotropis heterogen dirumuskan sbb :

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan hubungan

$$D = \epsilon E, \dots\dots\dots(2.5)$$

$$B = \mu H, \dots\dots\dots(2.6)$$

$$J = \sigma E, \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

E = Medan listrik

H = Medan magnet

J = Rapat arus listrik

σ = Konduktivitas

ϵ = Permitivitas listrik

ρ = Tahanan jenis

Dengan menerapkan operasi curl pada persamaan *Maxwell* maka diperoleh, (Zaki, 1996). :

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times E &= -\nabla \times \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \\ &= -\nabla \times \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (\mu H) \right\} \dots\dots\dots(2.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times H &= \nabla \times \left\{ J + \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \\ &= \nabla \times \left\{ \sigma E + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon E) \right\} \dots\dots\dots(2.9) \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan *Maxwell* di atas, dapat diturunkan persamaan gelombang elektromagnetik sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \nabla^2 E - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} &= 0 \\ \nabla^2 H - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.10)$$

Kecepatan gelombang EM pada berbagai medium bergantung pada kecepatan cahaya, konstanta relatif dielektrik (ε_r) dan permeabilitas magnetik ($\mu_r = 1$ untuk materi non magnetik). Untuk selengkapnya bisa dilihat pada persamaan :

- Kecepatan gelombang EM pada sebuah medium :

$$V_m = \frac{c}{\left[\left(\frac{\varepsilon_r \mu_r}{2^2} \right) (1 + P^2) - 1 \right]^{1/2}} \dots\dots\dots(2.11)$$

- dimana : c : kecepatan cahaya
- ε_r : konstanta dielektrik relatif
- μ_r : permeabilitas relatif magnetik
- P : loss factor = $\sigma/\omega\varepsilon$
- σ : konduktivitas
- ω : frekuensi sudut = $2\pi f$
- f : frekuensi
- ε : permitivitas
- ε_0 : permitivitas diruang hampa

- untuk materi dengan *loss factor* rendah $P \approx 0$:

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\varepsilon_r}} \dots\dots\dots(2.12)$$

- Hubungan antara konstanta relatif dielektrik dan porositas adalah :

$$\varepsilon = (1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana : ϕ : porositas

ϵ_m : konstanta relatif dielektrik untuk matriks batuan

ϵ_w : konstanta relatif dielektrik untuk fluida

Pengukuran *travel time* dari refleksi GPR dapat digunakan untuk menentukan kecepatan elektromagnetik (v) untuk *interface* dan kecepatan ini dapat digunakan untuk memperkirakan konstanta dielektrik relatif.

Pengukuran *travel time* ini merupakan paling efektif untuk memperkirakan konstanta dielektrik relatif ketika geometri bawah permukaan diketahui atau ketika data variabel *offset* diperoleh. Data amplitudo dari refleksi GPR juga digunakan untuk memperkirakan konstanta dielektrik relatif. Amplitudo penerima sinyal GPR merupakan suatu fungsi kekuatan dari sinyal transmisi antara antenna GPR dan tanah, atenuasi elektromagnetik (α) pada material bawah permukaan dan *interface* tidak sebanding dengan sinyal. Amplitudo menurun dengan panjangnya *travel path* dan atenuasi tinggi, dan sinyal GPR mungkin tidak dapat ditemukan untuk daerah yang *travel pathnya* sangat rendah dengan atenuasi tinggi. Atenuasi elektromagnetik merupakan fungsi konduktivitas elektrik (σ) material bawah permukaan dan frekuensi transmisi GPR, dimana atenuasi lebih tinggi pada daerah konduktivitasnya elektriknya lebih tinggi.

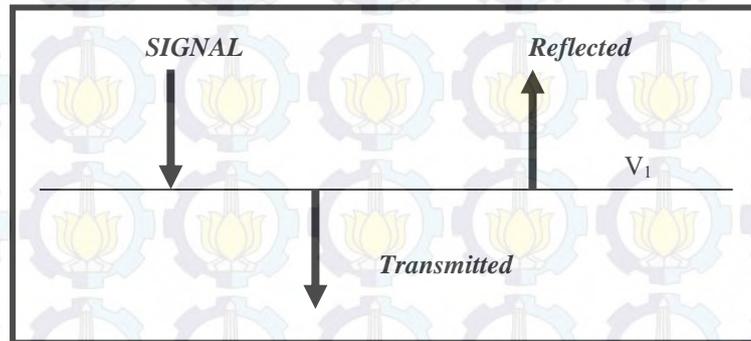
2.3.3. Koefisien refleksi

Koefisien refleksi (R) didefinisikan sebagai perbandingan energi yang dipantulkan dan yang datang dituliskan dalam persamaan sbb :

$$R = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$$

Atau(2.14)

$$R = (\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}) / (\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1})$$



Gambar 2.16. Ilustrasi penjaralan gelombang elektromagnetik

dimana ϵ_1 dan ϵ_2 konstanta dielektrik relatif lapisan 1 dan lapisan 2, ϵ adalah ukuran kapasitas dari sebuah material dalam hal melewati muatan saat medan elektromagnetik melewatinya.

Tabel 2.1. Harga konstanta relatif dielektrik, konduktivitas listrik, kecepatan gelombang radar dan atenuasi pada beberapa material. (Annan, 1992)

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Udara	1	0	0,3	0
Air Murni	80	0,01	0,033	$2 \cdot 10^{-3}$
Air Laut	80	$3 \cdot 10^3$	0,01	10^3
Pasir Kering	3-5	0,01	0,15	0,01
Pasir Basah	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Limestone	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Clay	5-40	2-1000	0,06	1-300
Granit	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Rock Salt	6	0,1-1	0,13	0,01
Silts	5-30	1-100	0,07	1-100
Es	3-4	0,01	0,16	0,01
Shale	5-15	1-100	0,09	1-100

2.3.4. Skin depth

Skin depth adalah kedalaman dimana sinyal telah berkurang $1/e$ atau 37%.

Skin depth (δ) dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\delta = 5.31 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \dots\dots\dots(2.15)$$

Kedalaman penetrasi dibatasi oleh konduktivitas yang rendah (atau resistivitas yang tinggi) dari tanah. Signal teratenuasi oleh lempung yang konduktif hingga kedalaman 0.2 meter. Tetapi pada garam, es atau granit kering penetrasi dapat mencapai lebih dari 300 meter.

Karena air memiliki konstanta dielektrik yang tinggi ($\epsilon/\epsilon_0 = 80$), perubahan kelembaban tanah dan batuan sangat mempengaruhi respon radar. Hal yang sama juga berlaku untuk konduktivitas dari lempung yang mengandung tanah secara selang-seling akan mempengaruhi kedalaman refleksi. Oleh sebab itu, perhitungan radar sebelum dan sesudah hujan akan menghasilkan nilai yang berbeda. Interpretasi dari *ground radar* (dengan kebatasan ini) jika mungkin dibandingkan dengan metode lainnya.

Signal yang dipantulkan oleh ketidak kontinuan secara horizontal, dicatat setelah *travel time* tertentu, yang bergantung pada survei material. Metoda ini tidak hanya seperti seismik refleksi, tetapi juga mungkin untuk menggunakan *software* untuk mengolah data seismik yang diadopsi untuk menginterpretasikan pengukuran *ground radar*. Seperti pada seismik, kedalaman dari reflektor dapat diperoleh jika kecepatan diketahui.

Pengukuran radar merupakan metode yang tepat untuk mendeteksi benda kecil dekat permukaan bumi (0,1 hingga 3 meter) dengan resolusi yang tinggi. Survei harus dilakukan pada tanah yang kering dan hampir homogen pada resistivitas elektrik yang tinggi (konstanta dielektrik rendah).

Untuk memperoleh penetrasi yang lebih dalam, frekuensi transmisi harus rendah, walaupun frekuensi yang lebih rendah (<200 MHz) mengurangi resolusinya. Frekuensi harus dipilih dengan mempertimbangkan baik penetrasi

kedalaman yang mungkin dan resolusi yang diinginkan. Sebagai tambahan, sifat listrik dari daerah survei dan target dari pelacakan harus di pertimbangkan.

Survei georadar menghasilkan hampir seluruhnya refleksi yang berkenaan dengan perubahan kecil dalam tekstur dan struktur dari dasar-dasar tanah. Sebagai asumsi awal untuk menginterpretasikan bentuk sebagai indikasi dari kontaminasi sampah; evaluasi dan penafsiran dari data radar harus dikerjakan dengan cara khusus dan hati-hati.

2.4 Data Penelitian yang terdahulu pada Sungai Bengawan Solo

2.4.1 Penelitian di Desa Widang

Pada penelitian terdahulu di sungai bengawan solo yang terdapat di desa widang kabupaten bojonegoro (Warnana. D.D *et al.*, 2007), dapat diamati bahwa terdapat pendangkalan dasar sungai. Kemudian secara berangsur-angsur terdapat penurunan dasar sungai ke arah hilir sungai. Adanya penurunan ini mengakibatkan cekungan sungai bertambah curam, sehingga potensi terjadinya runtuhnya tanggul (longsor) sangat besar. Ditambah lagi dengan adanya arah belikan sungai, yang menyebabkan erosi pada tanggul semakin kuat. Apabila dilihat kondisi tanggul di daerah ini, di beberapa tempang memang mengalami kerusakan termasuk yang kami teliti pada saat ini yaitu di Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro seperti yang terlihat pada gambar 1.

Dari hasil korelasi radagram GPR dengan data bor dari semua data, secara keseluruhan menunjukkan adanya korelasi pula dengan amplitude gelombang electromagnet. Pada perlapisan sedimentasi sungai menunjukkan selang-seling nilai amplitudo yang tinggi dan lemah. Hal ini dimungkinkan oleh karena jenis tanah terdapat kandungan pasir. Dimana pasir memiliki porositas yang cukup besar, sehingga pori batuan mudah terisi oleh fluida. Kemudian adanya fluida yang memasuki pori batuan mengakibatkan nilai konstanta dielektriknya menjadi semakin besar, karena kecepatan penjalaran gelombang semakin kecil dan hal ini dapat ditunjukkan dengan adanya amplitudo yang lemah. Kemudian lapisan pasir ini bertumpuk dengan jenis batuan lainnya yaitu lempung sehingga nilai amplitudonya bervariasi, yang menandakan bahwa pada daerah ini terjadi proses erosi yang terus menerus (Bares, M *et al.*, 1991).

2.4.2 Penelitian di Desa Kedung Harjo

Apabila dilihat kondisi geologinya daerah Bengawan Solo, khususnya Desa Kedung Harjo tersusun atas endapan fluivial. Fluvial merupakan satuan batuan yang memiliki umur paling muda yaitu kuartar (*Holosen*) tersusun oleh pasir, lempung, lanau, kerikil hasil dari kegiatan sungai dan gelombang. Endapan fluvial terjadi akibat aktifitas Sungai Bengawan Solo, dan saat ini proses pengendapannya masih berlangsung. Material lanau lempung, pasir dan kerikil tersebar disepanjang mulai Widang sampai Soko dan sekitar Singgahan-Bangilan-Senori dan Parengan.

Pada penelitian terdahulu di sungai bengawan solo yang terdapat di desa Kedung Harjo (setiawati ., 2007), dapat diamati bahwa terdapatnya pendangkalan dasar sungai pada daerah lintasan widang I (ke arah utara/hulu sungai). Kemudian secara berangsur-angsur terdapat penurunan dasar sungai ke arah hilir sungai. Adanya penurunan ini mengakibatkan cekungan sungai bertambah curam, sehingga potensi terjadinya runtuhnya tanggul (longsor) sangat besar. Ditambah lagi dengan adanya arah belokan sungai, yang menyebabkan erosi pada tanggul semakin kuat.

Maka dari hasil kelima data tersebut, akumulasi lapisan tanah lempung dan pasir, banyak terakumulasi pada sisi kiri penampang yang merupakan bagian timur tanggul sungai, maka pada daerah tanggul sebelah timur, menjadi mudah tererosi dan longsor. Hal ini terbukti pada penampakan visual di lapangan, tanggul yang mengalami kerusakan paling parah terdapat pada daerah tanggul sebelah timur.

2.4.3 Perencanaan Peningkatan Kapasitas *Floodway* Pelangwot-Sedayulawas Sungai Bengawan Solo

Kondisi *floodway* Pelangwot-Sedayulawas dipengaruhi oleh debit Sungai Bengawan Solo dimana inlet dari *floodway* berupa pintu pengatur yang dapat dibuka tutup untuk mengurangi debit Sungai Bengawan Solo dibagian hilir. Sedangkan dibagian hilir *floodway* Pelangwot-Sedayulawas adalah muara laut jawa(Riyanto M *et al.*, 2013).

Pada saluran Floodway Pelangwot kondisi hilir saluran merupakan muara yang langsung menuju Laut Jawa sehingga kondisi Pasang surut air laut menjadi batasan pada hilir saluran Floodway Pelangwot. Pasang surut menjadi syarat batas bagian hilir pada saluran Floodway Pelangwot dalam model analisis program bantu HEC-RAS sehingga kondisi kecepatan, Debit yang masuk serta efek Backwater pada saluran *floodway* dapat dianalisis.

Hasil analisis pada HEC-RAS menunjukkan bahwa terjadi backwater (air balik) pada saluran Floodway Pelangwot. Hal tersebut disebabkan oleh pasang surut air laut dimana keadaan pasang air laut tertinggi pada -0.2 m dan surut terendah pada -2 m. Pengaruh backwater (air balik) mencapai 4.839 Km. Hasil analisis program bantu HEC-RAS terhadap pengaruh backwater akibat pasang surut air laut.

2.4.4 Identifikasi Zona Rawan Banjir Menggunakan Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus: Sub DAS Dengkeng)

Kondisi air di sepanjang hulu sungai Bengawan Solo semakin memburuk. Penggundulan hutan, sedimentasi, penambangan pasir dan pencemaran air, yang merupakan akibat dari ulah manusia adalah beberapa penyebab dari rusaknya daerah aliran sungai Bengawan Solo dari hulu sampai ke hilir. Dengan masih banyaknya kerusakan DAS, maka akan timbul beberapa bencana seperti: banjir, kekeringan, dan longsor. Tujuan penelitian ini yaitu memberikan informasi berdasarkan data yang ada mengenai kondisi kerawanan banjir di wilayah Sub DAS Dengkeng (Aji *et al.*, 2014).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode skoring dan tumpang susun (*overlay*). Skoring peta jenis tanah, peta curah hujan, peta kemiringan lereng, peta jaringan sungai dan peta penggunaan lahan yang bobotnya sesuai dengan tabel di atas kemudian di *overlay* untuk mendapatkan peta kerawanan banjir.

Dari hasil survei lapangan dihasilkan bahwa beberapa kondisi lapangan yang tidak sesuai dengan hasil dari penelitian. Pada survei lapangan di atas, terletak di desa Jimbung, Kecamatan Kalikotes, Kabupaten Klaten didapatkan penggunaan lahan berupa perairan yaitu rawa, terletak di daerah yang datar

dan mempunyai kerapatan aliran yang baik dengan banyaknya sungai dan sungai kecil di daerah tersebut, sedangkan hasil analisa untuk penggunaan lahan juga berupa perairan dengan kemiringan lereng 0-8% dan mempunyai kerapatan aliran antara 1,45-2,27 km/km² yang termasuk dalam kelas yang cukup baik dan memiliki jenis tanah Regosol Kelabu dan Coklat Kekelabuan.

Untuk daerah yang tidak rawan banjir termasuk kawasan yang memiliki resapan yang baik dan normal alami berada pada kemiringan lereng antara 15-25% mempunyai kerapatan jaringan sungai yang baik >2,27 km/km² dengan penggunaan lahan berupa sawah, semak dan kebun serta berada pada jenis tanah regosol kelabu dan coklat kekelabuan.

Untuk daerah yang rawan banjir terdapat pada kawasan yang memiliki resapan buruk berada pada kemiringan lereng antara 0-15% yang mempunyai sungai kurang baik 0,62-2,27 km/km² dengan penggunaan lahan berupa pemukiman, sawah dan tegalan serta sebagian besar terdapat pada jenis tanah regosol kelabu tua, litosol dan grumosol.

Untuk daerah yang sangat rawan terhadap banjir termasuk dalam kawasan yang memiliki resapan air sangat buruk terdapat pada kemiringan 0-15% yang mempunyai sungai yang tergolong buruk <0,62 km/km² dengan pola penggunaan lahan pemukiman dan intensitas hujan yang tinggi dengan jenis tanah litosol dan grumosol yang sifatnya dengan jenis tanah lempung atau tanah liat yang bersifat kedap air hal ini mengakibatkan daya resap air hujan berkurang.

Dari kelima faktor penentu zona rawan banjir, faktor yang paling besar adalah faktor yang mempengaruhi kondisi resapan air yaitu kemiringan lereng kemudian jaringan sungai. Pola pengaturan dan pemeliharaan jaringan sungai yang buruk dapat menyebabkan terjadinya limpasan serta genangan air. Akibat dari pengaturan dan pemeliharaan jaringan sungai yang buruk seperti bendungan rubuh maupun erosi di sungai-sungai utama Sub DAS Dengkeng yang tidak ditanggulangi menyebabkan terjadinya sedimentasi sungai. Faktor letak geografis Sub DAS Dengkeng yang berada di lereng gunung berapi juga berpengaruh, karena sering terjadi banjir lahar dingin berupa air, batu serta pasir dari gunung

berapi. Hal tersebut juga sangat berpengaruh terhadap kondisi dari sungai utama di Sub DAS Dengkeng yang mengalami sedimentasi yang cukup besar.

2.5 Penerapan GPR di Sungai

Metode GPR untuk identifikasi dasar sungai (*subbottom profiling*) bias menggunakan frekuensi alat yang lebih kecil di bawah 100 MHz. pemilihan frekuensi sebenarnya tergantung kebutuhan dilapangan, tapi untuk mendapatkan dasar sungai lebih besar dari 10 meter lebih baik menggunakan frekuensi <100MHz. selain itu ketika kita melakukan pengukuran diatas air maka ada penyerapan energy gelombang elektromagnetik yang dipancarkan *transmitter* ke *receiver*. Sehingga sangat penting dalam memilih jenis frekuensi yang akan digunakan. Dalam pengambilan data ini kami menggunakan frekuensi 90 MHz dari MALA. Frekuensi ini lebih spesifik untuk kebutuhan *skin depth* yang lebih dalam sehingga ketika ada lapisan yang menjadi penghambat (*absorbs*), minimal setengah dari kedalaman maksimal bias digunakan untuk dilakukan interpretasi.



Gambar 2.17 Prinsip Pengukuran GPR dan Radagram



Gambar 2.18 *Rawdata Radagram*

Bentuk radagram yang dihasilkan dari pengukuran di permukaan tanah dan air akan berbeda, ketika mengukur diatas tanah amplitudonya akan lebih kuat, tapi ketika pengukuran diatas sungai/air maka amplitudonya akan relative lebih kecil dibandingkan dengan di darat. Selain itu parameter yang digunakan juga berpengaruh, ketika sampling frekuensi yang digunakan tinggi maka amplitudonya relative lebih runcing jika dibandingkan dengan sampling frekuensi yang kecil. Kecil besar sampling frekuensi yang digunakan tergantung kebutuhan dan dan kondisi daerah pengukuran.

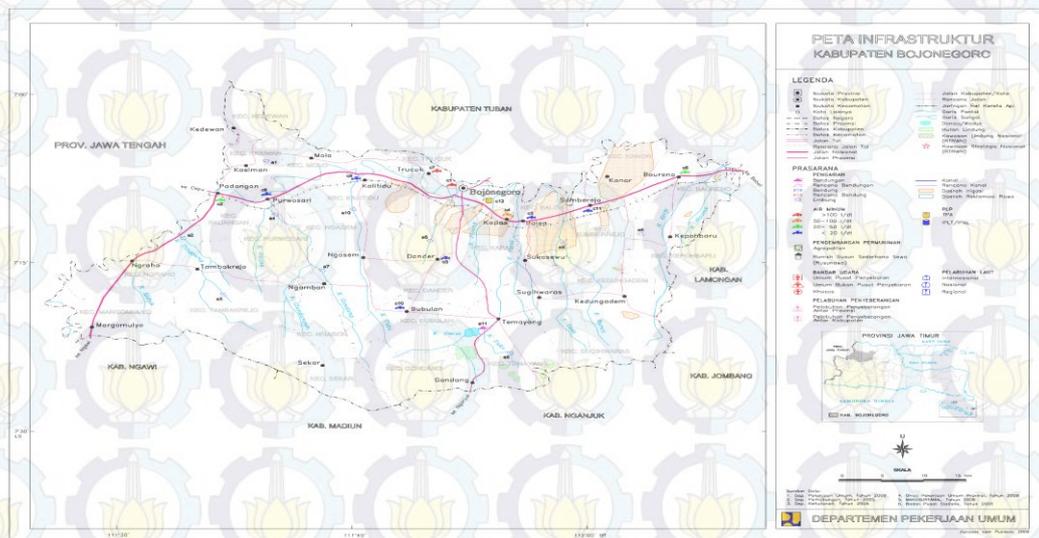
BAB III METODELOGI PENELITIAN

3.1 Kondisi Umum Daerah Penelitian

3.1.1. Pemilihan Lokasi

Sungai Bengawan Solo dipilih sebagai lokasi studi Tesis kami karena berdasarkan evaluasi penelitian terdahulu dari Dinas Pekerjaan Umum Pengairan Propinsi Jawa Timur dan masukan dari masyarakat bahwa sebagian besar tanggul Sungai Bengawan Solo adalah rawan terhadap keruntuhan dan erosi, termasuk salah satunya adalah di Desa Kanor, Kabupaten Bojonegoro. Lihat pada gambar

3.1.



Gambar 3.1. Peta Geomorfologi Kabupaten Bojonegoro

Secara umum lokasi penelitian ditinjau fisiografi regional merupakan lajur Randu Blatung yang membujur dengan arah Barat – Timur dan merupakan daerah aliran Sungai Bengawan Solo. Aliran sungai umumnya berkelok-kelok dan bermeandear dengan sungai utama Bengawan Solo.

3.1.2. Kondisi Geomorfologi

Berdasarkan pembentukannya dataran rendah dapat dibedakan menjadi dataran pantai, dataran fluvial, dan rawa. Pada daerah penelitian merupakan dataran *fluvial* yang terdiri atas material lanau, lempung, pasir dan kerikil tersebar

di sepanjang Sungai Bengawan Solo termasuk daerah yang teliti di Desa Kanor. Daerah ini didominasi ketinggian antara 0-25 meter walaupun ada sebagian kecil yang memiliki ketinggian di atas 25 meter.

3.1.3 Stratigrafi

Daerah penelitian seperti halnya daerah lainnya yang terletak di sisi aliran Sungai Bengawan Solo ditinjau dari stratigrafinya merupakan batuan termuda / *Alluvium* yang terdiri dari endapan banjir dan undak sungai.

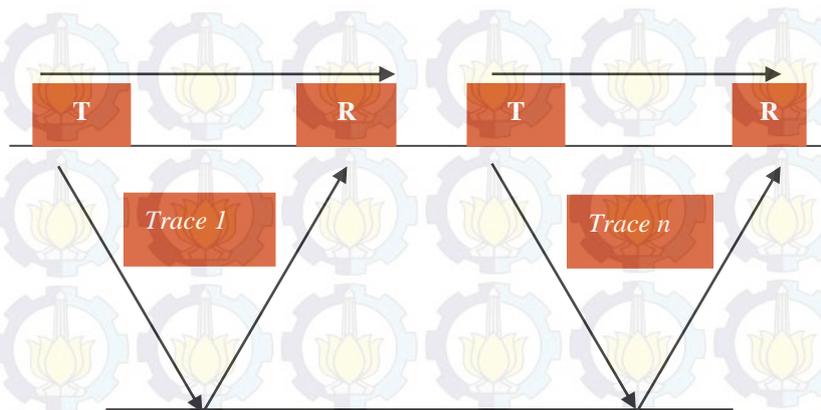
Alluvium ini terdiri dari lempung, pasir, kerikil dan kerakal. Umur satuan ini diduga dari Pleistosen akhir hingga sekarang. Ketebalannya beberapa cm hingga puluhan meter. Deskripsi dari *alluvium* sebagai berikut :

- Lempung berwarna kelabu muda hingga kelabu tua dan kecoklatan; mengandung pasir halus hingga kasar, terpilah buruk, perairan dan perlapisan dari beberapa cm hingga beberapa puluhan meter; perlapisan selang-seling berukuran kecil; umumnya lunak.
- Pasir, kelabu hingga kelabu kecoklatan; berbutir halus hingga ukuran lanau, kasar sampai sangat kasar, terpilah buruk; perlapisan selang-seling dan perlapisan bersusun; agak mampat. Kerikil dan kerakal; terdiri dari batuan aneka bahan, berukuran beberapa cm hingga puluhan cm, namun ada yang berukuran bongkah. Pada daerah tersebut telah terbentuk konglomerat, terpilah buruk, dasar batuan berupa batu pasir; belum mampat.

3.2 Akuisisi Data GPR

3.2.1. Ground Penetrating Radar (GPR)

Terdapat tiga cara penggunaan system radar yakni : *Reflection Profiling*, *Wide Angle Reflection and Refraction (WARR)* atau *Common Mid Point (CMP) sounding*, dan *Tranillumination* atau *Radar Tomography*. Dalam Tesis ini digunakan metode *Radar Reflection Profiling*. Cara ini dilakukan dengan membawa antenna radar bergerak bersamaan di atas permukaan tanah dimana nantinya hasil tampilan pada radargram merupakan kumpulan tiap titik pengamatan. Ilustrasi *Radar Reflection Profiling* dapat dilihat pada gambar (3.2).



Gambar 3.2. Ilustrasi *Radar Reflection Profiling*

Dalam peralatan *Ground Penetrating Radar (GPR)* terdapat bagian komponen penting. Komponen tersebut adalah :

1. *Control Units (CUII)*

Control Units adalah pengatur pengumpulan data computer (*32-bit processor*) yang memberikan informasi lengkap, bagaimana prosedur yang harus dilakukan, dan kapan saat system diaktifkan, *Control unit* mengatur *transmitter* dan *receiver*. Selain itu juga menyimpan *track* dari tiap posisi dan waktu. Biasanya waktu yang digunakan untuk mengambil sebuah *trace* sangat singkat sehingga tidak perlu dihentikan tiap titik pengukuran. Selain itu, pengumpulan data dapat pula dilakukan dengan berjalan sepanjang garis. *Control Unit* menyimpan data mentah dalam sebuah *buffer* sementara dan saat dibutuhkan, dapat diambil dan ditrasfer ke computer. Lihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. *Control Unit GPR*

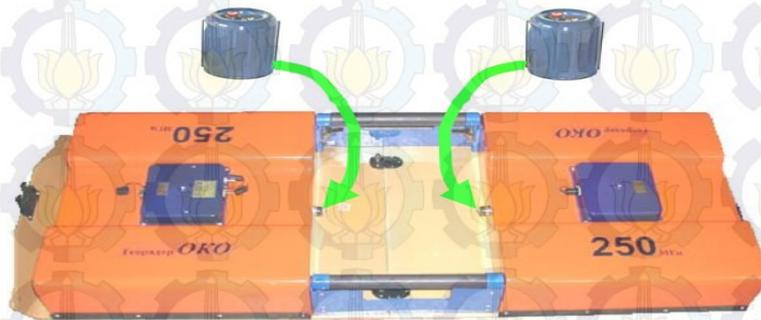
2. *Transmitter*

Unit ini menghasilkan energy EM dan mengirimnya pada daerah sekitar, khususnya ke dalam medium yang akan diobservasi. Energy dalam

bentuk pulsa pada amplitudo tinggi (370 V) dipindahkan ke bagian antenna. Dalam bagian antenna, pulsa ditrasformasikan dan diperkuat bergantung pada frekuensi antenna. Pulsa ditrasmisikan setiap saat ketika control sinyal diterima melalui kabel optik. Pada penelitian tesis ini digunakan antenna dengan frekuensi 90 MHz. Lihat pada gambar 3.4.

3. Receiver

Receiver mengkonversi sinyal yang diterima antenna ke bentuk nilai integer. Ada dua konektor optik pada unit ini, pertama digunakan untuk mentrasfer *control signal* dari *control unit* (yang bertanda R) dan lainnya mengirim data yang diperoleh ke *control unit* (yang bertanda D). Lihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. *Trasmitter* dan *Receiver* pada GPR

3.2.2 Cara Kerja Dari *Ground Penetrating Radar* (GPR)

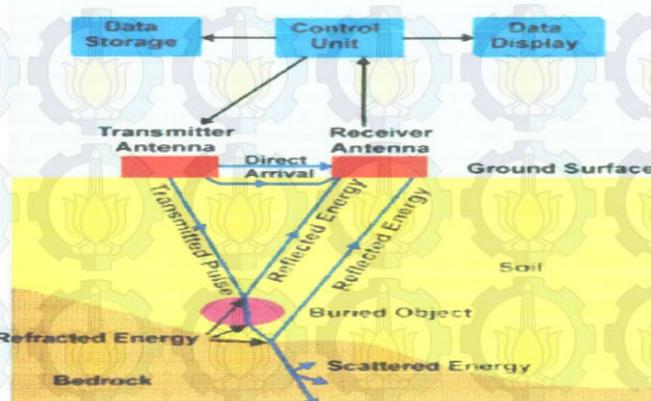
Sebuah sistem GPR terdiri dari beberapa komponen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.5, Data GPR diambil di sepanjang lintasan dan secara simultan direkam pada hard drive. Ketika gelombang radar menemui diskontinuitas struktural (contohnya keretakan, kekosongan atau perbedaan sifat material yang drastis), sebagian dari gelombang tersebut akan dipantulkan dan akan membentuk impuls sekunder. Impuls tersebut kemudian ditangkap oleh antenna receiver dan kemudian direkam berupa data pengamatan, dan jika data tersebut diinterpretasikan secara benar, maka data tersebut akan menunjukkan struktur bawah permukaan dari benda/material yang ingin kita amati.

Ketika data diambil secara terus-menerus, skala horizontal pada radargram

ditentukan oleh kecepatan gerakan antenna atau roda bertali (hip chain) yang terikat pada tempat tertentu di awal lintasan. Skala vertikal adalah interval rekaman kedalaman yang diatur pada sampling frekuensi. Interval rekaman mempresentasikan two-way travel time maksimum yang direkam. Travel time GPR kemudian dikonversikan ke kedalaman (*depth conversion*) dengan kalibrasi terhadap objek yang telah diketahui kedalamannya atau dengan melakukan *common midpoint stack* dengan antenna bistatik di sekeliling reflektor datar dan memisahkan antara *transmitter* dan *receiver*.

Respon dari sistem radar berhubungan dengan filter dari antenna *transmitter* dan *receiver* dan respon target berhubungan dengan refleksi objek bawah permukaan (*subsurface*). Pendeteksian GPR selanjutnya adalah masalah penginderaan dan pengukuran target menggunakan sinyal masukan (*input signal*) yang telah diketahui dan melakukan analisis sinyal keluaran (*output signal*) yang diobservasi.

Kemampuan penetrasi GPR tergantung pada frekuensi sinyal, efisiensi radiasi antenna dan sifat dielektrik material. Sinyal radar dengan frekuensi yang tinggi akan menghasilkan resolusi yang tinggi dengan kedalaman penetrasinya terbatas, sebaliknya sinyal radar dengan frekuensi rendah akan menghasilkan penetrasi kedalaman yang jauh tetapi resolusinya rendah (Arcone, 1984).



Gambar 3.5. Alur kerja GPR

3.2.3. Pengambilan Data

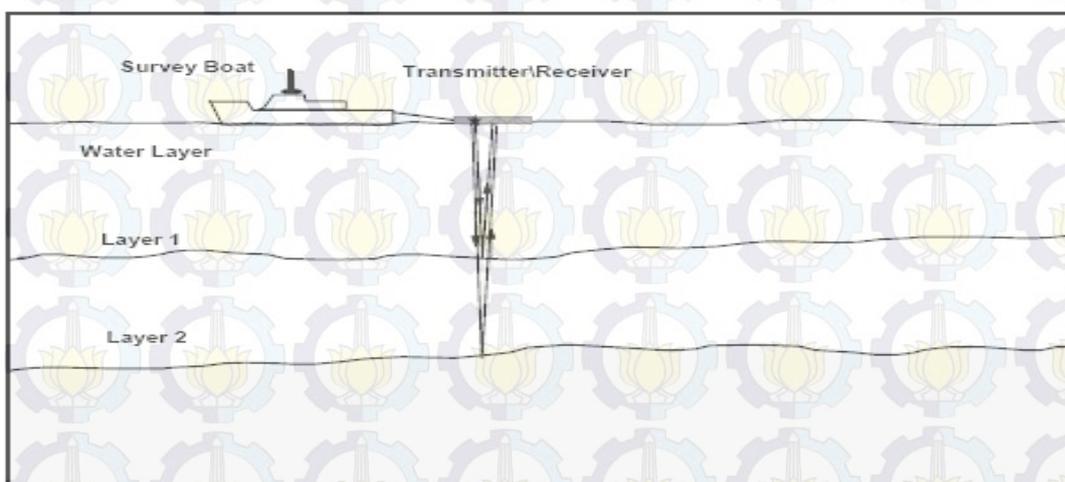
Lokasi pengambilan data dilakukan di sepanjang Sungai Bengawan Solo di Desa Kanor, Kabupaten Bojonegoro. Proses pengambilan data dilakukan diatas

perahu dengan melintasi permukaan Sungai Bengawan Solo, baik arah tegak lurus maupun sejajar aliran sungai.

Sungai Bengawan Solo dipilih sebagai lokasi studi karena berdasarkan evaluasi penelitian terdahulu dari Dinas PU Pengairan Propinsi Jawa Timur bisa diambil kesimpulan bahwa sebagian besar tanggul Sungai Bengawan Solo adalah rawan terhadap keruntuhan. Dan Kabupaten Bojonegoro, tepatnya di Desa Kanor dipilih sebagai lokasi penelitian dikarenakan terdapat beberapa titik longsor. Daerah longsor tersebut dapat dilihat pada gambar 1.1.

Pemilihan frekuensi antenna ditentukan oleh tujuan survey yaitu menentukan kedalaman/resolusi yang dibutuhkan. Pada penelitian sedimentasi Sungai Bengawan Solo di Daerah Kanor, digunakan frekuensi antenna 90 MHz. Dengan menggunakan frekuensi tersebut, maka akan didapatkan penetrasi kedalaman hingga 10-20 meter.

RSMSC/GPR dapat dilakukan *triggering* dengan cara yang berbeda pada saat melakukan survey. Pemilihan metode *triggering* bergantung pada beberapa factor yaitu tujuan survey, pemilihan antenna, keperluan untuk proses data lebih lanjut, peralatan yang mendukung. Proses pengambilan data dilakukan di atas permukaan sungai dengan menggunakan perahu. Karena terdapatnya arus sungai yang labil, maka metode *triggering* yang digunakan adalah dengan pembacaan interval waktu (*time*) dengan tetap mempertahankan besarnya kecepatan jalannya perahu konstan. Proses pengambilan data dapat diilustrasikan pada gambar (3.7).



Gambar 3.7. Ilustrasi Akuisisi Data

Pengambilan data *GPR* ini tergolong praktis karena tidak memerlukan banyak orang dalam proses akuisisi. Pengambilan data dihubungkan pada *PC*. Sehingga data yang dihasilkan pun dapat tersimpan langsung dalam *PC*.

Dalam Tesis ini menghasilkan data sebanyak 6 data set. Terdapat 6 buah data yang posisi lintasannya memotong aliran sungai (timur-barat), kanor 1, kanor 2, kanor 3, kanor 4, dan kanor 5, kemudian untuk lintasan kanor 6 posisinya searah arah aliran sungai (utara-selatan). Berikut ini merupakan posisi lintasan dalam foto satelit. Dapat terlihat pada gambar (3.8).



Gambar 3.8. Posisi Lintasan Dalam Foto Satelit

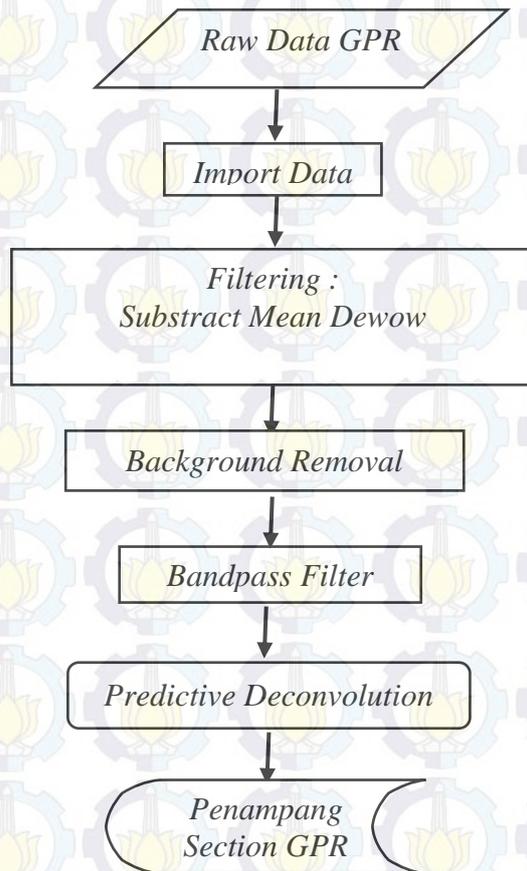
Keterangan :

- : Lintasan 1,2,3,4 dan 5
- : Lintasan 6

Lokasi pengambilan data daerah aliran Sungai Bengawan Solo yang terletak pada Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro. Daerah aliran sungai yang digunakan sebagai lokasi penelitian terletak Desa Kanor dengan koordinat $7^{\circ} 04' 21.1'' - 7^{\circ} 04' 08.9''$ LS dan $112^{\circ} 00' 55.1' - 112^{\circ} 00' 57.4'$ BT. Secara umum kondisi geologi pada Kabupaten Bojonegoro terdapat lapisan batu kapur disisi utara dan pada daerah aliran Sungai Bengawan Solo umumnya didominasi oleh *aluival* muda di jaman quarter.

3.3. Pengolahan Data

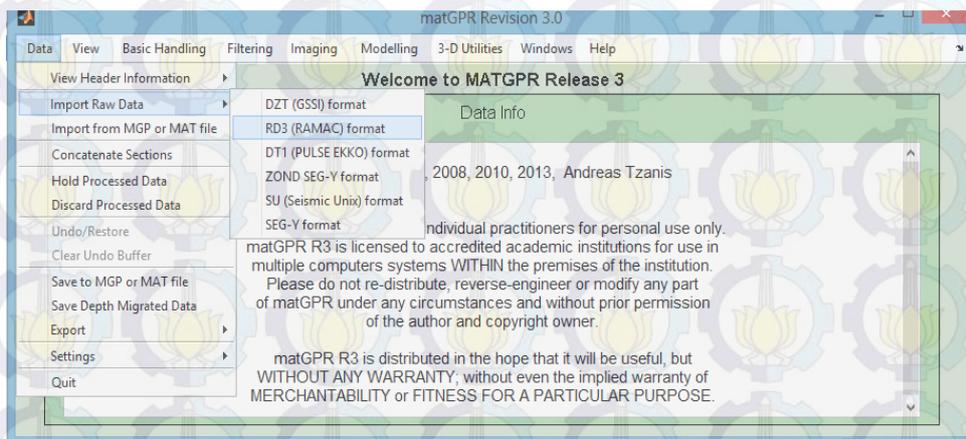
Hasil pengukuran *GPR* kemudian diolah dengan menggunakan perangkat lunak *Software matGPR* sehingga profiling/citra gambaran bawah permukaan dapat dicitrakan dengan resolusi tinggi. Alur pengolahan data *GPR* dapat dilihat pada gambar diagram alir 3.9 di bawah ini :



Gambar 3.9. Diagram alir kerja pengolahan data

3.3.1. Import Data

Data yang didapatkan dari akusisi, merupakan data yang berformat *GeoScan/GPR* itu sendiri. Data ini dapat dikonversi menjadi data *SEG-Y* dan *PCX*. Namun dalam pengolahan data Tesis ini, tidak perlu pengkonversian data. Karena software yang digunakan *matGPR Revision 3.0* telah mengenali format data yang dihasilkan *GPR*. Dimana format yang akan dibaca oleh perangkat lunak ini akan memiliki format file yaitu **.rad*. dan berikut ini merupakan contoh dari menu *import data*. Dapat terlihat pada gambar (3.10).



Gambar 3.10. Tampilan menu import data

3.3.2. Filtering

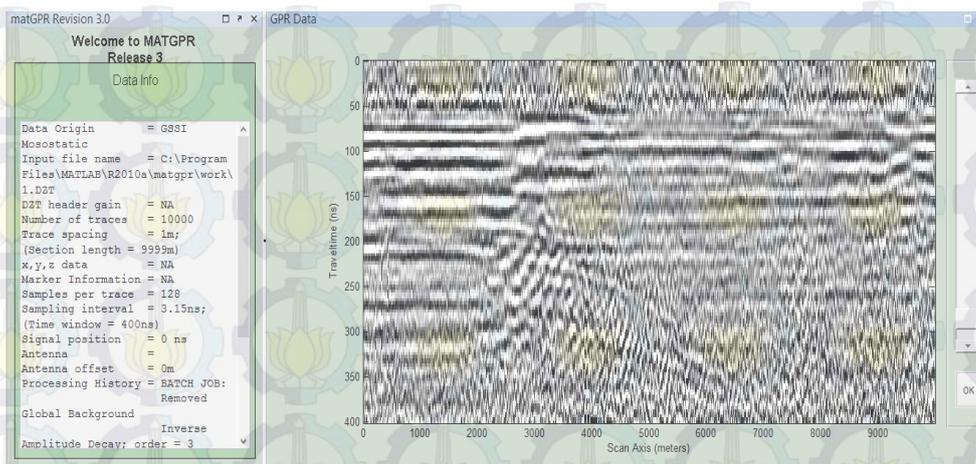
Alasan utama dari filter frekuensi adalah untuk menghilangkan frekuensi tertentu (*noise*) dari data GPR dan untuk meloloskan data sisanya. *Noise* adalah gangguan yang tidak diharapkan yang sering muncul pada saat pengambilan data GPR. *Noise* dan sinyal bisa dibedakan melalui sifat-sifatnya yang khas. Ciri-ciri sinyal pada penampang GPR antara lain :

- Mempunyai kecepatan yang paling besar dibandingkan gelombang pada jenis lain.
- Amplitudo relatif lebih besar.
- Frekuensi yang relatif lebih besar dibanding dengan gelombang lain.

Pada pengolahan data GPR dalam penelitian ini terdapat tiga macam jenis filter yang digunakan, yaitu :

1) *Subtract Mean Dewow*

Filter ini digunakan pada awal pemrosesan data GPR. Tujuan dari filter ini adalah untuk menghilangkan *noise* yang memiliki frekuensi rendah. Lihat pada gambar 3.11.

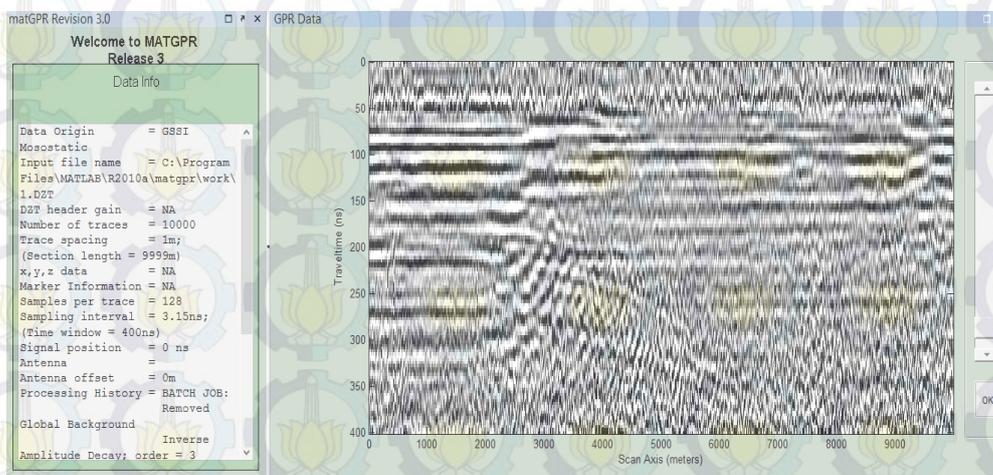


Gambar 3.11. Tampilan menu *Subtract Mean Dewow*

2) *Background Removal*

Filter ini termasuk dalam filter 2D, karena proses pemfilteran dapat dilakukan baik pada domain waktu maupun jarak. Jadi noise dapat dihilangkan pada domain waktu dan kedalaman tertentu (posisi letak *noise*), tanpa mempengaruhi atau mempengaruhi sinyal yang diinginkan.

Lihat pada gambar 3.12.

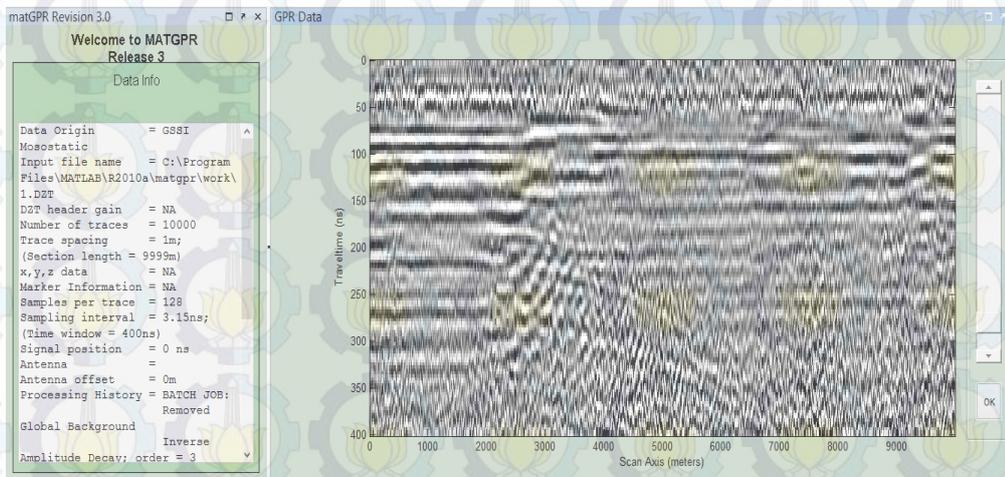


Gambar 3.12. Tampilan menu *Background Removal*

3) *Bandpass Filter*

Bandpass filter adalah metoda yang digunakan untuk menekan *noise* yang ada di luar spektrum frekuensi dari sinyal yang diinginkan.

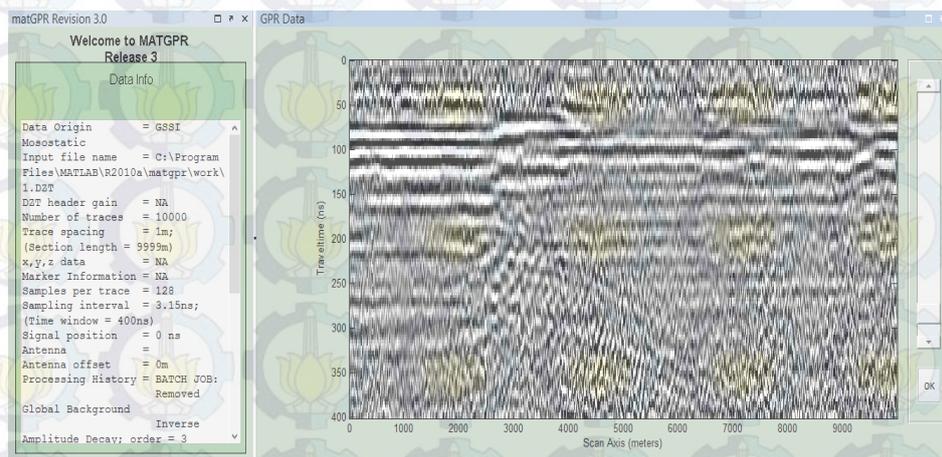
Lihat pada gambar 3.13.



Gambar 3.13. Tampilan menu *Bandpass Filter*

3.3.3. *Predictive Deconvolusi*

Pada umumnya diasumsikan *trace* gelombang elektromagnetik merupakan hasil konvolusi antara *wavelet* sumber (yang juga merupakan hasil *konvolusi* dari sumber gelombang, filter alat, dll) dengan koefisien refleksi/impuls respon bumi (rapat massa dan kecepatan / impedansi dielektrik). Maka untuk mengembalikan bentuk *output* "ideal" yang menyerupai deret koefisien refleksi dilakukan suatu proses yang disebut : dekonvolusi / *inverse filter*. Lihat pada gambar 3.14.



Gambar 3.14. Tampilan menu *Predictive Deconvolution*

Jika $x(t)$ adalah *trace* seismik, $w(t)$ adalah *wavelet* dan $e(t)$ adalah koefisien refleksi atau impuls respon dari bumi, maka : $x(t) = w(t) * e(t)$

Dimana (*) menyatakan konvolusi.

Bila diambil $a(t)$ adalah invers atau dekonvolusi maka impuls respon dari bumi dapat ditulis : $e(t) = a(t) * x(t)$

Dalam proses dekonvolusi dikenal beberapa macam metode, namun yang paling sering digunakan adalah *predictive deconvolution* dan *minimum phase spiking*. *Predictive deconvolution* didesain dengan menggunakan fungsi autokorelasi dari *trace* masukan yang diasumsikan sebagai *predictive deconvolution* karena efeknya menekan gangguan yang diramalkan setelah terjadi peristiwa refleksi seperti multiple dan filter yang digunakan diperoleh dengan metode statistic dari data itu sendiri. Sedangkan dekonvolusi yang menggunakan operator filter yang sudah diketahui atau didesain untuk menampilkan suatu bentuk tertentu digunakan metode dekonvolusi deterministik dan contoh dari metode dekonvolusi ini adalah *spiking deconvolution*.

3.4. Interpretasi Data

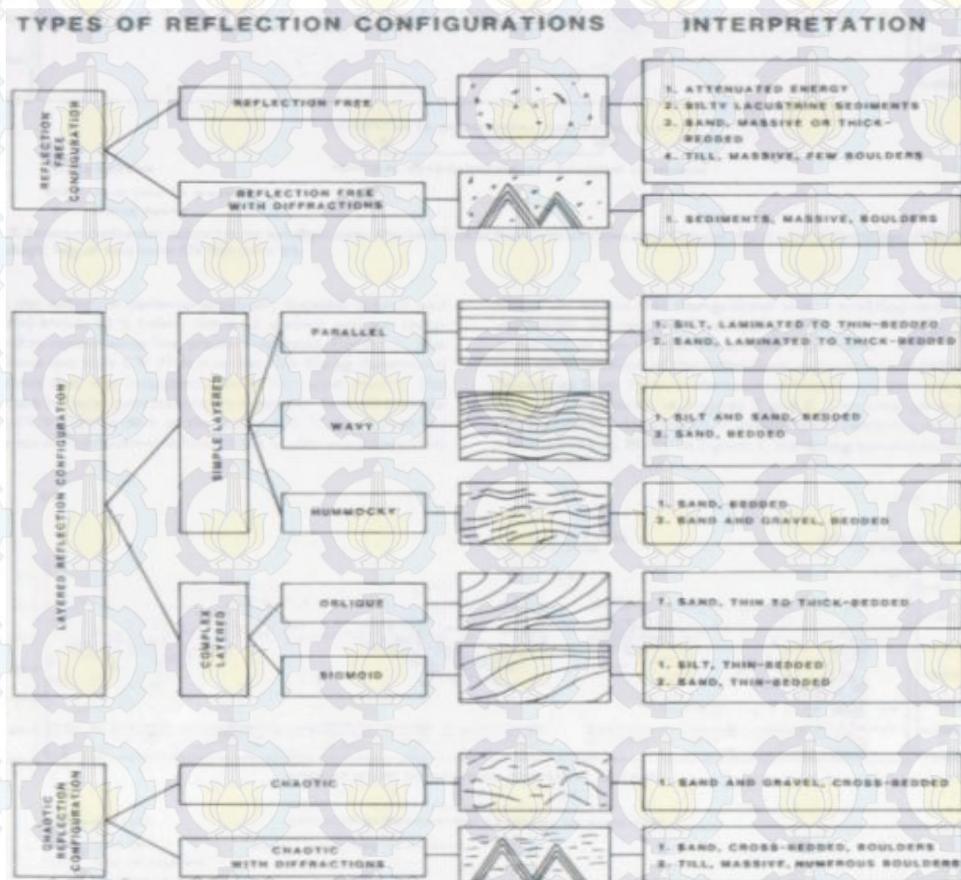
Apabila dilihat dari kondisi geologinya daerah Bengawan Solo, khususnya Desa Kanor tersusun atas endapan fluvial. Fluvial merupakan satuan batuan yang memiliki umur paling muda yaitu kuartar (*Holosen*) tersusun oleh pasir, lempung, lanau, kerikil hasil dari kegiatan sungai dan gelombang. *Endapan fluvial* terjadi akibat aktifitas sungai Bengawan Solo, dan saat ini proses pengendapannya masih berlangsung. Material lanau, lempung, pasir dan kerikil tersebar di sepanjang Desa Kanor.

Dalam pembahasan interpretasi data ini, tentunya selain data yang diperoleh dari akuisisi data lapangan, juga terdapat data pembanding yaitu berupa data bor, seperti yang ditunjukkan pada tabel data 3.1 di bawah ini:

Kedalaman	Jenis tanah dan batuan
0 – 4.5 meter	Lempung
4.5 – 8.5 meter	Lempung, berpasir
8.5 – 14.5 meter	Pasir berlanau
14.5 – 19.5 meter	Lempung
19.5 – 22.5 meter	Lempung berlanau

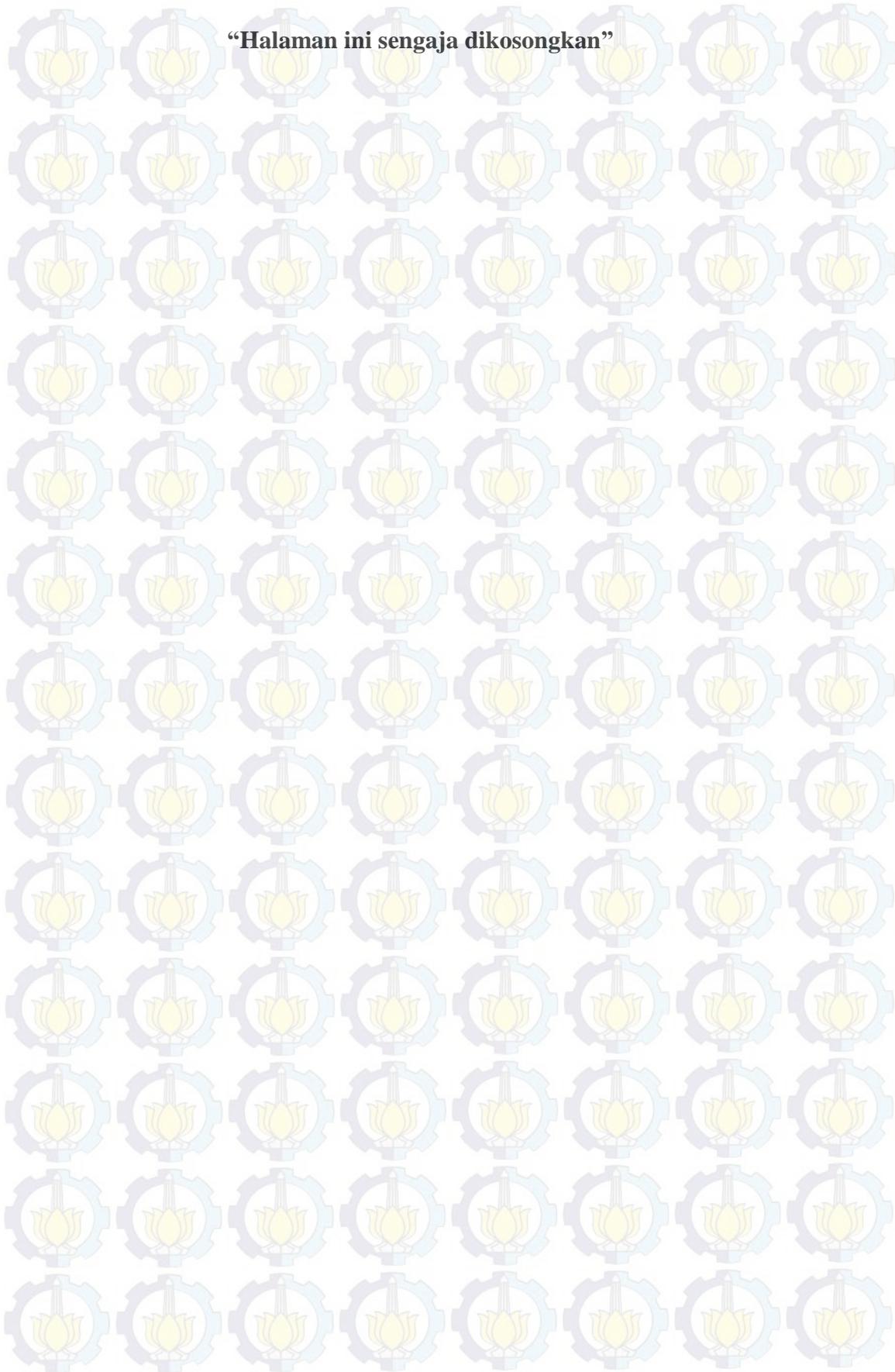
Tabel 3.1. Data Bor Kanor (Lab. Mekanika Tanah dan Batuan Teknik Sipil, FTSP,ITS, 2005)

Selain itu untuk menentukan karakteristik reflektor dari data GPR yang dihasilkan juga akan dibandingkan dengan tabel penentuan tipe sedimentasi bawah permukaan yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Beres dan Haeni, 1991). Berikut ini merupakan gambar 3.15 tersebut :



Gambar 3.15. Tipe sedimen sungai dengan menggunakan GPR (Beres Haeni, 1991)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Akuisisi data *Ground Penetrating Radar (GPR)* dalam Tesis ini dilakukan di daerah Sungai Bengawan Solo, tepatnya di Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro. Pengukuran dilakukan di sepanjang Sungai Bengawan Solo dengan arah lintasan tegak lurus dan sejajar arus sungai. Peralatan GPR yang telah diinstalasi (*antenna*, *receiver*, dan *transmitter*), kemudian diletakkan diatas permukaan sungai yang kemudian ditarik dengan perahu untuk menyeberangi sungai. Pengukuran dimulai seiring dengan berjalannya perahu. Mengingat kondisi pengambilan data dilakukan di permukaan sungai yang memiliki arus dengan debit 24,574 m³/s (data penelitian Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil ITS, 2005), maka *trigger* yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan pengaturan waktu (*time*), dengan tetap mempertahankan kecepatan perahu agar tetap konstan.

Pengukuran data dilakukan di sekitar tanggul yang mulai runtuh ke arah sungai. Keruntuhan tanggul kemungkinan disebabkan karena adanya ketidakstabilan tanah akibat arus sungai yang mengikis dinding tanggul (erosi), pendangkalan sungai, dan sedimentasi. Pada penelitian ini, permasalahan lebih difokuskan pada struktur bawah permukaan dasar sungai yaitu *scouring* dan *sedimentasinya*. Terdapat 6 data (lintasan yang akan dianalisa dan diinterpretasikan).

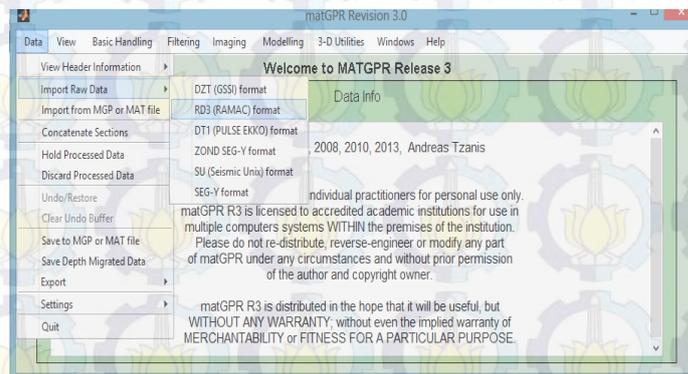
4.1. Analisa Data

Setelah data didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data. Tujuan paling utama dari tahap pengolahan data (*data processing*) ini adalah untuk mendapatkan hasil penampang radagram GPR yang maksimal (terbaik), dimana data yang didapatkan nantinya memiliki tingkat noise yang minimal dan beresolusi tinggi. Pada pengolahan data yang akan ditunjukkan pada analisa data ini. Pada hakikatnya pengolahan data GPR ini hampir sama dengan data seismik, dikarenakan hasil data yang didapatkan keduanya dalam bentuk penggambaran karakteristik fisis berupa amplitudo dan frekuensi

gelombang yang menjalar dalam medium (tanah). Yang membedakan hanya jenis gelombang yang digunakan pada saat akuisisi data, yaitu pada GPR menggunakan gelombang elektromagnet sedangkan pada seismik menggunakan gelombang elastis.

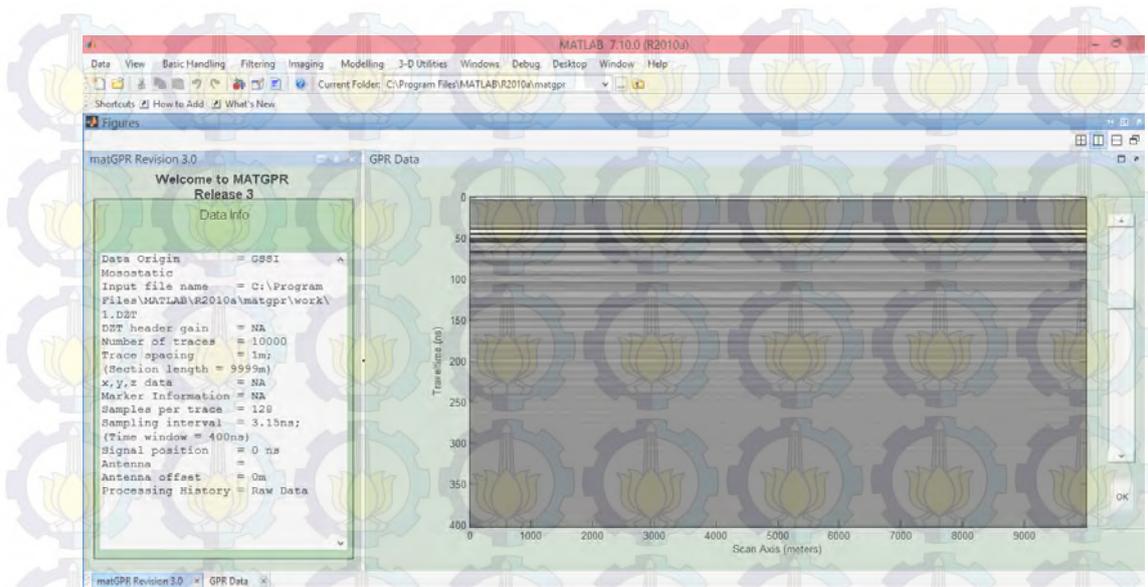
4.1.1. Import Data

Data yang didapatkan dari akuisisi, merupakan data yang berformat *GeoScan/GPR* itu sendiri (Tzanis, Andreas. 2013). Data ini dapat dikonversi menjadi data *SEG-Y* dan *PCX*. Namun dalam pengolahan Tesis ini, perlu pengkonversian data dari *GeoScan/GPR* untuk bisa di olah ke *matGPR Revision 3.0* karena format data yang dihasilkan oleh *GeoScan/GPR* tidak mengenalin data pada *matGPR Revision 3.0*. Maka data tersebut di konversi dengan *Reflexw versi 3.5* untuk bisa di baca oleh perangkat lunak ini akan memiliki format file yaitu **.rad*. Berikut ini merupakan tampilan dari menu import data.



Gambar 4.1. Tampilan menu import data

Setelah data dimasukkan ke dalam perangkat lunak maka akan terlihat tampilan data mentah (*Raw Data*) dari hasil pengukuran GPR yang telah dilakukan. Berikut ini merupakan tampilan dari *Raw Data* penampang GPR lintasan 1 (Gambar 4.2).

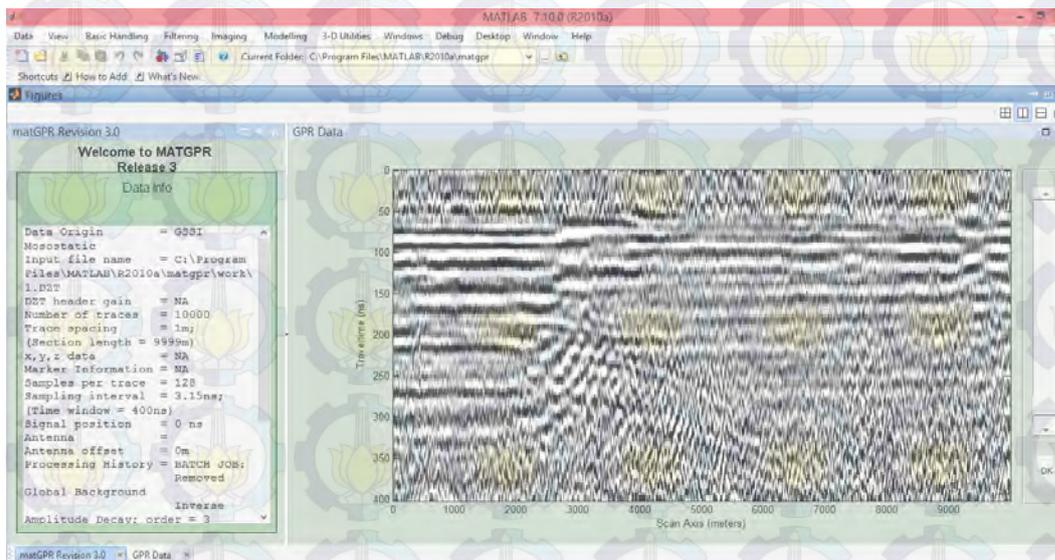


Gambar 4.2. *Raw Data* lintasan 1

Pada *Raw Data* penampang GPR ini dapat terlihat bahwa data masih memiliki resolusi yang sangat rendah dan dari data ini hanya dapat diamati satu lapisan horizontal yang merupakan lapisan pembatas antara udara dengan permukaan air. Adanya struktur lapisan bawah tanah tidak tampak. Selain itu, sinyal-sinyal gelombang elektromagnet dalam penampang ini masih sangat lemah. Oleh karena itu, diperlihatkan pengolahan data lebih lanjut untuk menghasilkan data rasio S/N (*Signal to Noise*) yang tinggi, sehingga akan menjadi lebih mudah untuk diinterpretasikan.

4.1.2. *Subtract Mean Dewow*

Tahapan pengolahan data ini merupakan salah satu filter yang berfungsi untuk menghilangkan noise berfrekuensi rendah atau dalam istilah *processing* dikenal sebagai *ringing*. Secara garis besar, filter ini bekerja pada setiap *trace* dalam penampang GPR. Ketika menu ini diaktifkan, maka filter akan menghitung nilai frekuensi rata-rata dari *trace*. Kemudian nilai frekuensi pada setiap parameter *time window* (dalam pengolahan data ini digunakan *time window* 10 ns) akan dikurangi dengan nilai rata-rata frekuensi yang telah dihitung. Sehingga noise berfrekuensi rendah (*ringing*) dapat dihilangkan dari data. Berikut ini merupakan hasil dari *Raw Data* yang telah dikenakan *Substract Mean Dewow*.

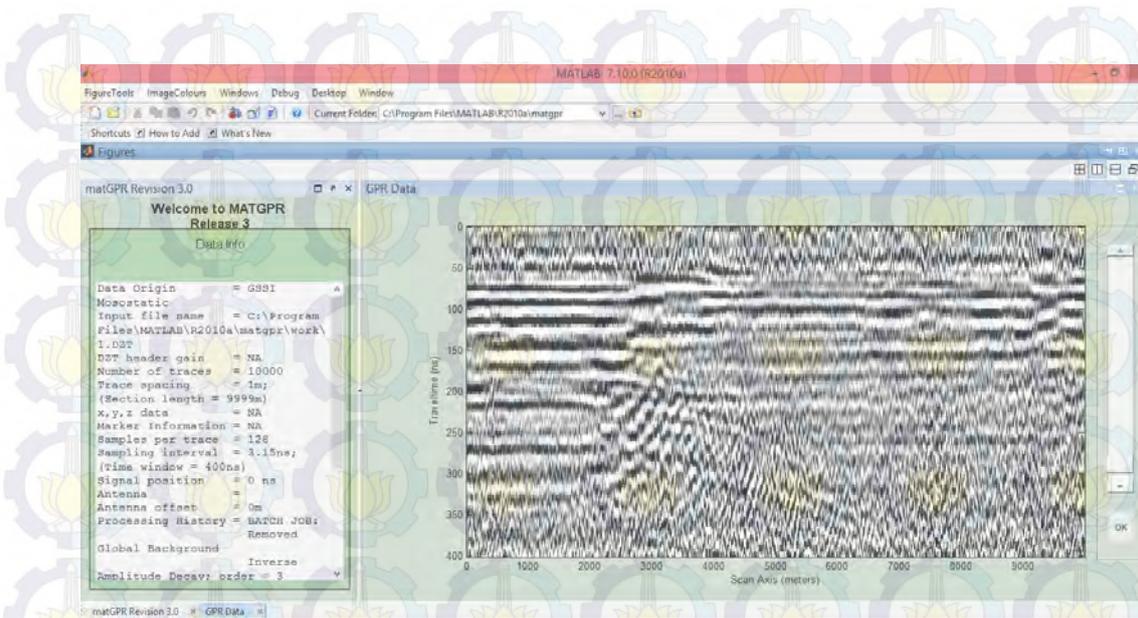


Gambar 4.3. Penampang GPR lintasan 1 setelah dikenakan *Substract Mean Dewow*

Pada penampang di atas sudah dapat terlihat adanya beberapa model lapisan tanah yang menurun membentuk cekungan. Lapisan ini merupakan lapisan dinding sungai yang telah mengalami *sedimentasi*.

4.1.3. Background Removal

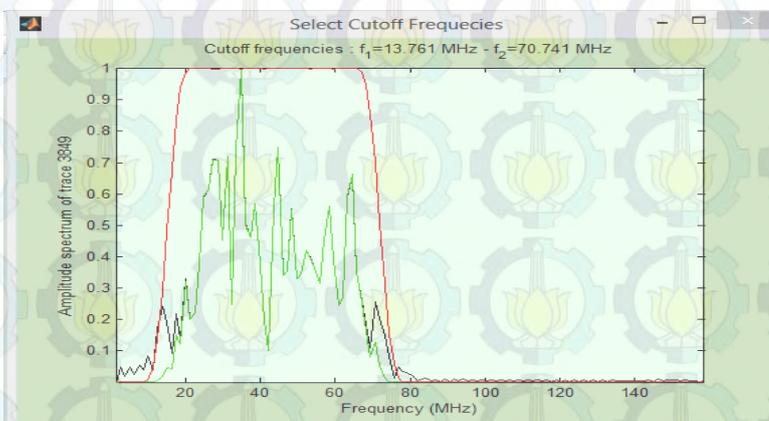
Menu ini juga merupakan salah satu filter yang digunakan pada penelitian ini. Filter ini termasuk dalam filter 2D, karena filter dapat diaktifkan sesuai dengan domain waktu (*time window*) dan domain jarak (*distance range*). Misalnya, terdapat *noise* di suatu *time window* tertentu maka filter dapat diaktifkan pada *time window* itu saja. Sehingga, *noise* dapat dihilangkan pada *time window* tersebut tanpa memfilter sinyal elektromagnetik di sekitarnya.



Gambar 4.4. Penampang GPR setelah dikenakan *Background Removal*

4.1.4. *Bandpass Filter*

Tahapan penyaringan atau *filtering* ini di gunakan untuk menghilangkan frekuensi yang tidak diinginkan yang kita asumsikan sebagai noise dari data georadar. Jenis filter ini yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Bandpass Frequency*. Pita filter dari *Bandpass Filter* ditentukan oleh pengaturan empat nilai frekuensi titik pertama menentukan *lower cut frequency*, titik kedua menentukan *lower plateau*, titik ketiga menentukan *upper plateau* dan yang terakhir menentukan *higher cut frequency*. spectrum frekuensi di bawah *lower cut frequency* dan di atas *higher cut frequency* akan di set ke nol.



Gambar 4.5. *CutOff Frequency*

<i>CutOff Frequency</i>	
Lintasan 1	$f_1 = 13,761 \text{ MHz}$
	$F_2 = 70,741 \text{ MHz}$
Lintasan 2	$f_1 = 14,85 \text{ MHz}$
	$f_2 = 69,289 \text{ MHz}$
Lintasan 3	$f_1 = 14,124 \text{ MHz}$
	$f_2 = 65,66 \text{ MHz}$
Lintasan 4	$f_1 = 18,842 \text{ MHz}$
	$f_2 = 70,015 \text{ MHz}$
Lintasan 5	$f_1 = 13,761 \text{ MHz}$
	$f_2 = 77,273 \text{ MHz}$
Lintasan 6	$f_1 = 12,672 \text{ MHz}$
	$f_2 = 72,555 \text{ MHz}$

Tabel 4.1. *CutOff Frekuensi pada Bandpass Filter*

Pada data lintasan 1 untuk frekuensi $X = 107,0331 \text{ MHz}$ dan $Y = 1435,7969$ pada amplitudo of trace 3849 maka *cutoff frequency* $F_1 = 13,761 \text{ MHz}$ dan $F_2 = 70,741 \text{ MHz}$ untuk menghilangkan noise yang tinggi. Maka dapat dilihat gambar di bawah ini setelah data pada lintasan 1 di filter dengan *Bandpass Filter*.



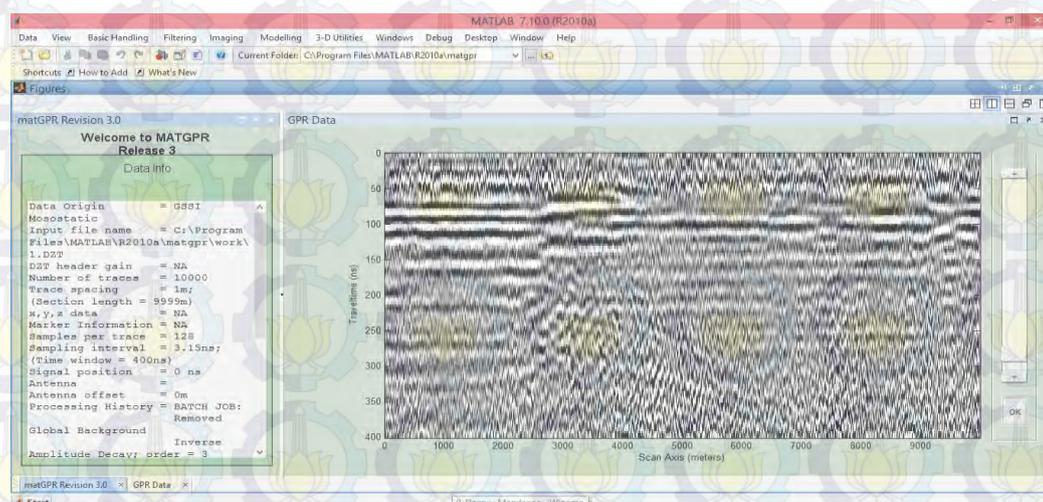
Gambar 4.6. Penampang GPR setelah dikenakan *Bandpass Filter*

4.1.5. *Prediktive Deconvolusi*

Pada umumnya diasumsikan *trace* gelombang elektromagnetik merupakan hasil konvolusi antara *wavelet* sumber (yang juga merupakan hasil *konvolusi* dari sumber gelombang, filter alat, dll) dengan koefisien refleksi/impuls respon bumi (rapat massa dan kecepatan / impedansi dielektrik). Maka untuk mengembalikan bentuk *output* "ideal" yang menyerupai deret koefisien refleksi dilakukan suatu proses yang disebut : dekonvolusi / *inverse filter*.

Jika $x(t)$ adalah *trace* seismik, $w(t)$ adalah *wavelet* dan $e(t)$ adalah koefisien refleksi atau impuls respon dari bumi, maka : $x(t) = w(t) * e(t)$

Dimana (*) menyatakan konvolusi. Bila diambil $a(t)$ adalah invers atau dekonvolusi maka impuls respon dari bumi dapat ditulis : $e(t) = a(t) * x(t)$ Dalam proses dekonvolusi dikenal beberapa macam metode, namun yang paling sering digunakan adalah *predictive deconvolution* dan *minimum phase spiking*. *Predictive deconvolution* didesain dengan menggunakan fungsi autokorelasi dari *trace* masukan yang diasumsikan sebagai *predictive deconvolution* karena efeknya menekan gangguan yang diramalkan setelah terjadi peristiwa refleksi seperti multiple dan filter yang digunakan diperoleh dengan metode statistic dari data itu sendiri. Sedangkan dekonvolusi yang menggunakan operator filter yang sudah diketahui atau didesain untuk menampilkan suatu bentuk tertentu digunakan metode dekonvolusi deterministik dan contoh dari metode dekonvolusi ini adalah *spiking deconvolution*. Penggunaan dekonvolusi yang dikenakan dalam data lintasan 1 adalah *Prediktive Deconvolusi*. Parameter yang digunakan dalam dekonvolusi ini adalah *Prediction Operator length* sebesar 60 ns dan *Predictive Length* sebesar 32 ns dan *Prewhitening* 1%. Gambar di bawah ini merupakan hasil dari perlakuan *Predictive Deconvolusi* dalam lintasan 1.



Gambar 4.7. Penampang GPR setelah dikenakan *Prediktive Deconvolusi*

4.2. Pembahasan

4.2.1. Penjalaran Gelombang Elektromagnet.

Prinsip perambatan gelombang pada GPR merupakan prinsip gelombang elektromagnetik. Sifat-sifat elektromagnetik dari suatu material berhubungan dengan komposisi dan kadar airnya, yang merupakan pengontrol utama kecepatan perambatan gelombang radar dan atenuasi gelombang elektromagnetik. Kecepatan elektromagnetik dalam beberapa medium tergantung pada kecepatan cahaya di udara, konstanta dielektrik relatif dan permeabilitas magnetic relatif.

Radiasi elektromagnetik yang direfleksikan oleh suatu perlapisan tergantung pada kontras kontana dielektrik relative perlapisan-perlapisan yang berdekatan. Jika kontras tersebut lebih besar maka jumlah energi gelombang elektromagnetik yang direfleksikan juga akan lebih besar. Bagian energi yang direfleksikan dinyatakan sebagai koefisien refleksi (R) yang ditentukan oleh kontras kecepatan dielektrik relatif dari medium.

Dalam Tesis ini, profil kecepatan tidak dapat dilakukan dikarenakan model akuisisi data yang digunakan adalah *single offset*. Sehingga data- data yang didapatkan tidak dapat diekstrak ke dalam *CDP Gather*. Untuk konversi kedalaman ditekan kan terhadap kecepatan secara umum, kecepatan yang digunakan 0,033 m/ns. Kecepatan ini di korelasikan dengan data pengukuran kedalaman dasar sungai yang telah dilakukan oleh Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil ITS (Tabel 3.1).

4.2.2. Interpretasi

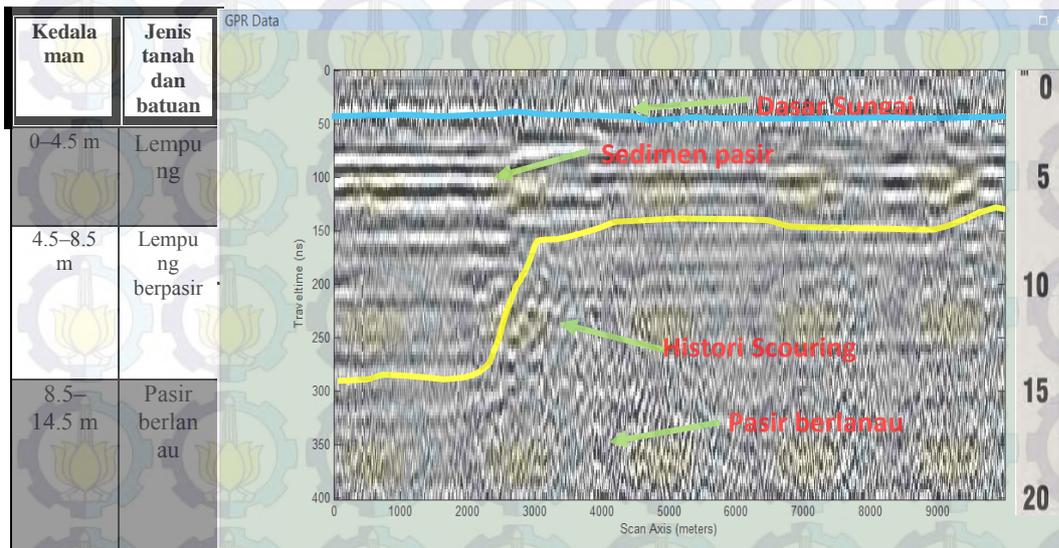
Data yang telah diolah merupakan data mentah (*raw data*) hasil pengukuran georadar. Data yang diperoleh merupakan hasil refleksi gelombang elektromagnetik oleh lapisan batuan yang dipancarkan oleh *transmitter* dan diterima oleh *receiver*. Data yang terekam akan ditampilkan dalam bentuk radagram sebagai fungsi waktu, dalam hal ini fungsi *two-way travel time*. Pengolahan data yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *matGPR*. Dari pengolahan data tersebut dihasilkan sebuah gambar yang dapat menjelaskan keadaan bawah permukaan dari daerah penelitian. Informasi keadaan bawah permukaan tersebut meliputi pola *sedimentasi* dan *scouring* Sungai Bengawan Solo khususnya yang berada di Desa Kanor Kabupaten Bojonegoro. Data hasil pengolahan tersebut akan dibandingkan dengan data bor yang diambil di sekitar penelitian oleh Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Teknik Sipil ITS pada tahun 2005 dan disesuaikan dengan kondisi geologis daerah penelitian (Tabel 3.1).

Selain dengan data bor, hasil dari radagram juga harus dicocokkan dengan tipe konfigurasi refleksi dan juga jenis sedimentasi sebagai mana telah diperlihatkan pada gambar 3.15. Hasil interpretasi dari setiap lintasan adalah sebagai berikut :

Lintasan 1

Dari hasil pengolahan data pada gambar 4.7. dapat kita lihat pada kedalaman 2,5-7,5 meter terlihat reflector yang teratur dengan horizon yang tajam, hal ini dapat kita interpretasikan lapisan ini sebagai pasir, lempung, atau lanau. Pada permukaan dengan kedalaman 0 meter terlihat sebuah reflector yang kontinyu, hal ini juga dapat kita interpretasikan sebagai endapan muda. Akan tetapi model seperti itu juga dapat disebabkan oleh noise. Sedangkan pada kedalaman 7,5-20 meter terlihat reflector yang teratur namun dengan horizon yang kurang tajam sehingga bisa kita interpretasi juga sebagai pasir dan lanau. Terlihat perbedaan ketajaman horizon pada kedua lapisan tersebut, hal tersebut dapat diakibatkan adanya perbedaan lapisan batuan yang menyelingi lapisan pasir. Hal ini diakibatkan adanya pengurangan energy.

Karena kondisi geologis daerah penelitian merupakan sedimentasi sungai, hal ini meskipun permukaan kering buka berarti lapisan dibawahnya kering juga. Jika kondisi tanah lembab artinya mengandung air sehingga dapat mempengaruhi respon radar. Selain itu lapisan pasir yang ada berselingan dengan batuan lain seperti lempung atau lanau sehingga mempengaruhi kedalaman refleksi.



Gambar 4.8. Penampang radagram GPR Kanor 1 yang dikorelasikan dengan data bor

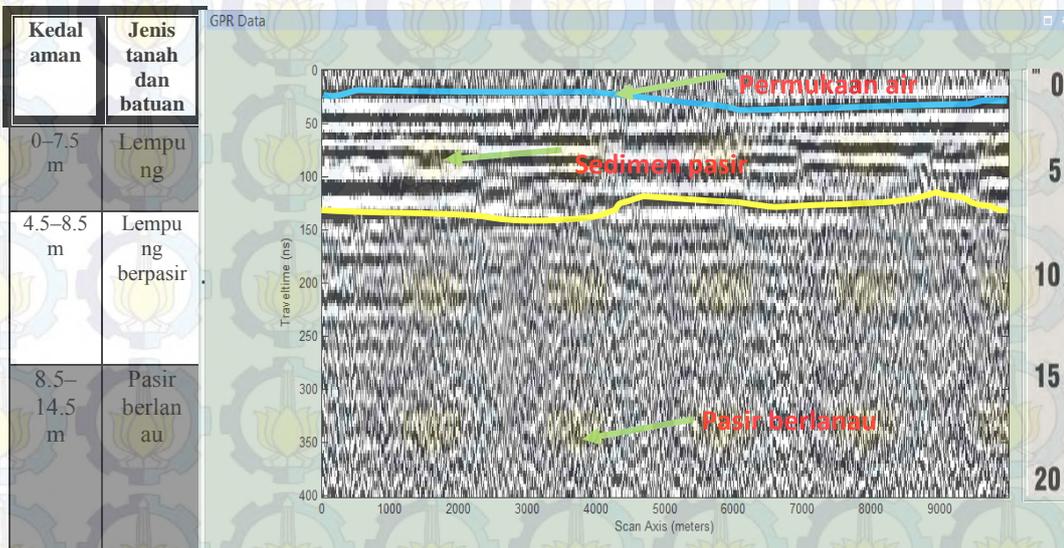
Pada data kanor 1, terdapat struktur lapisan tanah yang memiliki amplitude gelombang elektromagnetik yang sangat tinggi. Pada kedalaman 2,5-7,5 meter, tampak jelas endapan pasir di sepanjang lintasan kanor 1. Endapan juga tampak pada kedalaman 15 m, mulai titik 0-20m. ini sesuai dengan data bor di sekitar lokasi tersebut (tabel 3.1).

Untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat dari hasil pengolahan data pada lintasan 1, maka diperlukan data mengenai keadaan struktur bawa permukaan sekitar lokasi penelitian dengan menggunakan metode secara langsung. Pada penelitian ini hasil pengolahan data akan dibandingkan dengan data bor di sekitar lokasi penelitian, dengan asumsi bahwa data bor ini mewakili kondisi struktur bawah permukaan daerah penelitian. Kedalaman yang di capai oleh titik bor ini melampaui kedalaman penetrasi georadar yaitu $\pm 20m$.

Dari hasil data bor disebutkan bahwa pada daerah penelitian terdiri dari pasir, lempung dan lanau dimana lanau termasuk dalam jenis batuan lempung. Sedangkan pasir termasuk endapan pantai dan endapan darat. Dari data bor

tersebut juga dapat disimpulkan bahwa endapan Sungai Bengawan Solo khususnya pada daerah penelitian didominasi oleh lempung, lanau dan pasir.

Lintasan 2



Gambar 4.9. Penampang radagram GPR Kanor 2 yang dikorelasikan dengan data bor

Dari hasil pengolahan data pada Gambar 4.2 dapat kita lihat dengan jelas bentuk dasar sungai pada lintasan ke dua. Akan tetapi di atas dasar sungai tersebut horizon yang tajam seperti reflector, hal ini terjadi karena adanya noise yang diakibatkan oleh keberadaan air. Dimana air merupakan medium yang sangat konduktif dan memiliki konstanta dielektrik yang sangat tinggi. Sehingga sangat mempengaruhi respon radar. Dari gambar di atas juga dapat kita lihat proses sedimentasi dan erosi dibagian badan sungai tidak merata. Hal ini dapat mengakibatkan penggerusan di salah satu badan sungai dan terjadi pendangkalan pada badan sungai yang lain, sehingga akhirnya dapat mengganggu aliran air pada sungai tersebut.

Pada kedalaman 7,5 sampai 20 meter nampak adanya reflector, namun pada kedalaman tersebut juga terjadi pengurangan energi yang relatif besar sehingga respon radar yang didapat juga kurang begitu jelas. Akan tetapi jika dibandingkan dengan lintasan pertama pada kedalaman ini model reflector yang terjadi relatif sama sehingga dapat diinterpretasikan sebagai pasir atau lanau.

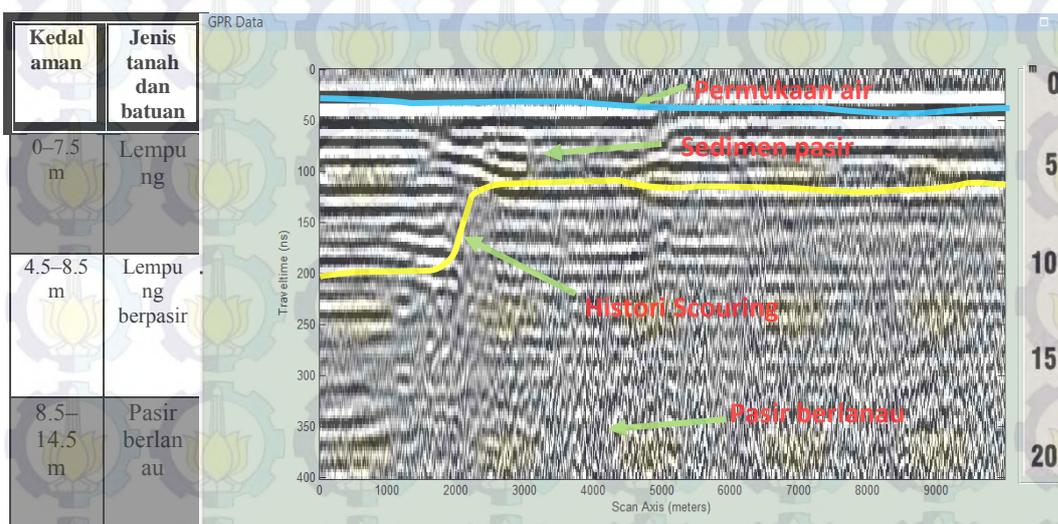
Karena lintasan kedua ini memiliki jarak yang berdekatan dengan lintasan pertama maka untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat digunakan data bor disekitar lokasi penelitian. Dengan asumsi bahwa data bor tersebut

mewakili keadaan struktur bawah permukaan daerah penelitian. Kedalaman yang dicapai oleh titik bor ini mencapai 20 meter. Akan tetapi titik nol dari bor tidak sama dengan titik nol data georadar, karena titik nol dari data georadar adalah muka air sungai sehingga untuk mencocokkan hasil interpretasi titik 6 meter dari bor dianggap sebagai titik nol.

Setelah dilakukan kalibrasi terlihat bahwa hasil dari data bor relative sama dengan hasil interpretasi data georadar yakni pada kedalaman 1 sampai 7,5 meter terdapat pasir berlempung dan pada kedalaman 7,5 sampai 20 meter merupakan pasir berlanau. Sehingga dari hasil data bor dapat kita simpulkan bahwa endapan Sungai Bengawan Solo didominasi oleh lempung, lanau dan pasir.

Lintasan 3

Dari hasil pengolahan data pada gambar 4.9. terlihat model bentuk dasar sungai pada lintasan 3 sedikit berbeda dengan lintasan 2. Bagian sisi pinggir sungai relative lebih dalam dari bagian bagian tepi di seberang. Selain itu juga terlihat adanya potensi menjadi lubang scouring yang terjadi, hal ini menandakan proses erosi dan sedimentasi tidak seimbang. Pada bagian atas sungai juga terlihat endapan muda. tepat diatas dasar sungai juga terlihat horizon tajam yang tampak seperti reflector akan tetapi sebenarnya adalah noise yang diakibatkan air sungai, sehingga dapat mengganggu respon radar.



Gambar 4.10. Penampang radagram GPR Kanor 3 yang dikorelasikan dengan data bor

Pada kedalaman 1-7,5 meter Nampak adanya reflector dengan kontinuitas yang relatif bagus. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai pasir berselingan dengan lempung. Akan tetapi jika dicermati tepat pada bagian tengah badan sungai reflector sedikit tidak teratur. Dimungkinkan pada lintasan ini kandungan lempung relative besar sebagaimana diketahui bahwa lempung yang lembab dapat mengganggu respon radar.

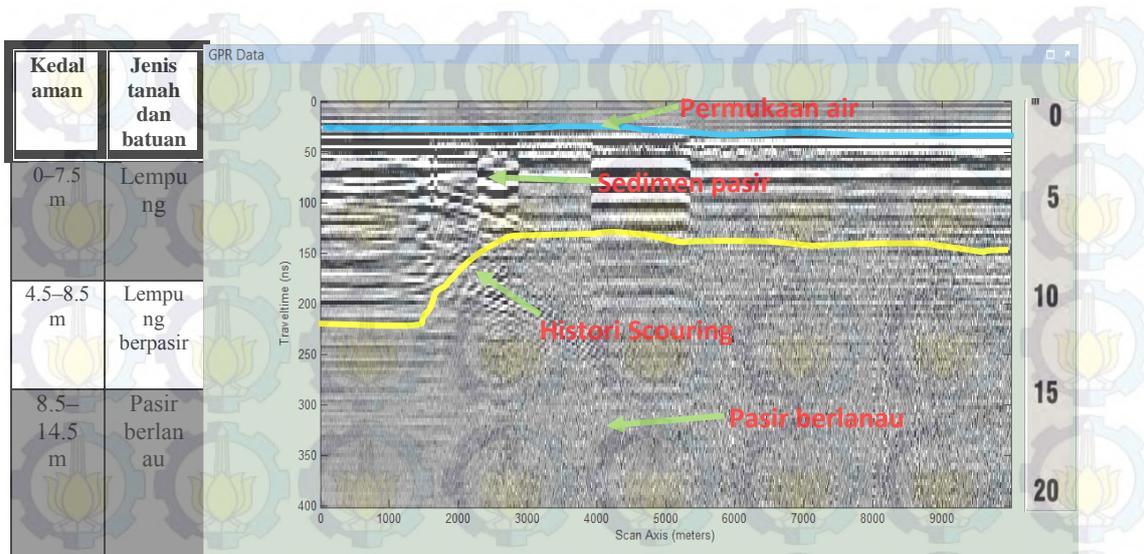
Pada kedalaman 12,5-20 meter tampak reflector yang teratur (*wavy*) namun kurang tajam. Selain itu dibagian tepi reflector juga tidak begitu jelas, berdasarkan model reflektornya dapat diinterpretasikan sebagai pasir berlanau. Jika dibandingkan dengan lintasan 2 citra yang diperoleh relatif lebih bagus.

Pola pada lintasan 3, serupa dengan lintasan 1. Hanya saja lapisan pasir sudah dapat teramati pada kedalaman <2,5 meter hingga 12,5 meter. Ketebalan lapisan pasir yang lebih tebal dari pada lintasan 1, diduga karena posisi lintasan 3 yang berada di bagian selatan atau sisi hilir dari lintasan 1. Yang mana arus yang melewati lintasan ini terendam oleh lapisan di kedalaman yang sama di lintasan 1.

Sebagaimana lintasan 1 dan 2 untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat digunakan data bor sebagai data pembanding. Berdasarkan data bor yang diperoleh pada kedalaman 2,5 sampai 20 meter didominasi oleh pasir, lanau dan lempung. Akan tetapi secara garis besar pada lintasan 3 ini sedimentasinya terdiri atas pasir, lempung dan lanau.

Lintasan 4

Dari hasil pengolahan data pada lintasan 4, model dari dasar sungai terlihat dengan jelas dan berbeda dengan lintasan 2 maupun 3. Dari gambar tersebut juga terdapat bagian dari sungai yang berpotensi menjadi lubang *scouring*. Hal ini dapat terjadi karena terjadi erosi yang terlalu besar tanpa diimbangi pengendapan. Hal ini juga menandakan pada bagian yang berpotensi menjadi *scouring* memiliki arus yang relatif lebih besar dari pada bagian lain. Pada gambar 4.4 juga dapat kita lihat adanya noise yang diakibatkan adanya air dengan adanya model seperti reflector di atas dasar sungai.

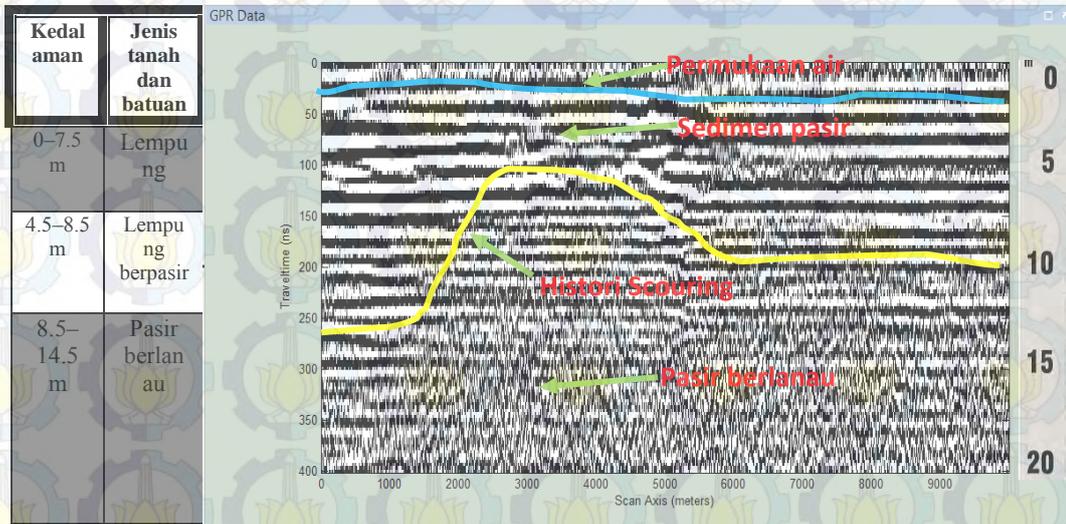


Gambar 4.11. Penampang radagram GPR Kanor 4 yang dikorelasikan dengan data bor

Untuk mendapatkan interpretasi yang lebih akurat pada lintasan 4 ini digunakan data bor sebagai pembanding. Sebagai mana telah dijelaskan pada lintasan sebelumnya pada kedalaman 0 sampai 5 meter didominasi oleh pasir bersilangan dengan lanau dan lempung. Sedangkan pada kedalam 5 sampai 11 meter didominasi oleh pasir yang bersilangan dengan lanau sehingga dapat disimpulkan pada lintasan ini didominasi oleh endapan pasir, lanau dan lempung.

Maka pada lintasan 4 ini, banyak dilakukan penambangan pasir karena lokasi endapan pasir nya tidak terlalu dalam. Dapat terlihat pada posisi bibir sungai hingga 15 meter tidak tampak garis tegak yang merupakan pasir. Hal ini diduga karena pada bagian tersebut aktifitas penambangan dilakukan. Endapan pasir juga tidak lagi tampak pada bagian tengah sungai yang lebih dalam dikarenakan arus sungai yang lebih deras pada bagian tersebut.

Lintasan 5



Gambar 4.12. Penampang radagram GPR Kanor 5 yang dikorelasikan dengan data bor

Dari hasil pengolahan data dapat dilihat bentuk reflector yang teratur dengan model (*Wavy*) hal ini dapat diinterpretasikan sebagai pasir, sebagaimana terlihat ada permukaannya pada lintasan 5 ini selain mengandung pasir juga mengandung lempung dan lanau. Diperkirakan kedalaman lapisan ini mencapai 4,8 meter hal ini terlihat dari model reflektor yang teratur mencapai kedalaman hampir 5 meter. Pada permukaan juga terlihat endapan muda. Selain itu perbedaan kecepatan pengendapan juga terjadi pada lintasan ini pada kedalaman 0,5 meter.

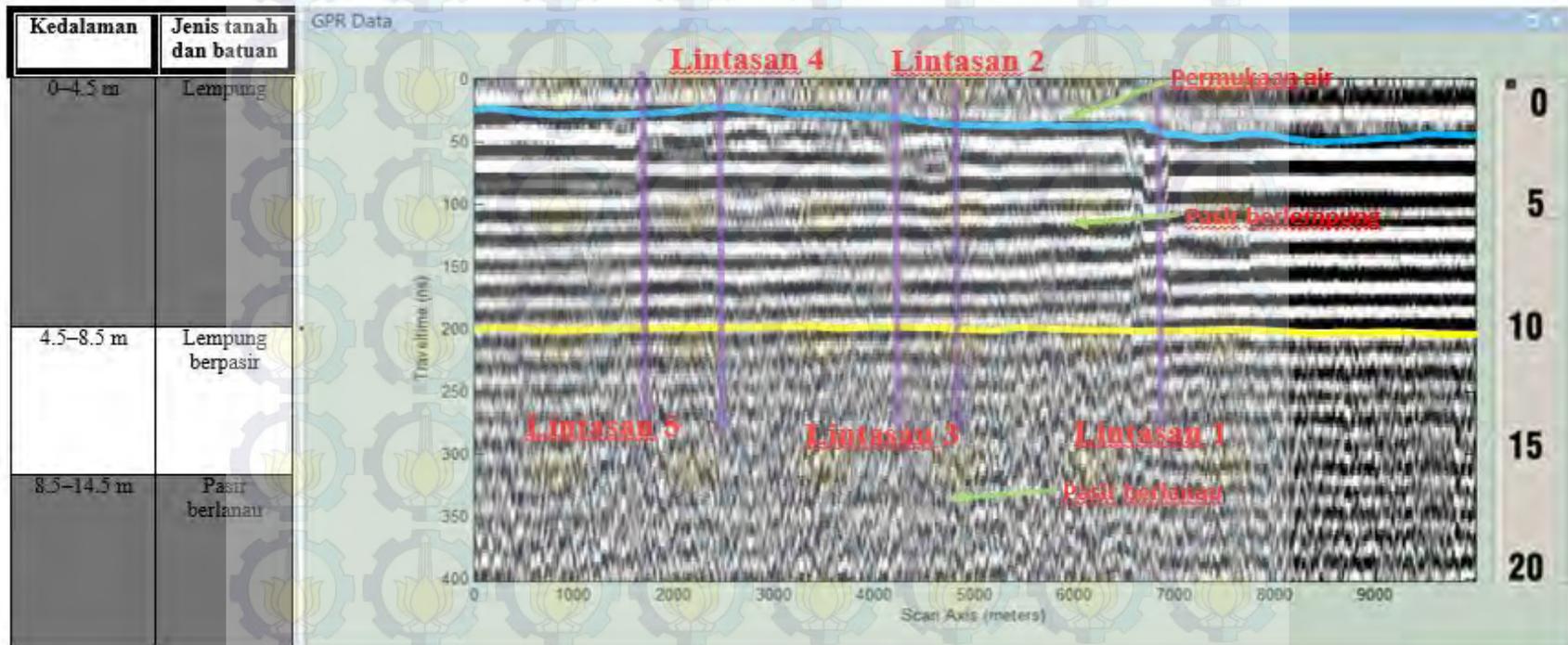
Untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat maka digunakan data bor sebagai pembanding. Dari data bor terlihat bahwa muai kedalaman 0,5 sampai 10 meter didominasi oleh pasir berlanau lempung. Sedangkan pada kedalaman 10 sampai 20 meter didominasi oleh pasir berlanau, sehingga dapat kita simpulkan bahwa endapan Sungai Bengawan Solo khususnya pada lintasan 5 ini didominasi oleh pasir, lanau dan lempung.

Maka pada lintasan 5 ini merupakan lokasi penambangan dan juga tampak bahwa lapisan yang hulunya pasir tidak teramati dari bibir sungai hingga 5 meter ke dalam. Kedalaman lapisan pasir hanya teramati hingga kedalaman 10 meter.

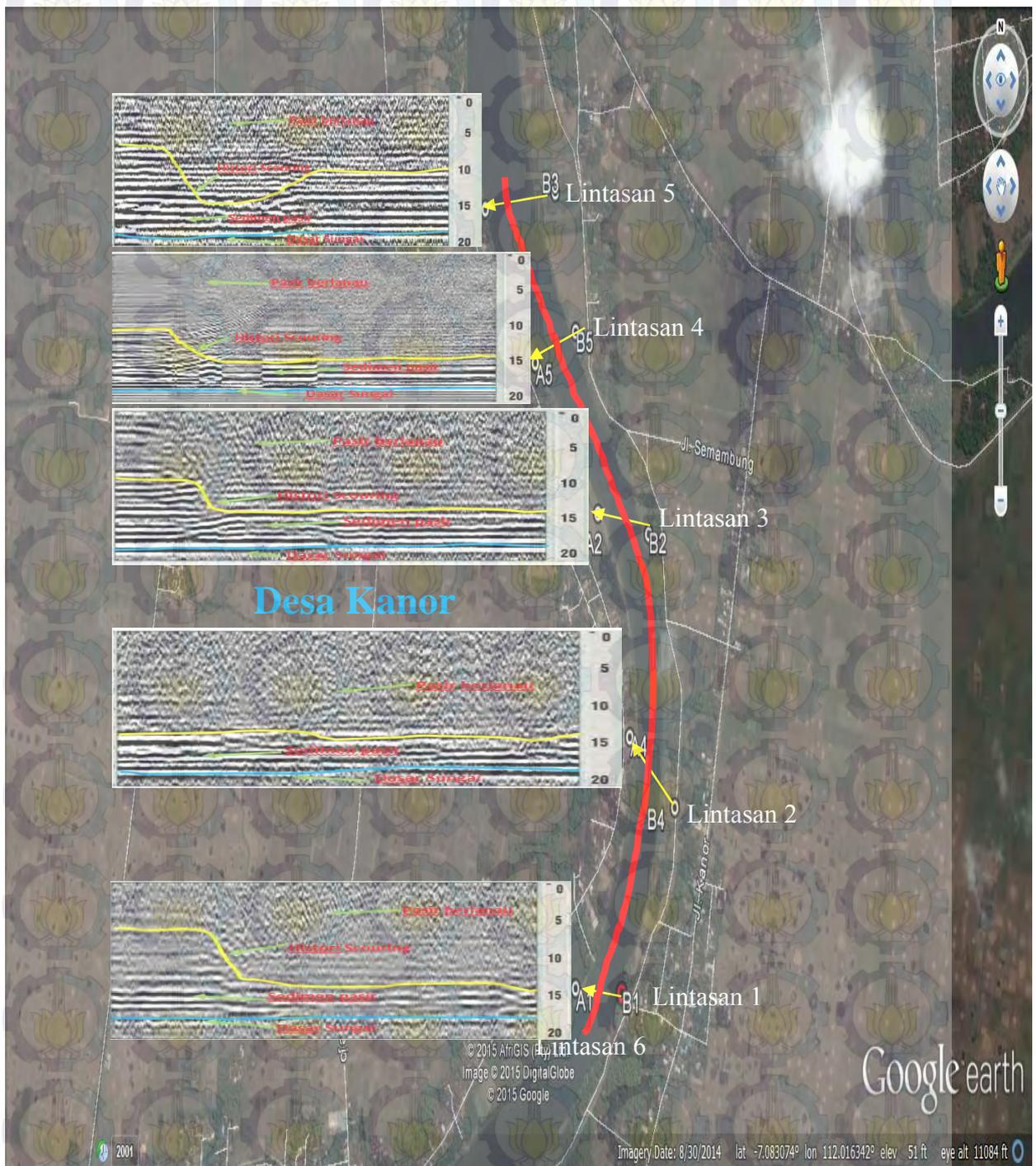
Lintasan 6

Lintasan 6 diambil di sisi barat sungai karena menghindari aktivitas penambang. Tampak pada lintasan ini (dari utara ke selatan) ketebalan lapisan pasir semakin rendah pada akhir lintasan. Ini sesuai dengan penampang pada lintasan 1-5 yang juga hipotesa bahwa pada bagian hulu sungai (Barat) penampang lebih banyak lapisan pasir di dekat permukaan sungai yang tergerus di banding pada bagian hilir (Timur) sungai.

Lintasan 6



Gambar 4.13. Penampang radagram GPR Kanor 6 yang dikorelasikan dengan data bor



Gambar 4.14. Peta Google Maps dari hasil interpretasi

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pengukuran, pengolahan data dan pembahasan dalam Tesis ini dapat disimpulkan beberapa hal berikut :

1. Berdasarkan hasil interpretasi mengenai kondisi struktur bawah permukaan dan erosi pada Sungai Bengawan dan dibandingkan dengan hasil data bor secara umum didapatkan bahwa lintasan 1 pada kedalaman 2,5-7,5 meter terlihat reflector yang teratur dengan horizon yang tajam, diinterpretasikan sebagai pasir. Kemudian lintasan 2 pada kedalaman 1 sampai 7,5 meter terdapat pasir berlempung dan pada kedalaman 7,5 sampai 20 meter merupakan pasir berlanau. Selain itu didapatkan juga fenomena yang menunjukkan pasir berselingan dengan lempung pada kedalaman 1-7,5 meter pada lintasan 3. Adapun untuk pola lapisan hasil radagram GPR masing-masing kanor menunjukan pola lapisan lintasan lapisan yang berbeda, hal ini secara umum disebabkan adanya erosi, perbedaan loss energi oleh radar dan aktivitas manusia yang salah satunya berupa penambangan pasir.
2. Hasil identifikasi meunjukkan bahwa Sungai Bengawan Solo memiliki pola sedimentasi fluvial yang didominasi oleh lempung, pasir dan lanau. Terdapat lintasan yang mempunyai sejarah *scouring* yang menyebabkan proses erosi, pengendapan dan sedimentasi tidak seimbang terlihat pada radagram pada kanor. Secara keseluruhan dari 6 data yang telah diinterpretasikan memiliki sistem perlapisan sedimentasi yang berbeda yang disebabkan perbedaan pola erosi dan sedimentasi.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Perlu adanya monitoring atau pengukuran murni karena untuk melihat perubahan morfologi sebagai akibat penambangan pasir di daerah penelitian.
2. Pengukuran dengan metode GPR harus lebih lagi memperhatikan ketepatan dan efisiensinya karena antenna GPR hanya memiliki durasi pulsa tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

Aji Muhammad Dimas, Sudarsono, Bambang, Sasmito, Bandi (2014), "Identifikasi Zona Rawan Banjir Menggunakan Sistem Informasi Geografis Studi Kasus: Sub DAS Dengkeng". Jurnal Geodesi Undip, Volume 3, Nomor 1, Tahun 2014, (ISSN : 2337-845X).

Annan A.P, (1992), Ground Penetrating Radar Workshop Notes, Sensor and Software Inc., Kanada

Arsyad, S. 2010. *Konservasi Tanah dan Air*. IPB Press. Bogor.

Ariyanti, Desi. (2002), "Interpretasi Bawah Permukaan Daerah Sukolilo di Surabaya dengan Menggunakan Metode Ground Penetrating Radar (GPR)", Tugas Akhir Jurusan Fisika FMIPA ITS, Surabaya.

Astuti, Sri. (2001), "*Penggunaan Ground Penetrating Radar Sebagai Metal Detektor*", Jurnal ILMU DASAR, Vol.2 No. 1, 2001 : 9-16, Universitas Jember.

Bares, M and Haeni, F.P., Ground Water, 29(3), 375-386 (1991).

Churchil, R.R., and Lowe, A.V., The Law of the Sea, Manchester University Press, 1983.

Deniyatno, (2011), "*Identifikasi Zona Bidang Gelincir Tanah Longsor Dengan Metode Georadar*", Vol.7 No 2, Hal 1-8

Doyle J. Webb, (1999), "*Ground Penetrating Radar (GPR): A Tool for Monitoring Bridge Scour*", Departement of Geology and Geophysics, University of Missouri-Rolla.

GeoScan32. 2009. "Georadar 'OKO' Program of Control and Visualization of the Obtained Data". Rusia.

Laboratorium Fisika Bumi, (2000), "Kursus Lanjut Metode Geolistrik, Seismik Refleksi, Magnetik, dan GPR", Kursus Lanjut, Laboratorium Fisika Bumi Jurusan Fisika ITB, Bandung.

MalanGeoscience (1997), "Ramac GPR Software Manual", Swedia.

O'Connell, D.P., The International Law of the Sea, Vol.I, Edited by Shearer, Clarendon, Press, 1984.

Purwanto, Agus (2000), "Teori Medan Elektromagnetik I", Catatan Kuliah Jurusan Fisika, FMIPA ITS, Surabaya.

Purwanto, agus (1994), "Teori Medan EM I", Diktat Kuliah Jurusan Fisika FMIPA, ITS, Surabaya.

Pamela J. W. Gore, (2004), "Depositional Sedimentary Environments", Departement of Geology, Georgia Perimeter College.

Reynolds, John M. (1997), "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics", John Wiley and Sons, 681-749, New York.

Riyanto, Bachtiar, Lasminto Umboro, (2013), "Perencanaan Peningkatan Kapasitas Floodway Pelangwot – Sedayulawas Sungai Bengawan Solo". Jurnal Teknik Pomits vol. 1, no. 1, (2013) 1-7

Sigh, Reineck. (1973), "Depositional Sedimentary Environments", Springer-Verlag, New York.

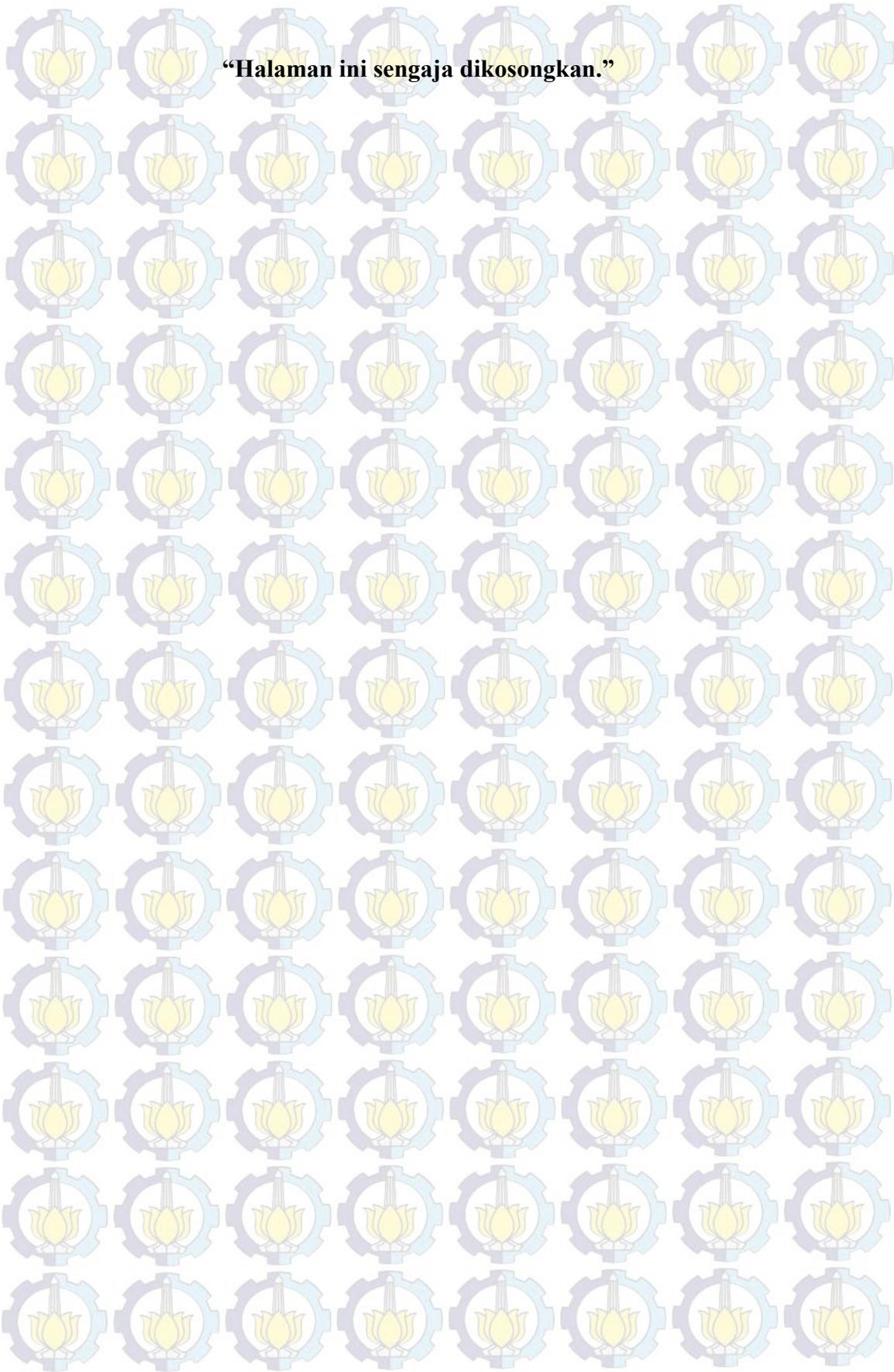
Smemoe Christopher M., (2000), *"Processing and Visualization of Ground Penetrating Radar Data of Assessing Natural Hydrogeologic Conditions"*, Civil and Environmental Engineering 540 – Term Paper, Brigham Young University.

Tzanis, Andreas. 2013. "MATGPR Release 3 Manual and Technical Reference". Department of Geophysics, University of Athens. Athens.

Zaki, Mahmud, (1996), "Medan Elektromagnetik I", Diktat Kuliah Jurusan Fisika FMIPA, ITS, Surabaya.

Setiawati hanis. (2007) *"Identifikasi Sedimentasi Sungai Bengawan Solo sebagai analisa potensi ke longsor tanggul berdasarkan interpretasi data GPR (Studi kasus Desa Kedung Harjo Tuban)"*.

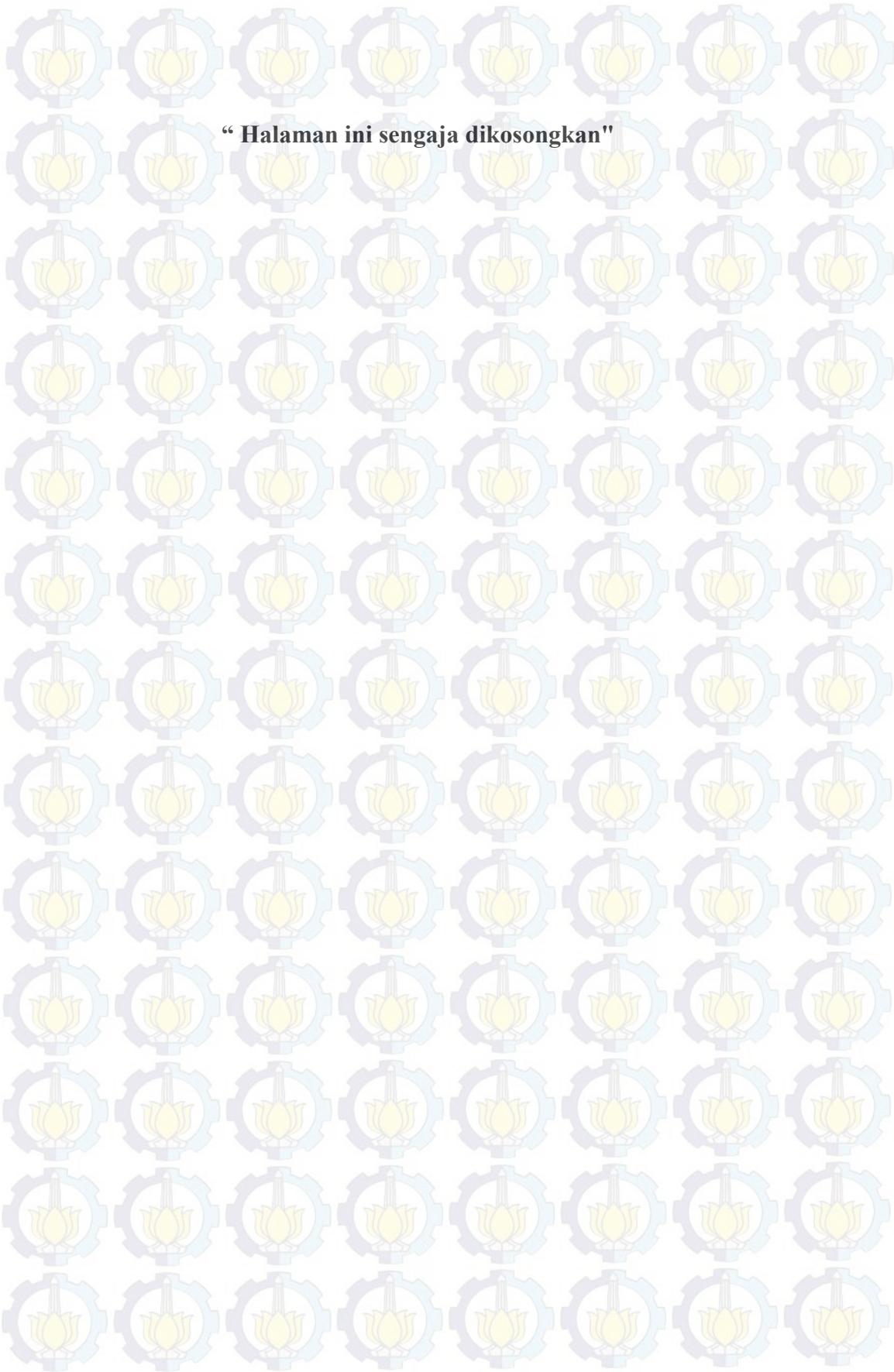
Warnana. D.D dan Ian R., *"Penerapan Metode Geolistrik dalam analisa keandalan tanggul sungai: studi kasus Sungai Bengawan Solo"*, Proc Seminar Fisika dan Aplikasinya. Surabaya. 2007.



“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

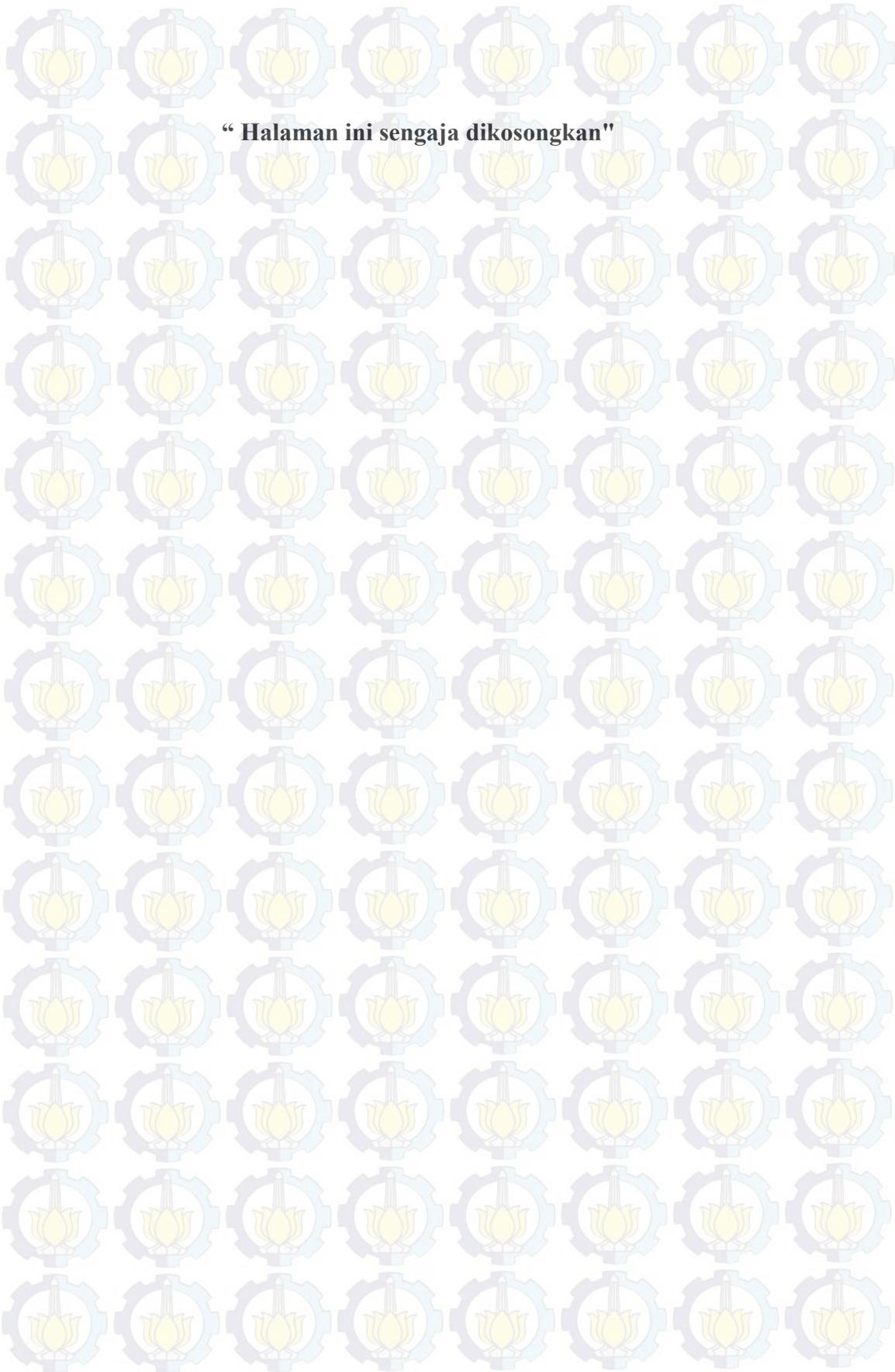
Lampiran : Dokumentasi Penelitian





“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”





“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”

BIOGRAFI PENULIS



Mohammad Hasan Basri, dilahirkan pada tanggal, 14 Agustus 1984 di Sumenep Madura dan merupakan anak pertama dari 3 (tiga) bersaudara. Lahir dari pasangan Moh Syamsuri dan Ruhama. Penulis mulai mengecap jenjang pendidikan pada tahun 1990 tamat tahun 1996. Selanjutnya penulis melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama MTS Nurul Jadid dan lulus di MTSNJ pada tahun 1999. Tahun 1999 melanjutkan Sekolah di Madrasah Aliyah Nurul Jadid (MAUNJ) Paiton Probolinggo tamat tahun 2002. Jurusan Tehnik Mesin Institut Teknologi Nasional Malang adalah kampus yang menjadi pilihan untuk melanjutkan studi dan selanjutnya tamat pada tahun 2008. Pada tahun 2013 diterima sebagai mahasiswa Program Pascasarjana Prodi S2-Fisika ITS dan memilih bidang minat Geofisika. Kegiatan lain penulis saat ini adalah sebagai Tenaga pengajar (Dosen) di Universitas Abdurrahman Saleh Situbondo.