

**IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK *FOULED BALLAST* DAN
TINGGI HIDROLIK BALAS PADA SKALA
LABORATORIUM MENGGUNAKAN GPR 1 GHz**

Tesis

NUR ANISA MARDHOTILLAH

NPM 2225011009



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

Ballast fouling merupakan salah satu faktor utama deformasi geometri jalan rel. Inspeksi terhadap *ballast fouling* dapat menjadi langkah awal untuk pembentukan rencana perawatan jalan rel yang berkelanjutan dan efisien. Inspeksi dini pada balas juga dapat mencegah kerusakan lebih lanjut pada jalan rel. Dalam hal ini, GPR dapat menjadi salah satu metode uji non-destruktif yang bisa diadopsi.

Penelitian ini mempelajari kondisi fisik balas dan respon GPR 1 GHz pada skala laboratorium menggunakan *testing chamber*. Pengujian dilakukan untuk mempelajari kondisi balas pada beberapa kondisi yaitu: (a) bersih (*clean*), (b) terendam air dengan variasi ketinggian muka air, dan (c) kotor (*fouled*) dengan variasi *fouling degree*. Analisis dilakukan secara kualitatif melalui radargram dan kuantitatif melalui analisis spektrum (domain frekuensi). Perubahan *faceline* dari gradien hidrolik kemudian diestimasi menggunakan persamaan Dupuit untuk akuifer nirtekan.

Hasil penelitian menunjukkan ketebalan material *fouling* yang teridentifikasi yaitu 8 cm pada derajat pengotor 10%, 16 cm pada derajat pengotor 20%, dan 23 cm pada derajat pengotor 30%. Amplitudo yang dihasilkan oleh balas bersih berkisar antara 14 – 16, balas terendam air antara 6 – 8,5, dan balas kotor antara 3,5 – 6,5. Hal ini juga mengindikasikan bahwa material pengotor batubara halus memiliki kemampuan atenuasi (pelemahan) sinyal yang lebih kuat dibandingkan air. Sementara itu, tidak ditemukan perbedaan berarti dari *faceline* gradien hidrolik pada kondisi balas berbeda.

Kata kunci: *Ballast fouling*, *ground penetration radar (GPR)*, radargram, domain frekuensi, gradien hidrolik

ABSTRACT

Ballast fouling is one of the main inducing factors of railway track deformation. Periodical railway track inspection is very much needed in order to prevent advanced railway track degradation as well as formulating the most effective and effective maintenance plan. In this case, a non-destructive inspection method such as GPR may become a forefront option to be adopted.

This research observed the correlation between ballast different physical condition and its' GPR response on a lab scale experiment using a specifically designed testing chamber. Experiments were conducted in three main configurations: (a) clean ballast, (b) submerged ballast with different water head, (c) fouled with different fouling degree. Analysis were carried out qualitatively through radargram reading and quantitatively with spectral analysis (frequency domain). Hydraulic gradient of each ballast condition was estimated using Dupuit equation for unconfined aquifer.

It was found that in 10%, 20%, and 30% of existing fouling material, 8 cm, 16 cm, and 23 cm of fouling depth were identified respectively. Meanwhile, the amplitude formed are within the range of 14 – 16 for clean ballast, 6 – 8,5 for submerged ballast, and 3,5 – 6,5 for coal-fouled ballast. This indicates that coal has stronger signal attenuating ability in comparison with water. As for hydraulic gradient, no significant faceline changes were observed even in different ballast condition.

Keywords: Ballast fouling, ground penetration radar (GPR), radargram, frequency domain, hydraulic gradient

**IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK *FOULED BALLAST* DAN TINGGI
HIDROLIK BALAS PADA SKALA LABORATORIUM
MENGUNAKAN GPR 1 GHz**

Oleh:

Nur Anisa Mardhotillah

2225011009

Tesis

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Sipil

Pada

**Program Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**Judul Tesis : IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK *FOULED*
BALLAST DAN TINGGI HIDROLIK BALAS
PADA SKALA LABORATORIUM
MENGUNAKAN GPR 1 GHz**

Nama Mahasiswa : Nur Anisa Mardhotillah

Nomor Pokok Mahasiswa : 2225011009

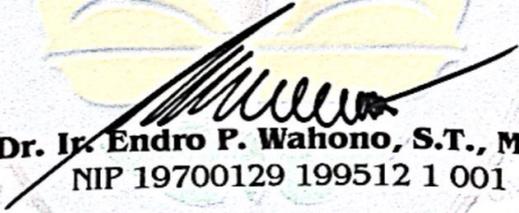
Program Studi : Magister Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

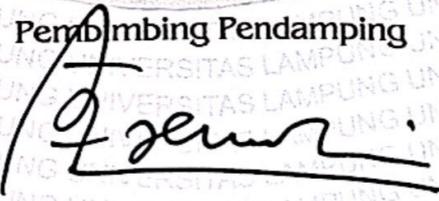
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

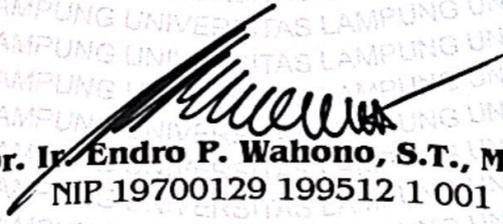
Pembimbing Utama


Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.
NIP 19700129 199512 1 001

Pembimbing Pendamping


Dr. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP.
NIP 19720928 199903 1 001

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil


Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.
NIP 19700129 199512 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Pembimbing Utama

: Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc.

Pembimbing Pendamping

: Dr. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP.

Penguji Utama

Bukan Pembimbing

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

Penguji Pendamping

**: Prof. Dr. Dyah Indriana
Kusumastuti, S.T., M.Sc.**

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. J
NIP.19750928 200112 1 002

3. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP.19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 5 Januari 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Anisa Mardhotillah

NPM : 2225011009

Prodi/Jurusan : S2/Teknik Sipil

Fakultas : Teknik Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Tesis yang berjudul **Identifikasi Karakteristik Fouled Ballast dan Tinggi Hidrolik Balas Pada Skala Laboratorium Menggunakan GPR 1 GHz** adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai dengan etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat. Sepanjang pengetahuan penulis, tidak terdapat pula karya atau pendapat yang dituliskan atau diterbitkan oleh orang lain kecuali secara tertulis di dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Hak intelektual atas karya ilmiah ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

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

Bandar Lampung, 13 Januari 2024



Nur Anisa Mardhotillah

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Bandar Lampung pada tanggal 26 Juli 1995 sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Ir. Nur Arifaini, M.S. dan Ibu Ida Savitri. Penulis memulai jenjang pendidikan tingkat dasar di SD Al-Azhar 1 Way Halim, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP Negeri 4 Bandar Lampung dan dilanjutkan menempuh pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2012.

Pada tahun 2012 penulis terdaftar sebagai mahasiswa S1 di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) Undangan. Pada tahun 2022 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Magister Teknik Sipil Universitas Lampung.

Pada tahun 2022 penulis melakukan penelitian untuk tesis di bawah bimbingan Bapak Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc selaku Pembimbing Utama dan Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP. selaku Pembimbing Pendamping dengan bantuan dana penelitian dari DIPA FT UNILA. Produk akhir dari penelitian tersebut berupa Tesis yang berjudul **Identifikasi Karakteristik *Fouled Ballast* dan Tinggi Hidrolik Balas Pada Skala Laboratorium Menggunakan GPR 1 GHz.**

“By Allah, if Allah guides aright even one person through you, that is better for you than to possess the red camel”

- *Prophet Muhammad SAW (Sahih Muslim 2406)*

To the greatest gifts of my life...

My mom, Ida Savitri

My father, Nur Arifaini

My little brother, Muhammad Nur Ramadhan

*My little sister, Nur Istiqomah
Salsabila*

ACKNOWLEDGEMENTS

All praise to Allah SWT for all the blessings that have been poured upon me in every step of the way. I am able to finish this Master's Thesis as a part of graduation requirements to earn the degree of Master of Engineering at the Graduate School of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Lampung.

I would like to express my gratitude to Dr. Ir. Endro P. Wahono, S.T., M.Sc. as my supervisor for his tremendous assistance, guidance, and support throughout my masters' study. I am also thankful for Dr. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP. as my co-supervisor for his great supervision and support. I would also like to thank Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D and Prof. Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, S.T., M.Sc. as my Master's Thesis examiners for their thoughtful advice and kind assistance.

Thank you to Faculty of Engineering University of Lampung (DIPA FT) and PT. Bukit Asam Tbk who made this research experiment possible. Pak Suhedi (Director of Operations and Production of PTBA), Pak Hengki (General Manager of PTBA Pelabuhan Tarahan), Pak Darvin, Pak Dihan, and Pak Dian.

I would also like to give my highest appreciation to Prof. Ir. Sudjarwadi, M.Eng., Ph.D., Ali Awaludin, S.T., M.Eng, Ph.D. (Vice Dean of Faculty of Engineering UGM), Prof. Tamon Ueda (Emeritus Hokkaido University), Dr. Ir. Istiarto, M.Eng. (University of Gadjah Mada) and Prof. John Hendri, M.S. (University of Lampung) for believing in my ability despite my own distrust towards myself. Hideaki Takahashi-sensei (Yokohama City University Hospital) for your utmost and unconditional care during my long-period of treatment back in Japan.

It would also be impossible for me to finish this Master's Thesis without the endless support and prayers from my mom (Ida Savitri), my father (Ir. Nur Arifaini, M.Sc.),

and my siblings (Muhammad Nur Ramadhon and Nur Istiqomah Salsabila). My Hokudai-brothers for always reminding me of my own potential, Prof. Wang Yi (Central South University), Assoc. Prof. Wang Zhao (University of Tokyo). Dr. Pranav for listening to all of my quirks and stories, most importantly thank you for having my back when some people tried to turn their back on me. My Yokohama labmates Maliki and Dr. Kim Min Koan for your endless support. *Skandal Jepang* team for rooting on me and for providing me hard-to-get journals, Aya-chan (Indonesian Defense University), Andi (University of Gadjah Mada), Vempi (University of Gadjah Mada), Ika-chan (University of Gadjah Mada), Fanny (EPFL Lausanne). Faculty members of University of Lampung: Om Amril, Pakde Dwi, Bu Ratna, Bu Nurul, Bude Niken, Pak Ageng. My “other family” members: Bu Ana, Mbak Niki, Inayah, Kak Irene, Mbak Defy as my forefront supporters since day one. *“From Yokohama with Love”* sisters, Fatma and Chal. My dearest friends Jessica, Acun, Okta, Fia, Agatha, Jisung, Cipus.

Lastly, I would like to express my gratitude for my research partner Restu for his help during GPR experiment. My juniors from undergraduate program for their tremendous help in the past 6 months, Majid, Yudhi, Zandra, Faris, Dapjik, Rama, Meida, Dika, Ira, Jhon, Fathan, Erza, Tiara, Mensen, Meidi, Rohim, Dendi.

To all staff of Graduate School of Civil Engineering and my friends in Class of 2022, for the helpful attitude during my study period.

I hope that this Master’s Thesis can bring utmost advantages to readers, especially to the students of Department of Civil Engineering University of Lampung.

Bandar Lampung, January 2024

Nur Anisa Mardhotillah

DAFTAR ISI

1	PENDAHULUAN	3
1.1	Latar Belakang	3
1.2	Rumusan Masalah	5
1.3	Tujuan Penelitian	6
1.4	Batasan Masalah.....	7
1.5	Lokasi Penelitian	8
1.6	<i>Research Novelty</i>	8
2	TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1	Komponen <i>Ballasted Track</i>.....	10
2.1.1	Balas	11
2.1.2	Sub-balas.....	12
2.1.3	Tanah Dasar (<i>Subgrade</i>)	13
2.1.4	Rel	13
2.1.5	Penambat Rel.....	14
2.1.6	Bantalan	14
2.2	Faktor Yang Mempengaruhi Kinerja Balas	15
2.2.1	Karakteristik Balas.....	16
2.2.2	Karakteristik Agregat Pada Kondisi <i>Bulk</i>	17
2.2.3	Karakteristik Pembebanan.....	17
2.2.4	Degradasi Partikel.....	19
2.3	Permasalahan Sub-struktur Jalan rel.....	21
2.3.1	<i>Ballast Fouling</i>	21
2.3.2	Pengaruh <i>Fouling</i> Pada Kinerja Balas.....	25
2.4	Air Pada Struktur Jalan Rel	29
2.4.1	Aspek Drainase Balas	30
2.4.2	Klasifikasi Drainase Pada <i>Fouled Ballast</i>	35
2.5	Aplikasi GPR (<i>Ground Penetration Radar</i>) Pada Asesmen Jalan Rel	36
2.5.1	Prinsip Alat GPR (<i>Ground Penetration Radar</i>).....	37
2.5.2	Proses Pengolahan Data	38
3	METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1	Persiapan Balas.....	40
3.2	Pembuatan <i>Testing Chamber</i>.....	42
3.3	Kalibrasi GPR dan <i>Testing Chamber</i>	42
3.4	Konfigurasi Akuisisi Data	42
3.5	Akuisisi Data.....	44
3.6	Pengolahan dan Analisis Data.....	45
3.6.1	Balas Bersih	45
3.6.2	Balas Bersih Dengan Variasi Ketinggian Air dan Balas Kotor.....	46

4	ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1	Hasil Uji Laboratorium Terhadap Balas.....	48
4.1.1	Uji <i>Specific Gravity</i>	48
4.1.2	Uji Distribusi Ukuran Agregat.....	49
4.1.3	Uji Keausan Balas.....	51
4.2	Hasil Uji Laboratorium Terhadap Batubara	52
4.2.1	Uji <i>Specific Gravity</i>	52
4.2.2	Uji Distribusi Ukuran Batubara	53
4.3	Pembuatan <i>Testing Chamber</i>.....	54
4.4	Analisis Data.....	57
4.4.1	Balas Bersih (<i>Non-Layering</i>).....	57
4.4.2	Balas Bersih (<i>Layering</i>)	59
4.4.3	Komparasi Balas Bersih: <i>Layering vs Non-Layering</i>	61
4.4.4	Balas Bersih Dengan Variasi Ketinggian Air	62
4.4.5	Komparasi Balas Bersih Dengan Variasi Ketinggian Air.....	67
4.4.6	Balas Kotor (<i>Fouled Ballast</i>).....	71
4.4.7	Komparasi Radargram Balas bersih, Balas dan Air, dan Balas Kotor.....	77
4.4.8	Gradien Hidrolik.....	79
4.4.9	Analisis Domain Frekuensi	82
5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	105
5.1	Kesimpulan	105
5.2	Saran.....	106
	REFERENSI.....	107
	LAMPIRAN.....	113

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan moda transportasi berbasis rel yang menawarkan banyak keunggulan dan telah banyak digunakan di banyak negara. Kereta Api di berbagai belahan dunia memainkan peran penting sebagai moda angkutan orang maupun barang, sehingga patut dikatakan bahwa kereta api memiliki peran krusial terhadap roda perekonomian sebuah negara.

Pemanfaatan moda transportasi Kereta Api di Indonesia sebagai sarana transportasi semakin meningkat seiring dengan dinamika masyarakat yang kian maju dan kebutuhan transportasi antar wilayah yang efisien semakin diperlukan. Pada tahun 2020 – 2021 Kementerian Perhubungan melakukan pencatatan terhadap panjang seluruh rel kereta api di Indonesia. Pada kurun waktu tersebut panjang rel Kereta Api terdata yaitu sepanjang 632.000 km (Kemenhub, 2022).

Pulau Jawa dan Pulau Sumatera memiliki jaringan kereta api aktif seperti terlihat pada Gambar 1.1 dan Gambar 1.2. Dari kedua gambar tersebut dapat terlihat bahwa jaringan kereta api di Jawa memiliki konektivitas yang lebih baik dibanding Pulau Sumatera dengan distribusi perjalanan berupa 92% perjalanan penumpang dan 53,6% perjalanan barang. Sementara itu, Pulau Sumatera memiliki sebaran distribusi perjalanan berupa 8% angkutan penumpang dan 40,56% angkutan barang. Akan tetapi perjalanan barang di Pulau Sumatera, khususnya lintas Tarahan – Tanjung Enim, memiliki karakteristik khusus yaitu angkutan batu bara.

Pemilihan bahan granular sebagai balas pada *track* kereta api konvensional memiliki beberapa alasan antara lain ekonomi (ketersediaan dan kelimpahan), kemampuan mendrainase, dan kapasitas daya dukung yang tinggi (Tennakoon, 2012). Kemampuan mendrainase cepat dari ballast adalah aspek teknis yang tidak terlalu mendapat perhatian di Indonesia, padahal hal ini cukup menentukan kualitas umur layan dari *track* pada jangka panjang (Selig dan Waters, 1994).



Gambar 1.1 Jaringan jalur kereta api di Pulau Jawa (sumber: RIPNAS, 2018)



Gambar 1.2 Jaringan jalur kereta api di Pulau Sumatera (sumber: RIPNAS, 2018)

Selama masa operasi berlangsung ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi umur dan kualitas ballast antara lain *ballast fouling*, yaitu kondisi dimana balas mengalami penurunan performa dengan ditandai terisinya rongga-rongga antar agregat oleh partikel-partikel kecil. Partikel-partikel kecil berasal dari beberapa sumber antara lain: (a) erosi internal dari bagian tepi dan ujung agregat, (b) infiltrasi partikel-partikel dari permukaan, dan (c) partikel tanah *subgrade* yang “naik” akibat beban siklik (*cyclic loading*) dan tanah yang jenuh (*saturated soil*) (Indraratna dkk., 2010). Pada kondisi jangka panjang, *ballast fouling* akan mempercepat efek kerusakan dari *mud pumping* dan mengurangi daya dukung ballast terhadap beban sehingga mengganggu stabilitas badan jalan rel.

Perkembangan infrastruktur jalan rel di Indonesia diprediksi akan meningkat pesat seiring dengan perkembangan ekonomi dan demografi Indonesia yang menuntut terciptanya moda transportasi yang efisien dan ekonomis. Untuk mendukung rencana ini dalam jangka waktu yang panjang, *maintenance* menjadi bagian penting

dalam aspek prasarana perketeraapian. Inspeksi terhadap *ballast fouling* dapat menjadi langkah awal untuk pembentukan rencana perawatan jalan rel yang berkelanjutan dan efisien. Inspeksi dini pada balas juga dapat mencegah kerusakan lebih lanjut pada jalan rel karena lebih sesuai dengan kondisi riil di lapangan dibandingkan dengan metode konvensional melalui perhitungan *passing tonage*. Hal ini dikarenakan kerusakan prematur dapat saja muncul sebelum *passing tonage* terlewati. GPR (*Ground Penetration Radar*) telah digunakan pada kegiatan inspeksi balas di berbagai negara selama kurun waktu dua dekade terakhir, khususnya inspeksi *ballast fouling level* (Guo et al., 2022).

Penelitian ini mempelajari kondisi fisik balas dan respon GPR balas pada dalam skala laboratorium. Pengujian dilakukan untuk mempelajari kondisi balas pada beberapa kondisi yaitu: (a) bersih (*clean*), (b) jenuh air dengan variasi ketinggian muka air, dan (c) kotor (*fouled*) dengan variasi *fouling degree*.

1.2 Rumusan Masalah

Ballast fouling merupakan salah satu faktor utama deformasi geometri *track* (Indraratna dkk., 2011). Partikel halus yang mengisi pori-pori antar material granuler akan melubrikasi ballast dan mengurangi nilai sudut geser dalam dan kemampuan ballast sebagai media *free drainage*. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan air pori berlebih yang secara progresif dengan beban akan memicu kenaikan partikel halus dari subgrade ke dalam lapisan ballast. Kondisi ini bisa menjadi lebih parah apabila sistem drainase permukaan tidak terinstalasi dengan baik. Kombinasi dari faktor-faktor ini, apabila terjadi terus menerus, maka *mud pumping* adalah kondisi yang tidak bisa dielakkan seperti yang terlihat pada Gambar 1.3. Pada jangka panjang, *mud pumping* akan mengurangi kemampuan daya dukung badan jalan rel terhadap beban.

Berkurangnya kemampuan daya dukung badan jalan rel tentu akan memberikan efek lebih lanjut terhadap kondisi geometri *track* yaitu terjadinya deformasi atau *settlement* seperti yang terlihat pada Gambar 1.4. Kondisi ini tentu akan sangat mengganggu siklus pemeliharaan *track* baik dari segi waktu maupun ekonomi.

Oleh karena itu identifikasi awal dari *ballast fouling* menjadi sangat penting untuk dilakukan. GPR menjadi salah satu metode non-destruktif yang telah diadaptasi pada di berbagai negara pada *track monitoring stage*.

Isu mengenai *ballast fouling* saat ini menjadi sangat penting akan tetapi belum didukung oleh penelitian terutama skala nasional dengan memperhatikan kondisi teknis spesifik di Indonesia. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan korelasi data fisik dan respon GPR bagi instansi terkait untuk dapat diadaptasi pada kondisi riil di lapangan sehingga dapat disusun *maintenance plan* yang tepat dan efisien.



Gambar 1.3 Sistem drainase yang buruk pada *track*



Gambar 1.4 *Mud pumping* dan deformasi pada *track*

1.3 Tujuan Penelitian

Identifikasi kondisi balas menjadi titik awal identifikasi kerusakan struktur jalan rel yang lebih kompleks dan mayor salah satunya deformasi *track*. Identifikasi kondisi

balas juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi umur layan. Tujuan dari penelitian ini antara lain yaitu:

1. Identifikasi ketebalan *fouling* dari balas dengan menggunakan metode GPR (*ground penetration radar*) berkapasitas 1 GHz.
2. Identifikasi ketinggian hidrolis pada lapisan balas.
3. Mengevaluasi *signature response* dari GPR terhadap balas pada beberapa konfigurasi kondisi pengujian: (a) bersih (*clean*), (b) terendam air dengan variasi ketinggian muka air, dan (c) kotor (*fouled*) dengan variasi derajat kotor (*fouling degree*) berbeda.
4. Menyediakan data korelasi fisik dan respon GPR terhadap balas pada kondisi berbeda secara kualitatif melalui radargram dan kuantitatif melalui analisis Transformasi Fourier untuk mengidentifikasi sinyal dominan karakter balas pada kondisi berbeda.
5. Melakukan estimasi gradien hidrolis balas menggunakan persamaan Dupuit.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini antara lain:

1. Tidak dilakukan uji pembebanan monotonik maupun siklik.
2. Alat GPR (*ground penetration radar*) yang digunakan adalah dengan frekuensi 1 GHz dengan kemampuan penetrasi hingga kurang lebih 2 m dari permukaan.
3. Tidak dilakukan pemadatan dengan getaran, sebagaimana yang diaplikasikan di lapangan, pada saat balas dihamparkan di dalam *testing chamber*.
4. Partikel batubara yang digunakan merupakan pecahan dari batubara bongkahan dengan tipe *low calorie*.
5. Batubara didapatkan dari PT. Bukit Asam Tbk (Unit Pelabuhan Tarahan) sebagai pengguna utama jasa kereta api babaranjang lintas Tarahan – Tanjung Enim.
6. Tidak dilakukan justifikasi melalui *sampling* di lapangan karena keterbatasan izin.

7. Bagian dasar *testing chamber* didesain tidak memiliki kemiringan sebagaimana kondisi balas sesungguhnya di lapangan.

1.5 Lokasi Penelitian

Penelitian ini terinspirasi dari jalur kereta api rute lintas Tarahan - Tanjungenim berada di daerah administrasi Kabupaten Way Kanan Provinsi Lampung dan Kabupaten Oku Timur di Provinsi Sumatera Selatan. Jalur ini merupakan jalur aktif untuk pelayanan perjalanan kereta penumpang dan kereta babaranjang dengan frekuensi perjalanan dominan kereta babaranjang. PT. KAI Divre IV Tanjung Karang menyebutkan bahwa telah terbentuk daerah rawan (Gambar 1.5) di beberapa titik yang menyebabkan kereta tidak dapat melaju pada kecepatan desain.

Penelitian skala laboratorium dilakukan di Laboratorium Hidrolika dan Laboratorium Inti Jalan Raya Fakultas Teknik Universitas Lampung.



(a)

(b)

Gambar 1.5 (a) Drainase yang tidak berfungsi dengan baik, (b) *Mud pumping*

1.6 *Research Novelty*

Penelitian mengenai *ballast fouling* di Indonesia masih sangat minim dibandingkan beberapa negara lain seperti USA, UK, Swedia, Belanda, dan Jepang. Hingga tulisan ini dibuat, sangat minim literasi yang berhubungan dengan *ballast fouling* pada jalan rel di Indonesia. Terutama literasi terkait *track monitoring* menggunakan metode GPR.

Perkembangan infrastruktur jalan rel di Indonesia diprediksi akan meningkat pesat seiring dengan perkembangan ekonomi dan demografi Indonesia yang menuntut terciptanya moda transportasi yang efisien dan ekonomis. Untuk mendukung rencana ini dalam jangka waktu yang panjang, *maintenance* menjadi bagian penting dalam aspek prasarana perketeraapian. Inspeksi terhadap *ballast fouling* dapat menjadi langkah awal untuk pembentukan rencana perawatan jalan rel yang berkelanjutan dan efisien. Inspeksi awal kondisi balas juga dapat mencegah kerusakan lebih lanjut pada jalan rel karena lebih sesuai dengan kondisi riil di lapangan dibandingkan dengan metode konvensional melalui perhitungan *passing tonage*. Hal ini dikarenakan kerusakan prematur dapat saja muncul sebelum *passing tonage* terlewati.

Identifikasi kondisi balas secara non-destruktif menggunakan GPR dapat membantu instansi terkait untuk mengantisipasi kerusakan struktur jalan rel yang lebih kompleks serta membantu menyusun rencana *maintenance* yang lebih tepat dan efisien.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Selig dan Waters (1994) menyebutkan bahwa sistem perkeretaapian merupakan fasilitas transportasi nasional dan memainkan peran penting dalam ekonomi sehat sebuah negara. Dengan memperhatikan kepentingan ini, sistem jaringan kereta api adalah sebuah investasi jangka panjang yang dipengaruhi oleh performa layanan. Untuk memenuhi performa yang efektif dan efisien secara ekonomi, maka kualitas performa teknis harus dipenuhi terlebih dahulu.

Balas merupakan salah satu komponen *track* terpenting (Tennakoon, 2012). Balas adalah material granular yang bertugas untuk mendistribusikan tegangan yang terjadi akibat beban kereta api yang lewat ke tanah dasar. Pemahaman mengenai aspek drainase dari *fouled ballast* sama pentingnya dengan aspek drainase konvensional yang secara langsung berpengaruh pada umur layan dari sebuah *track*.

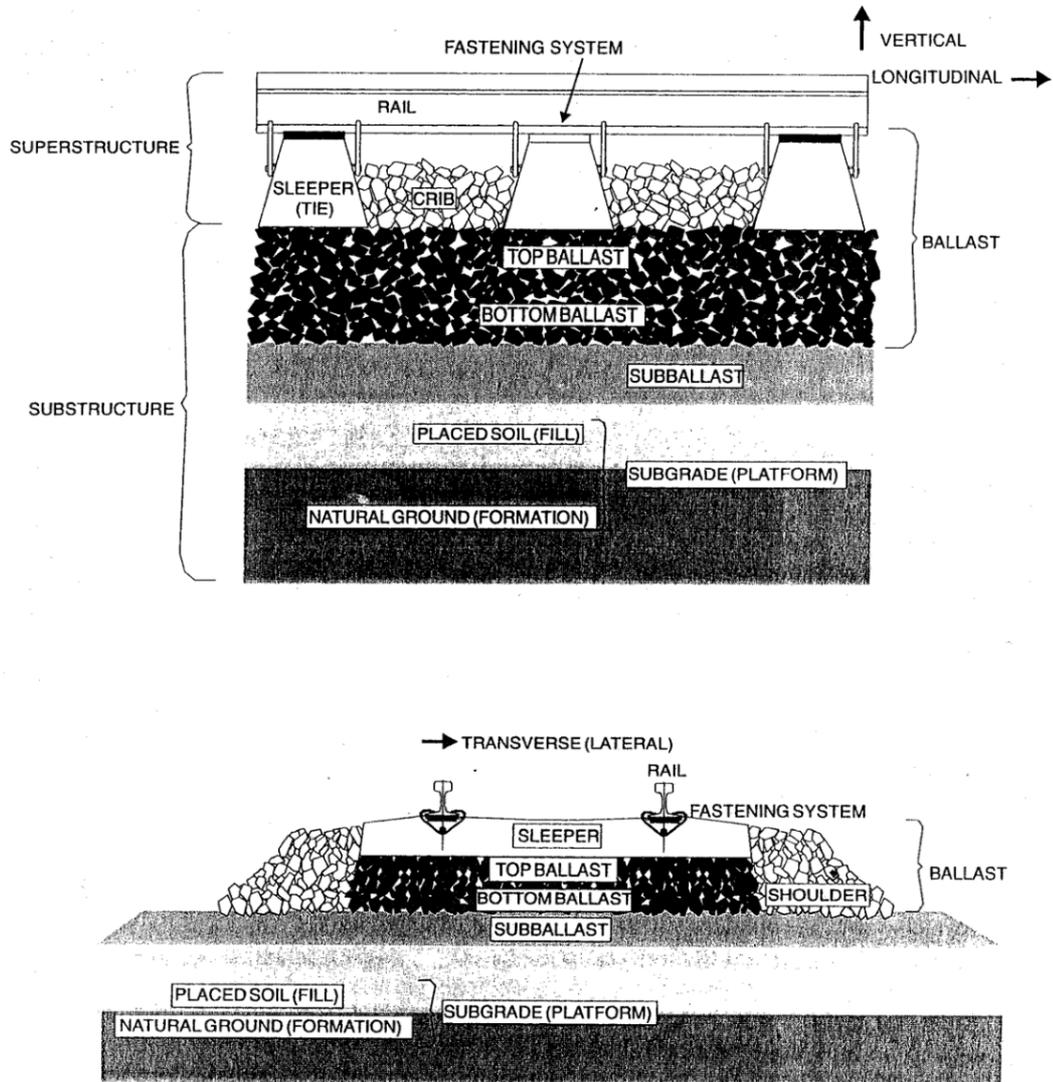
Bab ini akan membahas dengan lebih detail melalui tinjauan pustaka terhadap beberapa penelitian atau studi yang telah dilakukan sebelumnya mengenai aspek drainase dari balas, karakteristik *fouled ballast* dan *clean ballast*, dan implikasinya terhadap *track* eksisting.

2.1 Komponen *Ballasted Track*

Track kereta api secara garis besar terdiri dari bagian superstruktur dan substruktur (Kutz, 2004; Selig dan Water, 1994). Komponen superstruktur terdiri dari rel, bantalan, dan penambat rel. Sementara itu, komponen substruktur terdiri dari balas, sub-balas, dan *subgrade*. Superstruktur dan substruktur dibatasi pada *interface* bantalan-balas seperti yang terlihat pada Gambar 2.1.

Rel adalah batang baja yang mengalami kontak langsung dengan roda kereta api. Bantalan adalah elemen berbahan beton yang memiliki fungsi untuk mendistribusikan beban roda yang ditransfer melalui rel dan penambat menuju lapisan balas. Bantalan dan rel dikoneksikan dengan penambat rel yang memiliki

fungsi untuk mempertahankan posisi rel dan bantalan dalam menahan pergerakan vertikal, lateral, dan longitudinal dari rel (Selig dan Water, 1994).



Gambar 2.1 Komponen penyusun jalan rel (Selig dan Waters, 1994)

2.1.1 Balas

Balas pada dasarnya adalah terusan dari lapisan tanah dasar dan memiliki fungsi untuk mendistribusikan tegangan akibat lalu lintas kereta pada jalan rel ke tanah dasar, memperkuat kedudukan bantalan, dan meloloskan air sehingga tidak terjadi penggenangan air di sekitar bantalan dan rel (Peraturan Menteri No. 60,

2012). Fungsi lainnya dari balas yaitu meminimalisir deformasi plastis dari struktur jalan rel dan penyerapan getaran (Indrarnatna dkk., 2011). Mengingat fungsi lapisan balas yang krusial, maka material pembentuknya harus sangat terpilih. Menurut Peraturan Menteri No. 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, material balas harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a. Balas merupakan material batu pecah dengan ukuran 25 – 60 mm dan memiliki kapasitas ketahanan umur yang baik dan ketahanan gesek tinggi serta mudah dipadatkan
- b. Bersudut banyak dan tajam
- c. Porositas maksimum 3%
- d. Kuat tekan rata-rata maksimum 1000 kg/cm²
- e. *Specific Gravity (G_s)* minimum 2,6
- f. Kandungan tanah, lumpur, dan material organik maksimum 0,5%
- g. Kandungan minyak maksimum 0,2%
- h. Keausan balas sesuai dengan uji abrasi Los Angeles tidak boleh lebih dari 25%

Sumber material balas di tiap negara bisa terdiri dari batuan yang berbeda, akan tetapi sumber secara umum adalah rheolit, dolomit, gneiss, granit, basalt, batu gamping, dan *blast furnace slag* (Lackenby, 2006).

2.1.2 Sub-balas

Menurut Peraturan Menteri No. 60 Tahun 2012, lapisan sub-balas berfungsi sebagai lapisan penyaring (filter) antara tanah dasar dan lapisan balas dan harus dapat mengalirkan air dengan baik untuk kemudian dialirkan melalui drainase samping. Fungsi lain dari lapisan sub-balas antara lain mencegah partikel halus dari lapisan tanah dasar yang akan naik ke balas (Indrarnatna dkk., 2011).

Lapisan sub-balas adalah material tanah yang memiliki gradasi baik (*well-graded*) yang terdiri dari kerikil halus, kerikil sedang atau pasir kasar yang memenuhi syarat sebagai berikut:

Tabel 2.1 Persyaratan gradasi material sub-balas (PM No. 60, 2012)

Standar saringan ASTM	Persentase Lolos (%)
2 ½"	100
¾"	55 – 100
No. 4	25 – 95
No. 40	5 – 35
No. 200	0 – 10

Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi dalam pemilihan material sub-balas antara lain:

- a. Kandungan material organik tidak boleh lebih dari 5%.
- b. Untuk material sub-balas yang merupakan campuran agregat pecah dan pasir, maka harus mengandung sekurang-kurangnya 30% agregat pecah.
- c. Lapisan sub-balas harus dipadatkan sampai mencapai 100% γ_d menurut uji ASTM D 698.

2.1.3 Tanah Dasar (*Subgrade*)

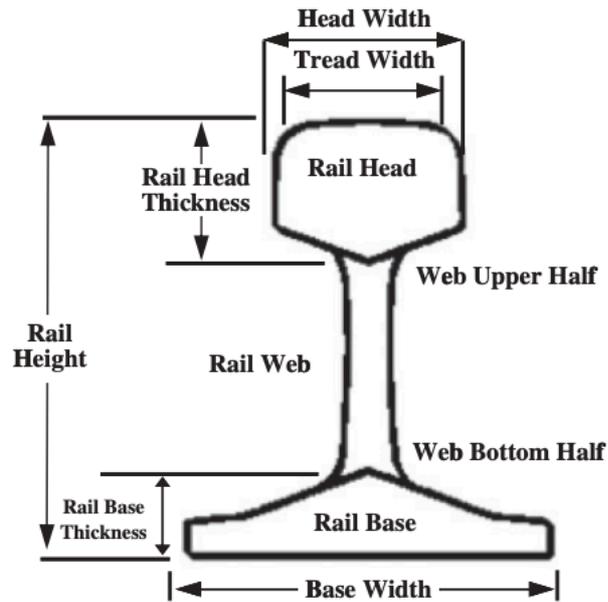
Kutz (2004) menjelaskan beberapa fungsi utama dari tanah dasar yaitu sebagai fondasi yang menjaga stabilitas balas dan sub-balas, memberikan pencegahan terhadap konsolidasi atau penurunan berlebih yang diakibatkan oleh beban dinamis siklis, dan mencegah keruntuhan lereng. Selig dan Waters (1994) menjelaskan bahwa secara umum tanah dasar dapat dikategorikan menjadi dua yaitu:

- a. Tanah dasar alami (*natural ground/formation*)
- b. Timbunan (*fill*)

Daya dukung tanah dasar harus lebih besar dari seluruh beban yang berada di atasnya, termasuk beban kereta api, beban konstruksi jalan rel bagian atas dan beban tanah timbunan untuk badan jalan di daerah timbunan (PM No. 60, 2012)

2.1.4 Rel

Rel adalah batang baja longitudinal dengan bentuk sedemikian rupa dan memiliki fungsi sebagai media transfer beban kereta api melalui roda menuju bantalan (Selig dan Waters, 1994) dengan tampilan *cross-section* seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Cross-section* tipikal rel (Chien dkk., 1996)

2.1.5 Penambat Rel

Penambat rel adalah elemen konektor yang mengikat rel dengan bantalan. Penambat digunakan untuk mencegah pergerakan vertikal, horizontal, dan longitudinal dari rel yang utamanya disebabkan oleh pergerakan kereta api. Gambar 2.3 menunjukkan susunan penambat rel pada sebuah *track* aktif.



Gambar 2.3 Penambat rel (*fastening system*)

2.1.6 Bantalan

Bantalan adalah elemen struktur jalan rel yang berbentuk seperti balok dan biasanya terbuat dari kayu atau beton pra-tegang. Bantalan bertugas untuk mentransfer beban dari rel menuju balas dalam batasan tegangan yang diizinkan (Kutz, 2004). Fungsi

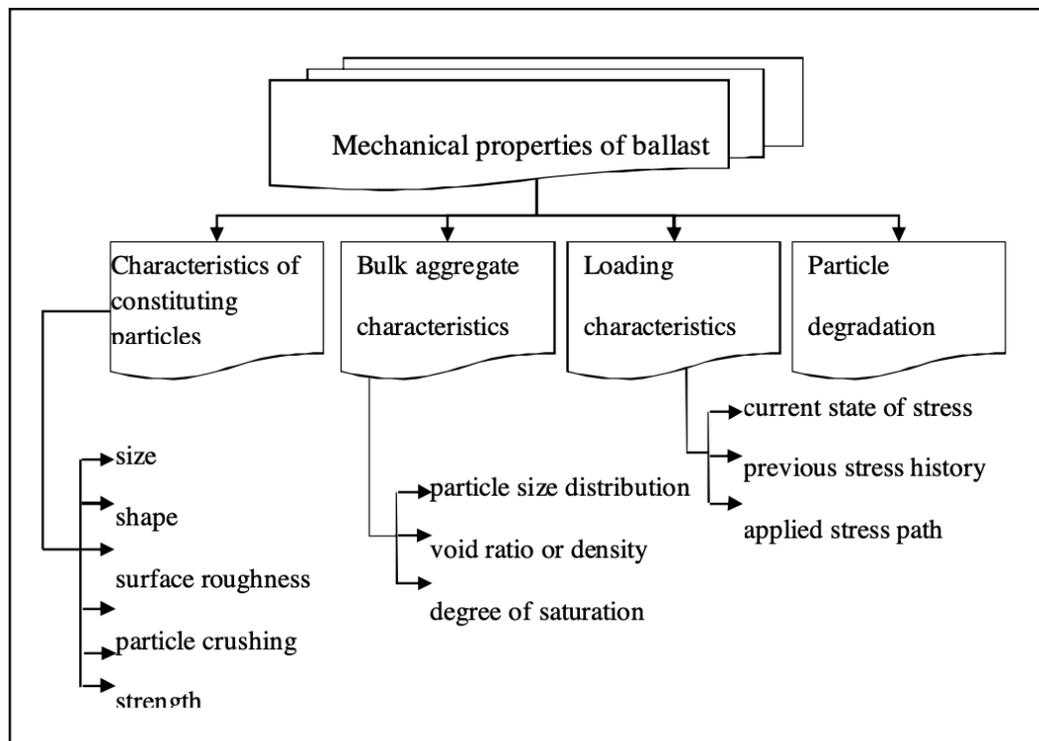
lainnya dari bantalan yang beroperasi bersama dengan penambat yaitu untuk mempertahankan gemetori jalan rel (Ahmadkhani, 2021).



Gambar 2.4 Bantalan pada struktur jalan rel

2.2 Faktor Yang Mempengaruhi Kinerja Balas

Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja balas secara umum terdiri dari karakteristik dasar partikel, karakter agregat pada kondisi bulk, karakteristik pembebanan, dan degradasi partikel. Secara detail faktor-faktor ini terangkum pada Gambar 2.5

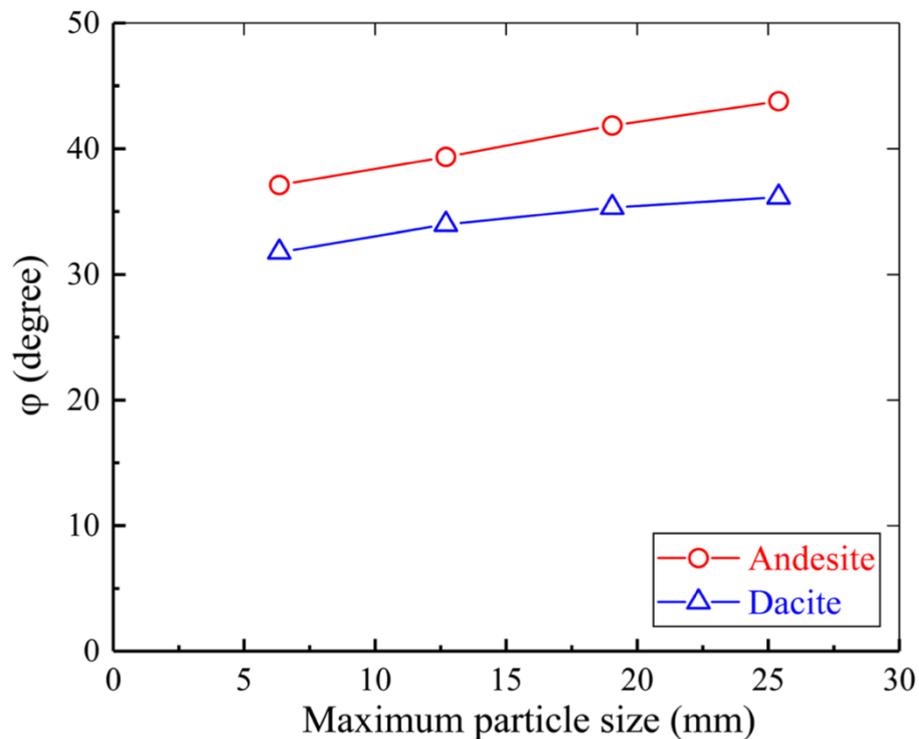


Gambar 2.5 Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja balas (Tennakoon, 2012)

2.2.1 Karakteristik Balas

Sifat mekanis dari balas antara lain terdiri dari ukuran, bentuk, kekasaran permukaan, particle crushing strength, dan ketahanan terhadap erosi.

Pengaruh ukuran partikel terhadap karakteristik geser partikel granuler telah banyak dikaji pada penelitian sebelumnya. Hasil penelitian dari El Naggar dkk. (2021), Rahmani dan Panah (2020), dan Gupta (2009) menunjukkan bahwa sudut geser dalam (*angle of internal friction*) meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran partikel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Hubungan sudut geser dalam dan ukuran partikel (Rahmani, 2020)

Studi yang dilakukan Indraratna dkk. (1998) memberikan hasil yang melengkapi beberapa penelitian sebelumnya. Melalui pengujian triaxial skala besar, hasil eksperimen menunjukkan bahwa kenaikan sudut geser internal akan berhenti di titik puncak (*peak*) lalu mulai turun seiring dengan naiknya ukuran partikel pada tekanan kompresi rendah (<300 kPa). Sementara itu, pada tekanan kompresi tinggi (>400 kPa) pengaruh dari ukuran partikel terhadap perubahan sudut geser internal dapat diabaikan.

Bentuk partikel tentu juga mempengaruhi kuat dan sudut geser dari material granuler. Pada ukuran yang sama, partikel berbentuk bulat akan memiliki sudut geser yang lebih rendah dibandingkan partikel dengan sudut tajam.

2.2.2 Karakteristik Agregat Pada Kondisi *Bulk*

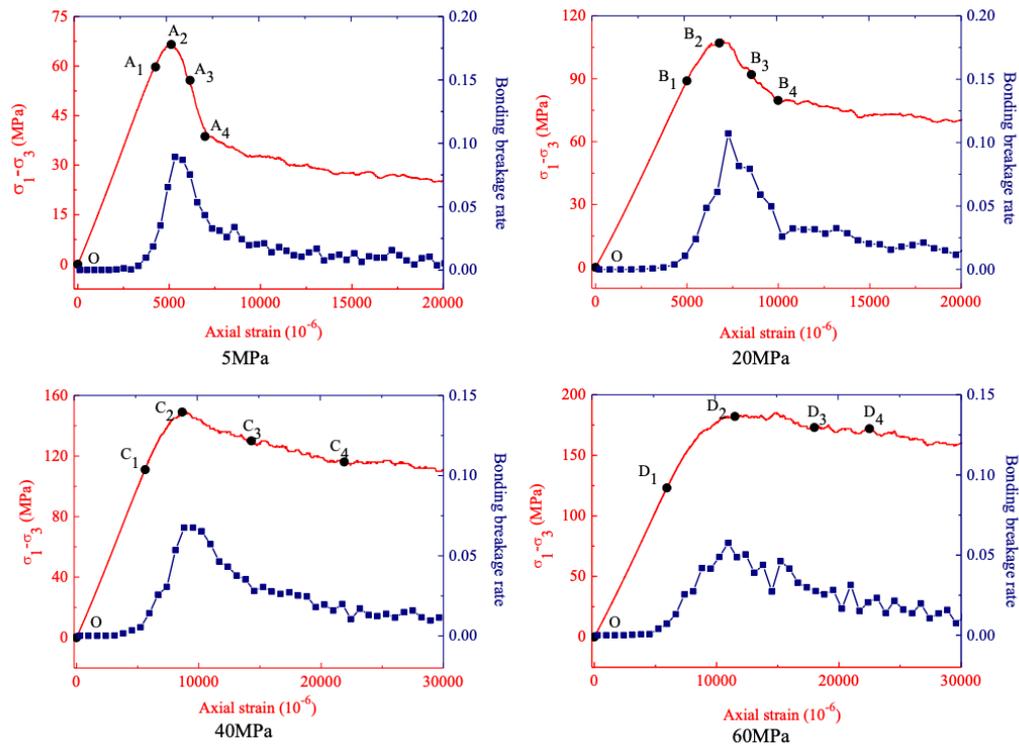
Karakteristik agregat pada kondisi bulk seperti distribusi ukuran partikel, densitas atau *void ratio*, dan derajat kejenuhan (*saturation degree*) berpengaruh secara signifikan terhadap sifat mekanis dari agregat (Tennakoon, 2012).

Terzaghi dan Peck (1948) telah menemukan bahwa *void ratio* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanis agregat. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa agregat yang memiliki gradasi *non-uniform (broadly graded ballast)* memiliki aspek yg kekuatan secara teknis yang lebih baik jika dibandingkan dengan agregat yang tergradasi secara *uniform* (Jeffs dan Marich, 1987). Hal ini dikarenakan *void ratio* menghasilkan gaya tahanan akibat densitas yang lebih tinggi yang dihasilkan dari *interlocking* antar partikel semakin besar dibuktikan dari uji triaksial siklik (Thom dan Brown, 1988).

2.2.3 Karakteristik Pembebanan

Deformasi dan degradasi dari balas sangat dipengaruhi oleh karakteristik pembebanan antara lain *confining pressure*, riwayat pembebanan (*loading history*), kondisi tegangan eksisting, siklus pembebanan, frekuensi pembebanan dan amplitudo (Tennakoon, 2012).

Dalam ilmu mekanika tanah telah diketahui bahwa nilai kuat geser meningkat seiring dengan bertambahnya *confining pressure*. Beberapa penelitian juga telah membuktikan adanya pengaruh signifikan dari *confining pressure* terhadap deformasi tanah dan material granular seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 (Terzaghi dan Peck, 1948; Sun et al., 2015; Zhang et al., 2019). Sementara itu, Marsal (1967) merupakan salah satu pionir yang meneliti tidak hanya efek *confining pressure* terhadap deformasi tetapi juga *particle breakage* pada *rockfills*.



Gambar 2.7 Percepatan *particle bond breakage* pada tegangan berbeda melalui uji triaxial pada *confining pressure* yang berbeda (Zhang et al., 2019)

Riwayat tegangan juga merupakan salah satu faktor penentu karakteristik balas. Dyaljee (1987) pada penelitiannya menyimpulkan bahwa apabila diaplikasikan tegangan deviator siklik sebesar $> 50\%$ riwayat tegangan akan menurunkan akumulasi regangan plastis pada balas secara signifikan. Apabila diaplikasikan tegangan deviator siklik sebesar $< 50\%$ riwayat tegangan tidak akan memberikan pengaruh akumulasi regangan plastis.

Tegangan yang berlaku pada saat operasi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi deformasi dan degradasi balas. Muir Wood (1990) dalam penelitiannya menunjukkan adanya peningkatan regangan plastis yang bergantung pada tegangan (*state of stress*). Ketika tegangan dan *void ratio* bergerak ke arah kritis (*critical state*), maka respon hubungan tegangan-regangan plastis menjadi lebih tinggi seiring dengan meningkatnya beban yang bekerja.

Siklus pembebanan dan akumulasi dari deformasi plastis dari balas dan material granuler telah banyak dipelajari. Secara umum, peningkatan siklus beban akan meningkatkan deformasi lateral dan penurunan dari material granuler, termasuk balas (Sun et al., 2016).

2.2.4 Degradasi Partikel

Secara prinsip, seluruh material granuler yang menerima tegangan di atas batas tertentu akan menunjukkan kecenderungan *particle breakage* pada level tertentu. Prinsip ini telah dibuktikan oleh banyak penelitian seperti yang dilakukan oleh Terzaghi dan Peck (1948), Bishop (1966), dan Hardin (1985). Beberapa penelitian bahkan mengindikasikan bahwa *particle breakage* dapat terjadi pada kondisi *low confining pressure* (Indraratna dan Salim, 2002; Lackenby et al., 2007).

Potensi material granuler untuk mengalami *particle breakage* meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran partikel. Hal ini dikarenakan gaya kontak normal antar partikel meningkat dan probabilitas terjadinya *micro-cracks* meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran partikel. Hardin (1985) memperkenalkan *relative breakage index* sebagai berikut:

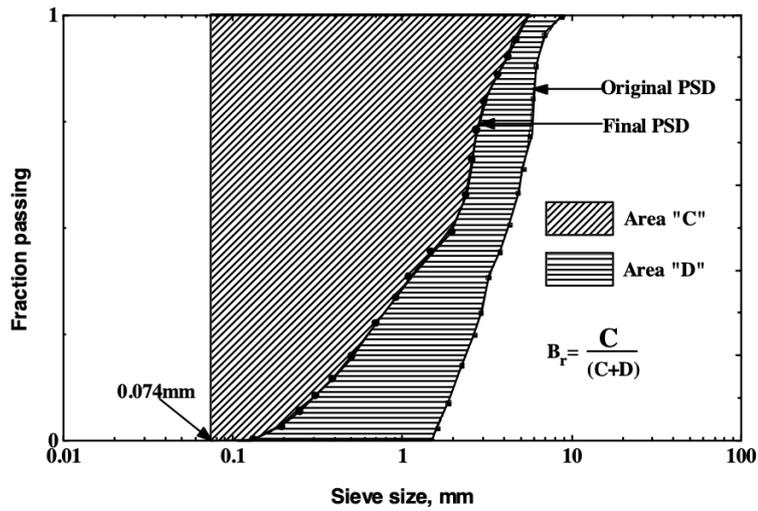
$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (2.1)$$

dimana:

B_t : *total breakage*

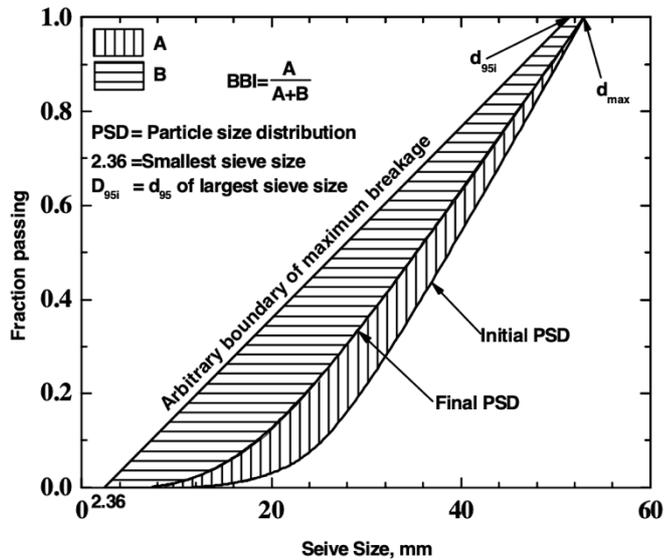
B_p : *potential breakage*

Hardin (1985) merujuk batas bawah dari *particle breakage* pada partikel tanah lanau (*silt*) ukuran $D = 0,074$ mm. Tujuannya adalah untuk melakukan prediksi terhadap *potential breakage* (B_p) yang didefinisikan sebagai luas area antara garid batas $D = 0,074$ mm dan original PSD (*particle size distribution*) seperti yang terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Relative Breakage Index*, B_r (Hardin, 1985)

Lackenby et al. (2007) pada penelitiannya menggunakan teknik yang serupa dan mengembangkan indeksasi baru yaitu *Ballast Breakage Index* (BBI). BBI adalah metode kuantifikasi *ballast breakage* sekaligus metode identifikasi perubahan kurva gradasi partikel pada balas. Melalui uji triaxial, penelitian ini menunjukkan bahwa degradasi partikel menyebabkan pergeseran pada batas bawah ukuran partikel ke arah ukuran yang lebih kecil. Akan tetapi, ukuran partikel maksimum sebelum dan setelah pembebanan tidak mengalami perubahan. Metode BBI dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Metode *Ballast Breakage Index* (Lackenby et al., 2007)

2.3 Permasalahan Sub-struktur Jalan rel

Neil (1976) secara umum mengklasifikasikan kegagalan sub-struktur menjadi 2 kategori yaitu:

1. Kegagalan akibat hilangnya kuat geser
2. Infiltrasi air ke tanah (*pumping*)

Permasalahan sub-struktur yang paling umum antara lain:

1. Penurunan track
2. Degradasi balas
3. Kegagalan pada tanah dasar
4. *Ballast fouling*
5. Kondisi drainase yang tidak baik

Pada penelitian ini akan dibahas secara lebih detail mengenai *ballast fouling* dan kondisi drainase yang tidak baik.

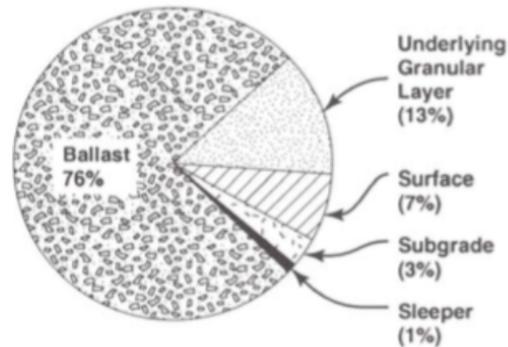
2.3.1 *Ballast Fouling*

Selig dan Waters (1994) berpendapat bahwa, beban dinamis yang berasal dari kereta api dapat memicu erosi pada partikel balas. Tegangan kontak yang terjadi antar partikel akan mengakibatkan *ballast breakdown*. Partikel-partikel halus dari proses erosi internal yang terjadi dapat mengurangi permeabilitas balas dan kemampuan balas dalam mempertahankan geometri jalan rel. Fenomena ini disebut *ballast fouling*. Penelitian dari Indraratna et al. (2010) membuktikan bahwa 70% dari partikel halus eksisting di balas berasal dari *ballast breakdown*. Persentase sisanya antara lain didominasi oleh migrasi partikel dari tanah dasar (Rushton dan Ghataora, 2009).

2.3.1.1 Sumber *Ballast Fouling*

Sellig dan DelloRusso (1991) menjelaskan bahwa sumber utama dari *ballast fouling* adalah *ballast breakdown* seperti yang terlihat pada Gambar 2.10. Akan tetapi, ada beberapa sumber lain antara lain:

- Infiltrasi dari permukaan
- Bantalan
- Migrasi partikel halus dari sub-balas
- Migrasi partikel dari tanah dasar



Gambar 2.10 Persentase sumber *ballast fouling* (Selig dan DelloRusso, 1991)

Selig et al. (1988) menjelaskan bahwa faktor-faktor seperti beban layan kereta, lingkungan (perubahan iklim dan pelapukan), dan operasional dan perawatan (*tamping, regrading, dan handling*) memiliki peran signifikan terhadap percepatan *ballast breakdown*. Tumpahan dari material yang diangkut kereta seperti partikel batu bara, partikel halus yang dibawa angin dan air adalah beberapa sumber *ballast fouling* yang berasal dari infiltrasi permukaan. Keberadaan air juga dapat memicu mekanisme migrasi partikel dari lapisan-lapisan di bawah balas seperti sub-balas dan tanah dasar. Atas dasar ini, keberadaan sistem drainase yang efektif menjadi sangat penting agar air berada di dalam struktur jalan rel dapat dibuang dengan cepat untuk mengurangi kemungkinan migrasi partikel dari lapisan bawah balas. Secara keseluruhan, sumber *ballast fouling* dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sumber *ballast fouling* (Selig dan Waters, 1994)

Tipe ballast fouling	Sumber
<i>Ballast breakdown</i>	<i>Handling</i> (<i>quarry</i> , transportasi, <i>dumping</i>)
	Temperatur tinggi
	Pelapukan fisik dan kimiawi
	<i>Tamping</i>
	Beban siklis, getaran, dan tekanan hidrolik lumpur
Infiltrasi permukaan	Tumpahan material dari kereta
	Material terbawa angin dan air
	Kotoran dan area sekitar
Migrasi partikel dari sub-balas	Partikel halus dari lapisan tanah di bawah balas yang bermigrasi ke arah atas (balas) akibat beban siklik dan keberadaan air di dalam struktur jalan rel
Migrasi partikel dari tanah dasar	
Bantalan (hanya kayu)	Degradasi material kayu dari bantalan

2.3.1.2 Kuantifikasi *Ballast Fouling*

Selig dan Waters (1994) memperkenalkan *Fouling Index* (FI) untuk mengkuantifikasi *ballast fouling* melalui Persamaan 2.2.

$$FI = P_4 + P_{200} \quad (2.2)$$

dimana,

FI : *fouling index*

P₄ : persentase balas yang lolos saringan no. 4 (4,75 mm)

P₂₀₀ : persentase balas yang lolos saringan no. 200 (0,075 mm)

Menurut Indrarnatna et al. (2011), Persamaan 2.2 menjadi tidak aplikatif untuk jenis material berbeda pada saat yang bersamaan misalnya material yang memiliki *specific gravity* yang berbeda.

Feldman dan Nissen (2002) memperkenalkan metode kuantifikasi *ballast fouling* lain yaitu **Percentage Void Contamination** seperti yang terlihat pada Persamaan 2.3.

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

dimana,

PVC : *Percentage Void Contamination*

V_1 : volume *void* dari balas yang dipadatkan

V_2 : volume *void* dari material *fouling* yang dipadatkan (lolos saringan 9,5 mm)

Akan tetapi metode ini cukup memakan waktu (Ahmadkhani, 2021). Selain itu, apabila volume material *fouling* digunakan, gradasi material *fouling* tidak bisa diikutsertakan pada perhitungan berbasis volume.

Indraratna et al. (2011) mengajukan parameter lain untuk mengkuantifikasi ballast *fouling* sebagai “*relative ballast fouling ratio*” seperti yang terlihat pada Persamaan 2.4.

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\% \quad (2.4)$$

dimana,

R_{b-f} : relativitas balas terhadap material *fouling*

M_f : massa kering dari material *fouling*

M_b : massa kering balas

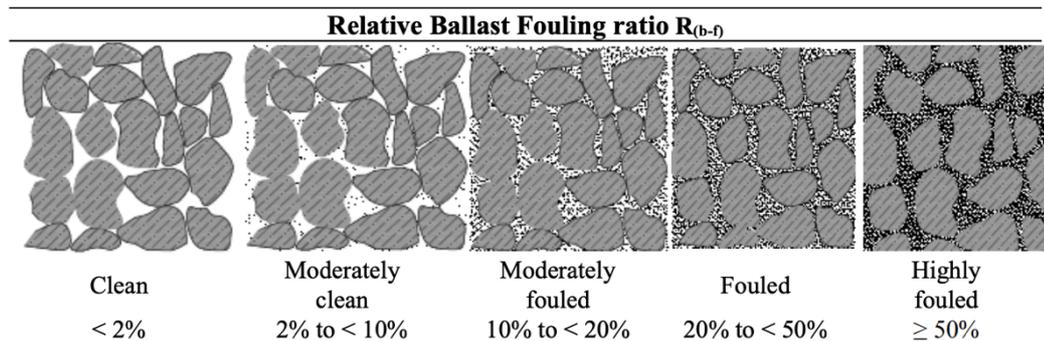
G_{b-f} : *specific gravity* material *fouling*

G_{s-f} : *specific gravity* balas

Hubungan antara *fouling index*, *percentage void contamination* dan *relative ballast fouling ratio* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Hubungan *fouling index*, *percentage void contamination*, dan *relative ballast fouling ratio* (Indraratna et al., 2011)

Kategori	<i>Fouling Index</i> (%)	<i>Percentage Void Contamination</i> (%)	<i>Relative Ballast Fouling Ratio</i> (%)
<i>Clean</i>	< 1	< 2	< 2
<i>Moderately clean</i>	1 < FI < 10	2 < PVC < 9,5	2 < R < 10
<i>Moderately fouled</i>	10 < FI < 20	9,5 < PVC < 17,5	10 < R < 20
<i>Fouled</i>	20 – 40	17,5 – 34	20 – 50
<i>Highly fouled</i>	> 40	> 34	> 50



Gambar 2.11 Skema *ballast fouling* berdasarkan *relative ballast fouling ratio* (Danquah et al., 2014)

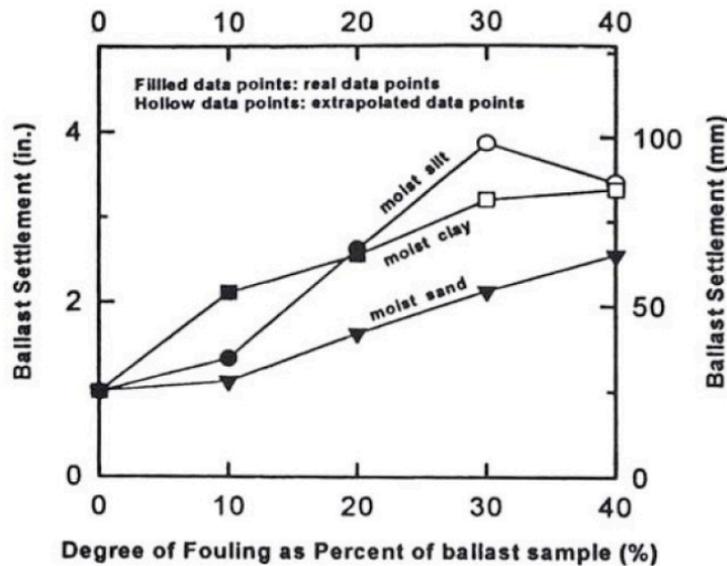
2.3.2 Pengaruh *Fouling* Pada Kinerja Balas

Terbentuknya dan masuknya material *fouling* ke dalam lapisan balas dapat mempengaruhi performa balas seperti penurunan *track*, konduktivitas hidraulik, dan modulus ketahanan balas. Pengaruh dari material *fouling* dapat berasal dari volume, massa, dan jenis material *fouling*.

2.3.2.1 Pengaruh *Fouling* Terhadap Penurunan Balas

Han dan Selig (1997) melakukan beberapa pengujian berdasarkan kategori *fouling* dan indeks yang berbeda untuk mengetahui efek *fouling* pada penurunan balas.

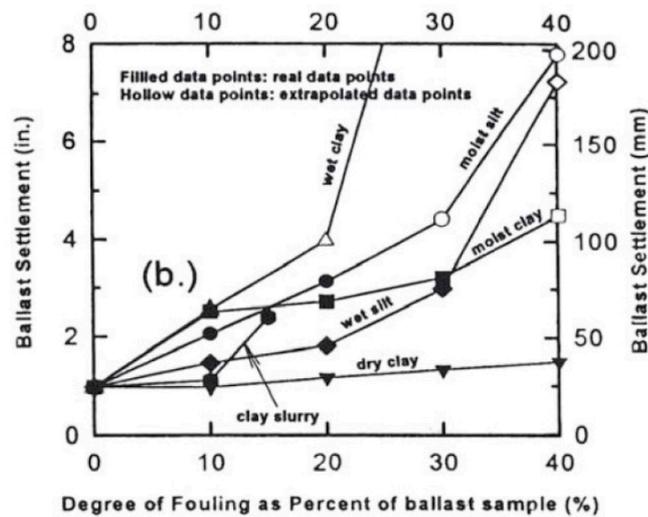
Pengujian tersebut menunjukkan hasil bahwa pada kondisi bersih hingga 20% *fouled*, balas yang terisi material *fouling* jenis lempung penurunan yang lebih besar dibandingkan balas yang terisi material lanau. Akan tetapi setelah setelah 20% *fouled*, material lanau mendorong penurunan balas yang lebih signifikan dibandingkan material lempung. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Hubungan *fouling index* dan penurunan balas (Han dan Selig, 1997)

Han dan Selig (1997) juga melakukan kajian terhadap efek kadar air pada penurunan balas pada jenis material *fouling* yang berbeda. Dari kajian tersebut ditemukan bahwa balas yang memiliki material *fouling* berupa partikel lempung kering memiliki nilai penurunan minimum dibandingkan dengan partikel lain yang diuji. Nilai penurunan balas juga meningkat secara signifikan yang dipicu oleh penambahan kadar air yang dapat terlihat dari meningkatnya nilai *fouling index* seperti yang terlihat pada Gambar 2.13.

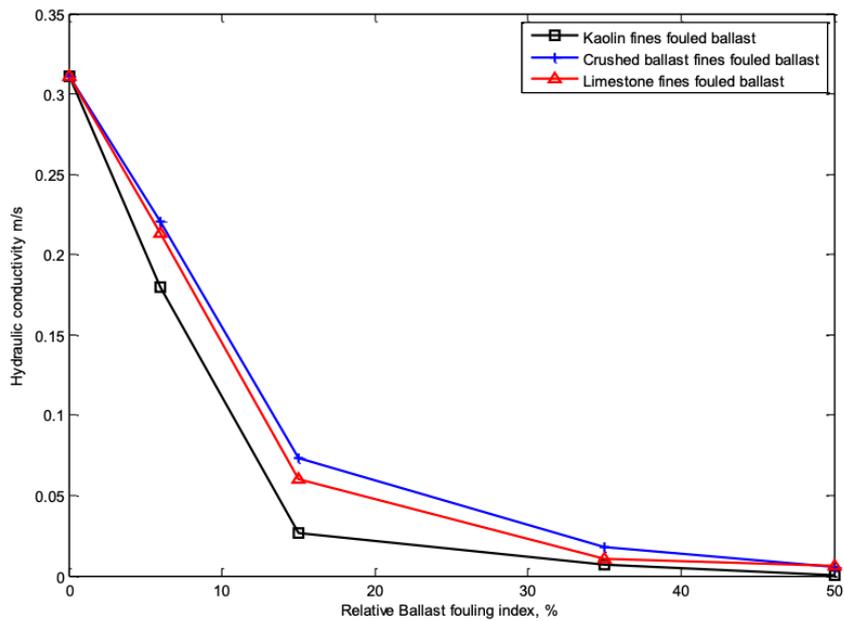
Pada kajian tersebut juga diperlihatkan bahwa balas mengalami percepatan penurunan yang signifikan ketika *fouling index* melebihi 20%. Hal ini dikarenakan ketika *fouling index* $\leq 20\%$, campuran balas dan material *fouling* akan dominan bekerja sebagai balas. Akan tetapi ketika *fouling index* $\geq 20\%$, campuran balas dan *fouling* akan memiliki kecenderungan untuk bekerja sebagai material *fouling* itu sendiri. Hasil kajian kemudian dikonfirmasi ulang pada penelitian Danquah et al. (2014) dan Tennakoon et al. (2012).



Gambar 2.13 Pengaruh kadar air ditinjau dari *fouling index* dan jenis material terhadap penurunan balas (Han & Selig, 1997)

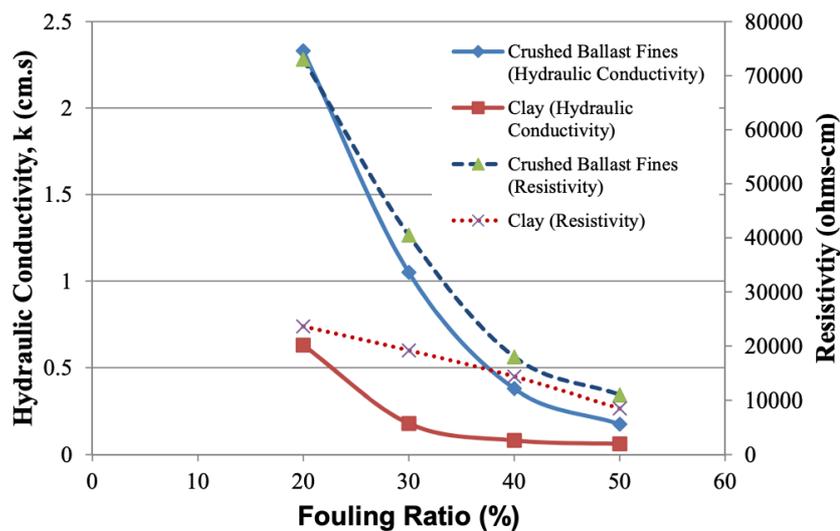
2.3.2.2 Pengaruh *Fouling* Terhadap Konduktivitas dan Resistivitas Hidrolik

Danquah et al. (2014) melakukan pengujian terhadap konduktivitas hidrolik dari fouled ballast menggunakan berbagai material *fouling* seperti balas yang dihancurkan, partikel halus dari *limestone*, dan kaolin. Hasil dari pengujian tersebut menunjukkan bahwa permeabilitas balas menurun seiring dengan meningkatnya *fouling index* seperti yang terlihat pada Gambar 2.14. Selain itu, ditemukan juga “*braking point*” pada nilai *fouling index* 15% yaitu kondisi dimana pada konduktivitas hidrolik mengalami penurunan yang signifikan pada *fouling index* sebesar 0% – 15%.



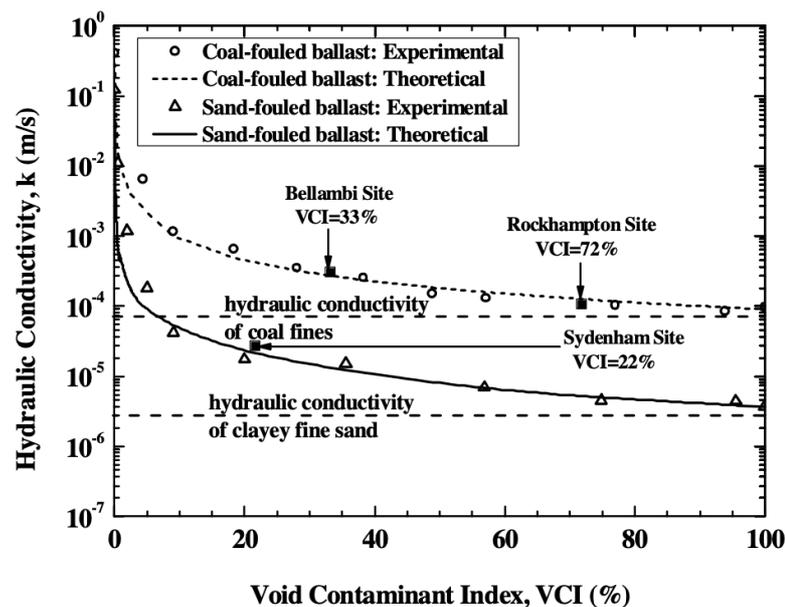
Gambar 2.14 Hubungan konduktivitas hidrolik dan *relative ballast fouling index* (Danquah et. al., 2014)

Rahman et. al., (2014) melaksanakan uji permeabilitas dan resistivitas pada sampel balas bersih dan *fouled*. Hasil pengujian turut menunjang hasil penelitian dari Danquah et. al. (2014) yaitu konduktivitas hidrolik yang menurun seiring dengan meningkatnya persentase *fouling* seperti yang terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Hubungan konduktivitas dan resistivitas hidrolik dengan *fouling ratio* (Rahman et. al., 2014)

Tennakoon et. al (2012) melaksanakan beberapa set pengujian *constant-head hydraulics conductivity* pada sampel material *fouling* berupa lempung-berpasir dan partikel batubara berdasarkan pengukuran volumetrik *ballast fouling*. Gambar 2.16 menunjukkan hasil kajian tersebut yaitu adanya penurunan permeabilitas secara signifikan seiring dengan bertambahnya *void contamination index (VCI)* atau *fouling index*.



Gambar 2.16 Hubungan konduktivitas hidrolis dan VCI pada material *fouling* lempung-berpasir dan partikel batubara (Tennakoon et. al., 2012)

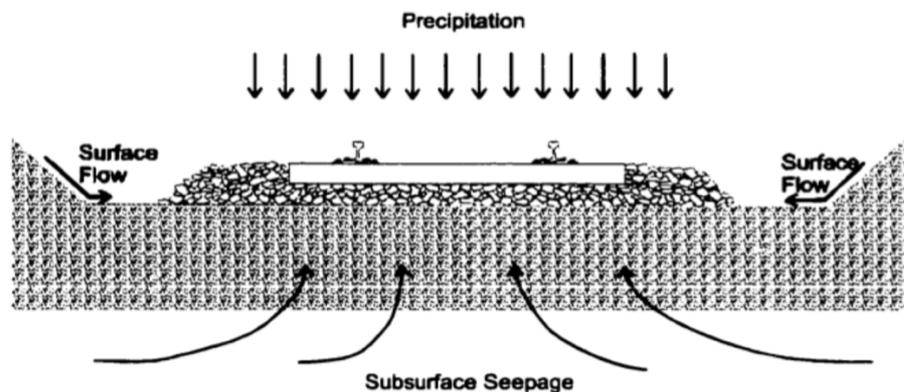
2.4 Air Pada Struktur Jalan Rel

Air memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan dan kekuatan struktur jalan rel. *FHWA Highway Subdrainage Design Manual* (1980) menyebutkan beberapa sumber air pada level *subsurface* antara lain:

- a. Molekul air yang terikat pada permukaan partikel tanah
- b. Kelembaban kapiler
- c. Uap air yang berada di atas zona saturasi
- d. Air gravitasi

Dari beberapa sumber eksistensi air pada struktur jalan maupun jalan rel, air gravitasi adalah sumber yang memiliki pengaruh paling signifikan. Hal ini

dikarenakan air dapat bergerak di dalam rongga tanah dalam pengaruh gravitasi dan/atau pengaruh gradien (Ahmadkhani, 2021). Pada struktur jalan rel, mekanisme masuknya air ke tanah dasar bisa melalui 3 mekanisme yaitu presipitasi, aliran bawah tanah, dan aliran air permukaan seperti yang terlihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Mekanisme peresapan air pada jalan rel dari sumber yang berbeda (Selig & Waters, 1994)

2.4.1 Aspek Drainase Balas

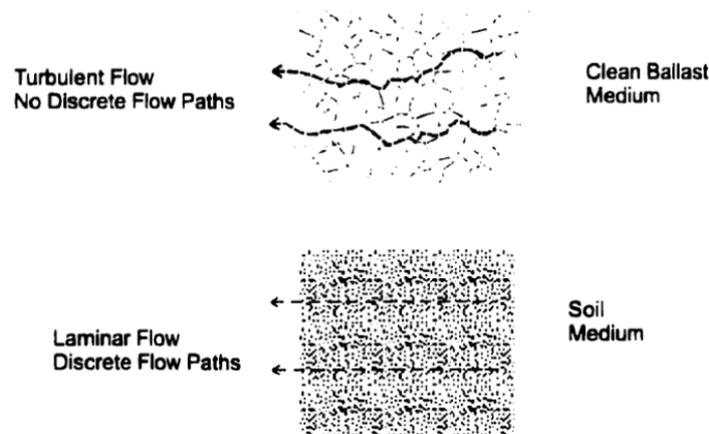
Ketika balas tidak mengalami kondisi fouling yang berlebihan, air yang masuk dari hasil presipitasi akan mengalir ke lapisan bawah balas dan masuk ke saluran drainase sehingga tidak melimpas (*runoff*) di permukaan jalan rel (Selig & Waters, 1994; Heyns, 2000).

Selig dan Waters (1994) menyebutkan beberapa jenis aliran yang terjadi pada lapisan balas berdasarkan derajat fouling dan karakteristik hujan yang terjadi sebagai berikut:

- Jenuh (*saturated*) atau sebagian jenuh (*partially saturated*)
- Aliran mantap (*steady flow*) atau aliran tak mantap (*unsteady flow*)
- Laminer atau turbulen

Cedergren (1977) menginvestigasi aliran air di dalam tanah. Disimpulkan bahwa pada aliran laminar satu jalur air tidak akan melewati/menabrak partikel air lainnya. Akan tetapi pada aliran turbulen, partikel air menentukan jalurnya sendiri secara acak.

Heyns (2000) menyatakan bahwa aliran pada tanah secara garis besar dapat diasumsikan sebagai aliran laminar. Akan tetapi pada material granuler yang memiliki ukuran relatif lebih besar seperti balas, aliran yang lewat secara garis besar dapat diasumsikan sebagai aliran turbulen. Gambar 2.18 memperlihatkan perbedaan aliran air saat melewati partikel tanah dan balas.



Gambar 2.18 Perbedaan sifat aliran air yang melewati partikel tanah dan balas (Heyns, 2000)

Aliran air pada kondisi laminar pada material granuler tanah memiliki kecepatan aliran yang relatif lebih rendah dibandingkan aliran air turbulen yang memiliki *void* seperti pada balas bersih. Pada kondisi aliran kecepatan dengan kecepatan aliran rendah, rumus empiris Darcy dapat diadaptasi untuk menghitung debit (*discharge*). Akan tetapi pada aliran turbulen, kecepatan aliran berubah secara langsung mengikuti gradien hidrolis. Pada kondisi aliran semi-turbulen, kecepatan aliran berubah secara minor mengikuti perubahan gradien hidrolis (Cedergren, 1987; Heyns, 2000). Perubahan aliran dari laminar menjadi turbulen yang terjadi secara mantap (*steadily*) dapat direpresentasikan oleh bilangan Reynolds seperti pada persamaan di bawah ini.

$$R = \frac{Qd}{nAv} \quad (2.5)$$

dimana,

- n : porositas tanah
- Q : debit (m³/s)
- d : diameter rata-rata partikel tanah (m)
- A : luas area *cross-section* tanah (m²)
- v : viskositas kinematik (m²/s)

Studi yang dilakukan (Heyns, 1997) mengenai tipe aliran tetap pada balas jenuh menyimpulkan beberapa hal, antara lain:

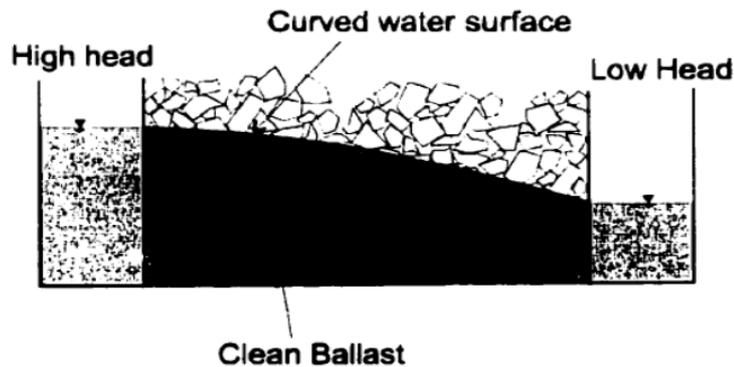
1. Fouling index balas menentukan kondisi aliran pada lapisan balas
2. Kedalaman aliran pada lapisan balas menentukan kondisi aliran hingga batas tertentu
3. Kemiringan balas tidak memberikan efek pada jenis aliran

Hasil penelitian tersebut dirangkum dalam sebuah tabel yang menunjukkan hubungan kedalaman aliran pada lapisan balas, *fouling index*, dan angka Reynolds seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.4 Angka Reynolds terukur untuk aliran pada balas single-track (Heyns, 1997)

Depth of flow in ballast (ft)	Clean ballast (FI=0-1)	Moderately clean ballast (FI=1-20)	Moderately fouled ballast (FI=10-20)	Fouled ballast (FI=20-40)	Highly fouled ballast (FI=40)
	Measured Reynolds number				
0.1	22	8	1.2	0.4	0.002
0.2	44	16	2.4	0.8	0.004
0.5	111	40	6.1	2	0.01
1	222	81	12.1	4	0.02
1.5	333	121	18.2	6.1	0.03

Mulke (1981) melaksanakan uji permeabilitas lateral pada balas bersih dan *fouled ballast* untuk mengevaluasi pergerakan aliran air pada lapisan balas. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan kurva muka air dari elevasi *high head* menuju *low head* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19.



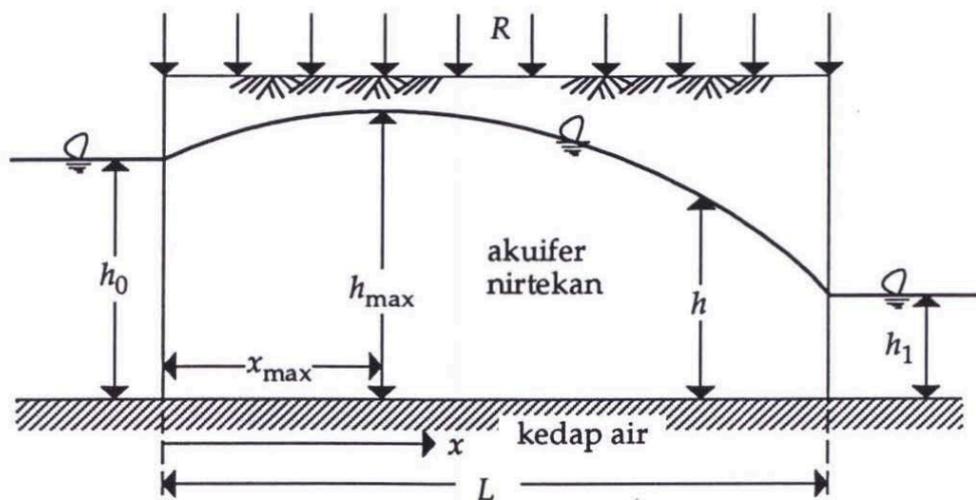
Gambar 2.19 Uji permeabilitas lateral pada balas bersih oleh Mulke (1981) (Heyns, 2000)

Beberapa hal yang ditekankan oleh Mulke (1981) selama pengujian permeabilitas lateral antara lain:

1. Gradien hidrolis dan kecepatan aliran debit terukur memiliki hubungan non-linear. Maka dari itu, penggunaan hukum Darcy menjadi tidak valid
2. Penyusunan ulang balas memiliki efek yang signifikan terhadap hubungan gradien hidrolis dan debit terukur ketika sampel berupa *fouled ballast*
3. Kondisi aliran adalah berupa transisi diukur dari angka Reynolds ketika sampel merupakan campuran *clean ballast* dan *fouled ballast*

Berdasarkan hasil studi yang dilakukan oleh Mulke (1981) dan pengujian yang dilakukan oleh Heyns (1997) dan Heyns (2000) dapat disimpulkan bahwa aliran remebesan pada balas bersih adalah aliran turbulen. Ketika material *fouling* mengisi ruang di antara partikel balas, secara progresif aliran akan berubah menjadi laminar.

Heyns (2000) secara spesifik melakukan kajian skala laboratorium terhadap sistem aliran antar partikel balas menggunakan gradien dasar balas yang berbeda-beda (0, 1%, dan 5%) dengan hasil yang menunjukkan korelasi antara gradien hidrolik dan waktu pelepasan air dari balas. Rushton dan Ghataora (2009) menggunakan eksperimen dari Heyns (2000) untuk melaksanakan analisis numeris berbasis *time variant* terhadap sifat drainase lapisan balas. Adapun persamaan dari kedua studi tersebut yaitu digunakannya persamaan dasar dari Dupuit yang diturunkan sesuai dengan kebutuhan dari masing-masing studi. Persamaan Dupuit yang digunakan yaitu persamaan yang menggambarkan konsep kondisi akuifer nirtekan dengan sistem *recharge* seperti yang terlihat pada Gambar 2.20 di bawah ini.



Gambar 2. 20 Konsep persamaan Dupuit pada akuifer nirtekan dengan sistem *recharge*

Konsep parabola muka air tanah pada Gambar 2.20 dapat dijelaskan dalam persamaan Dupuit di bawah ini.

$$h^2 = h_0^2 - \frac{R}{K}x^2 - \frac{2q_0}{K}x \quad (2.5)$$

dengan,

$$q_0 = \frac{K}{2L}(h_0^2 - h_1^2) - \frac{RL}{2} \quad (2.6)$$

Dimana,

L : panjang aliran horizontal (m)

h : ketinggian muka air pada titik X di sepanjang L (m)

h₀ : tinggi hydraulic head awal (m)

h₁ : tinggi hydraulic head akhir (m)

R : *recharge* air yang masuk ke sistem akuifer (m/det)

q₀ : aliran yang masuk ke sistem akuifer dengan asumsi arah horizontal (m²/det)

K : konduktivitas hidrolik (m/det)

2.4.2 Klasifikasi Drainase Pada *Fouled Ballast*

Tennakoon et al. (2012) mengusulkan klasifikasi kapasitas drainase yang berdasarkan pada proporsi sebagai berikut.

$$\text{Drainage classification} = \frac{Q}{Q_c} \quad (2.7)$$

dimana,

Q : kapasitas drainase maksimum balas berdasarkan pengukuran VCI pada uji konduktivitas hidrolik di laboratorium

Q_c : intensitas hujan maksimum pada balas per satuan panjang balas di lapangan

Apabila rasio Q/Q_c adalah sama dengan 1, maka kondisi jalan rel adalah menuju derajat jenuh (*saturated*) terhadap intensitas hujan yang terjadi. Adapun usulan klasifikasi kapasitas drainase tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Klasifikasi kapasitas drainase (Tennakoon et. al., 2012)

Klasifikasi kapasitas drainase	Q/Q_c
<i>Free drainage</i>	>100
<i>Good drainage</i>	$10 < Q/Q_c < 100$
<i>Acceptable drainage</i>	$1 < Q/Q_c < 10$
<i>Poor drainage</i>	$0,1 < Q/Q_c < 1$
<i>Very poor drainage</i>	$0,001 < Q/Q_c < 0,1$
<i>Impervious</i>	$< 0,001$

2.5 Aplikasi GPR (*Ground Penetration Radar*) Pada Asesmen Jalan Rel

GPR (*Ground Penetration Radar*) telah digunakan pada kegiatan inspeksi balas di berbagai negara selama kurun waktu dua dekade terakhir, khususnya inspeksi *ballast fouling level* (Guo et al., 2022). Metode konvensional dari evaluasi kondisi balas adalah melalui metode visual. Di Indonesia, umur balas dievaluasi berdasarkan *passing tonage*. Balas akan langsung diganti apabila *passing tonage* dari jalan rel telah tercapai. Kedua metode memiliki kekurangan yang sama yaitu tidak terdeteksinya lapisan rel secara riil. GPR adalah metode asesmen non-destruktif yang dapat digunakan untuk mengetahui lapisan bawah rel secara efektif, cepat, dan kontinyu (Al-Qadi et al., 2008).

Metode asesmen jalan rel menggunakan GPR telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya dengan menggunakan tipe GPR berbeda. Jack dan Jackson (1999) menggunakan GPR dengan frekuensi antena 450 MHz dan 900 MHz untuk mendapatkan gambaran pada lapisan balas dan subgrade. Narayanan et al. (1999) membandingkan data GRP dengan frekuensi berbeda. GPR dengan frekuensi 400 MHz menghasilkan estimasi kedalaman lapisan-lapisan pada sub-struktur jalan rel lebih baik dari GPR dengan frekuensi 100 MHz. Akan tetapi, GPR dengan frekuensi 100 MHz lebih baik dalam mendeteksi keberadaan *water pocket* di pada kedalaman yang lebih jauh.

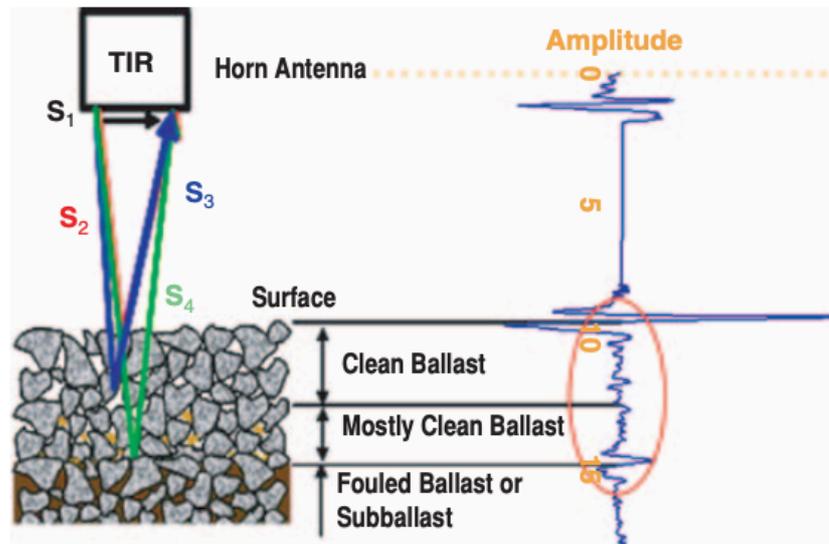
Roberts et al. (2006) dan Al-Qadi et al. (2008) menggunakan GPR dengan kapasitas frekuensi 2 GHz untuk mengevaluasi *ballast fouling* berdasarkan respon gelombang EM pada balas (*scattering approach*). Metode *scattering approach*

menginterpretasi data GPR dalam domain waktu dan menyajikan kedalaman fouling berdasarkan *scattering intensity*.

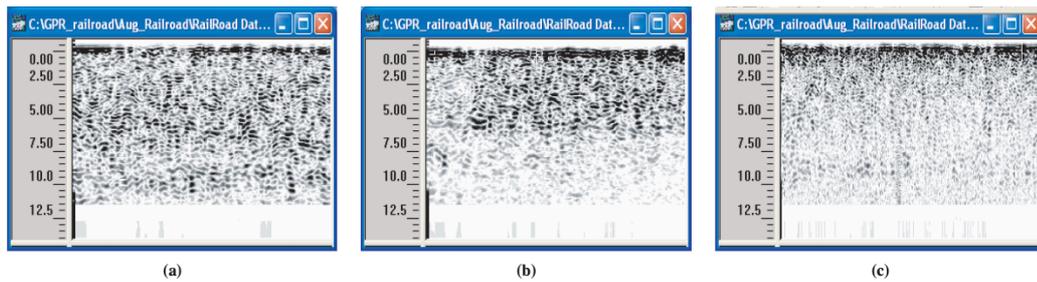
2.5.1 Prinsip Alat GPR (*Ground Penetration Radar*)

GPR memiliki dua komponen dasar yaitu *transmitter* dan *receiver antenna*. *Transmitter* mengirim gelombang elektromagnetik ke dalam tanah. *Receiver antenna* mengumpulkan sinyal yang direfleksikan dari *interface* dan ketidaksesuaian dari *material interface* akan terlihat melalui *electromagnetic properties* pada material tersebut yang berbeda (Shangguan et al., 2012). Gambar 2.21 menunjukkan pola propagasi gelombang tipikal pada lapisan balas dari jalan kereta.

S_1 merepresentasikan propagasi gelombang elektromagnetik dari *transmitter* ke *receiver*. Bagian sinyal ini biasanya diartikan sebagai *noise* dan bisa diabaikan. S_2 adalah gelombang yang direfleksikan oleh permukaan balas. S_3 merepresentasikan sebaran gelombang elektromagnetik yang disebabkan oleh *interface* dari balas-udara-*fouling*. Bagian sinyal yang berada di dalam lingkaran pada Gambar 2.21, akan mengalami propagasi di dalam lapisan balas sehingga secara dominan memberikan informasi mengenai fenomena *ballast fouling*. S_4 merepresentasikan *interface* dari balas bersih dan *fouled ballast* atau sub-balas. Dalam hal ini, gelombang S_4 mungkin saja tidak bisa diobservasi apabila *interface* tidak jelas. Adapun data luaran dari GPR dengan frekuensi 2-GHz dapat dilihat pada Gambar 2.22.



Gambar 2.21 Sinyal GPR tipikal pada lapisan balas (Shangguan et al., 2012)



Gambar 2.22 Gambar luaran dari GPR pada balas dengan kondisi berbeda: (a) balas bersih, (b) *moderately fouled ballast*, dan (c) *fouled ballast* (Shangguan et al., 2012)

2.5.2 Proses Pengolahan Data

Perbedaan signifikan dari sinyal GPR (dalam domain waktu dan frekuensi) antara balas bersih dan *fouled ballast* merefleksikan level dari *ballast fouling* (Guo et al., 2022). Pada balas bersih, agregat mengisi 70% dan udara mengisi 30% dari volume total. Maka dari itu, agregat dapat dianggap sebagai media transmisi dan pori-pori berisi udara sebagai scatter objects (Shangguan et al., 2012). Sebaran gelombang elektromagnetik bisa dibagi menjadi tiga domain bergantung kepada hubungan antara panjang gelombang dan ukuran *scatterer*. Apabila ukuran *scatterer* secara signifikan lebih besar atau lebih kecil dari panjang gelombang, maka dapat

digolongkan kepada *geometric scattering domain* atau *Rayleigh scattering domain*. Apabila scatterer berada dalam skala yang sama dengan panjang gelombang, maka dapat dikategorikan ke Mie scattering domain (Chuang, S. L., 2009). Nilai dari dimensi normal D^N dapat digunakan untuk membandingkan ukuran *scatterer* dan panjang gelombang seperti pada persamaan di bawah ini:

$$D^N = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

dimana,

D^N : dimensi normal dari *scatterer*

a : dimensi pori udara

λ : panjang gelombang pada balas

c : kecepatan cahaya pada ruang bebas ($1,2 \times 10^{10}$ in./s = 3×10^8 m/s)

f : frekuensi dominan antena GPR

ϵ_r : konstanta dielektrik dari medium

3 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi pada penelitian ini digambarkan secara skematis pada bagan alir di Gambar 3.1.

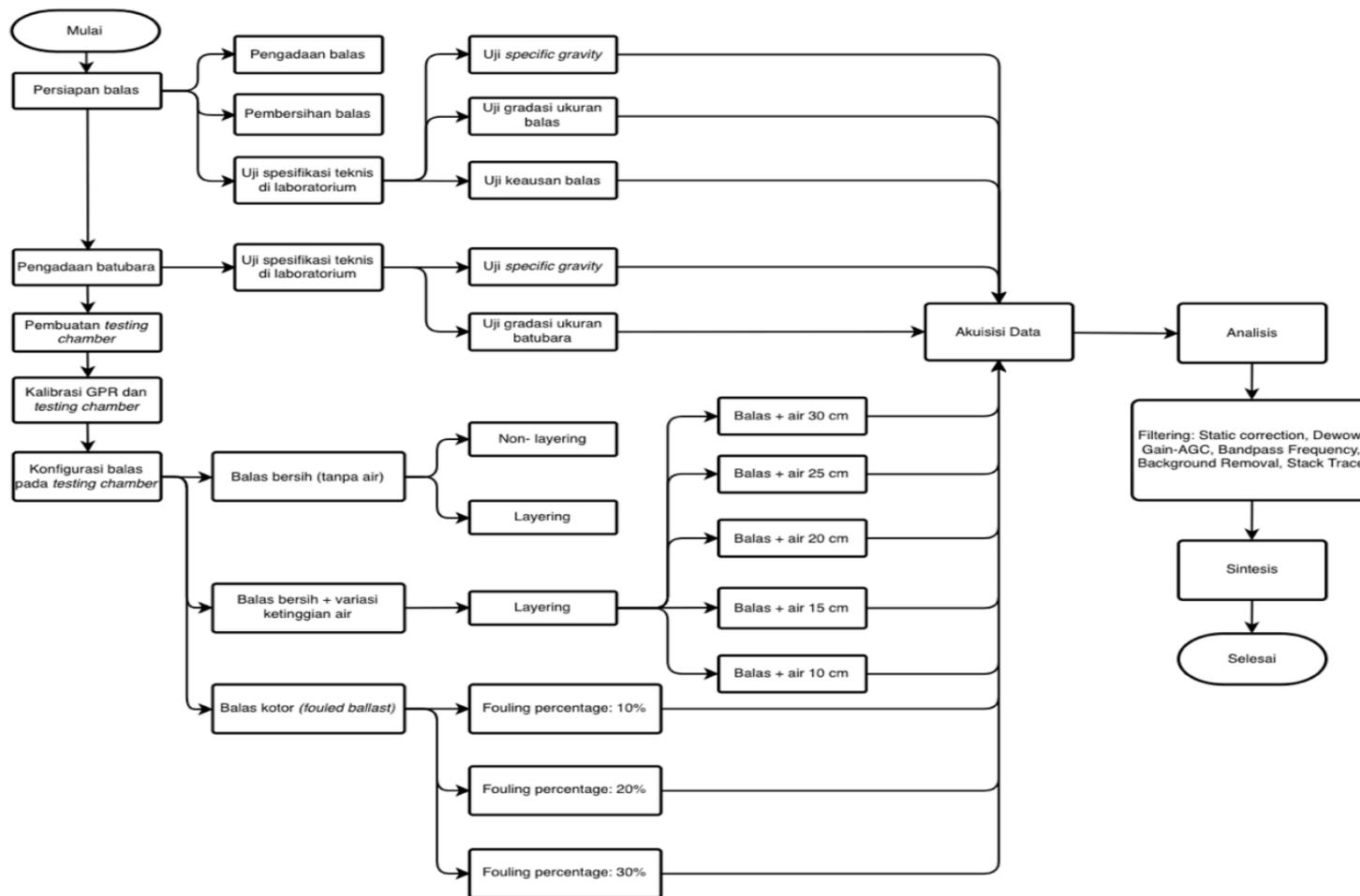
3.1 Persiapan Balas

Balas yang digunakan pada penelitian ini diambil pada *quarry* di Tarahan Kabupaten Lampung Selatan yang merupakan batuan andesit. Balas kemudian dibersihkan terlebih dahulu untuk mengurangi kandungan lumpur bawaan hasil dari proses *crushing* di *quarry*. Hal ini dilakukan untuk mengurangi gangguan partikel halus dari luar yang akan menjadi *noise* pada saat akuisisi data GPR, terutama pada kondisi balas bersih.

Balas yang telah dipilih harus melalui proses uji laboratorium untuk memenuhi persyaratan spesifikasi teknis balas sesuai dengan PM No. 60 Tahun 2012. Adapaun beberapa uji laboratorium yang dilakukan antara lain:

- Uji *specific gravity* (ASTM C-127-68)
- Uji distribusi ukuran partikel agregat (*sieve analysis*: ASTM E11)
- Uji keausan balas (*Los Angeles Test*: ASTM C-535-03)

Keseluruhan pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Inti Jalan Raya Fakultas Teknik Universitas Lampung.



Gambar 3. 1 Bagan alir penelitian

3.2 Pembuatan *Testing Chamber*

Parameter yang wajib menjadi pertimbangan dalam pembuatan *testing chamber* pada penelitian ini yaitu:

- Bahan untuk alat uji harus disesuaikan agar tidak menciptakan noise pada saat akuisisi data GPR
- Dimensi alat uji harus disesuaikan dengan kemampuan pembacaan GPR agar tidak menciptakan noise pada saat akuisisi data
- Alat uji harus mampu menampung beban agregat balas (~1500 kg) pada kondisi kering maupun saat terendam
- Alat GPR harus bisa berjalan secara stabil dan konsisten dalam kecepatan pada saat akuisisi data berlangsung.

3.3 Kalibrasi GPR dan *Testing Chamber*

Kalibrasi alat GPR dan *testing chamber* dilakukan utamanya untuk mengoreksi kedalaman bacaan mengingat kemampuan pembacaan GPR 1 GHz yaitu 2 dan sampel uji balas memiliki ketebalan 30 cm. Koreksi dilakukan untuk memperjelas wilayah bacaan akuisisi data sekaligus memeriksa apabila ada *noise* yang ikut terekam.

3.4 Konfigurasi Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan dengan beberapa kondisi pengujian yaitu:

- Balas bersih dengan dua kondisi sebagai berikut:
 - *Non-layering*
 - *Layering*
- Balas terendam air dengan variasi ketinggian sebagai berikut:
 - 30 cm (terendam jenuh)
 - 25 cm
 - 20 cm
 - 15 cm
 - 10 cm

Sebelum dilakukan pengujian dengan kondisi terendam air, balas direndam selama 24 jam untuk memastikan pori-pori agregat dalam kondisi jenuh.

- Balas kotor (*fouled ballast*) menggunakan material pengotor berupa batubara dengan ukuran partikel rata-rata 2,4 mm dan maksimal 4,0 mm. Pengujian dilakukan dengan 3 derajat pengotor (*fouling degree*) berbeda yaitu:
 - 10%
 - 20%
 - 30%

Parameter derajat pengotor yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada teori *Relative Ballast Fouling Ratio* yang digagas oleh Indraratna et al. (2011) seperti yang telah dijelaskan pada Persamaan 2.4. Mengacu pada literatur yang menyatakan persentase material pengotor (*fouling*), batubara merupakan salah satu material pengotor yang dapat mempengaruhi performa balas. Akan tetapi persentase tersebut berada pada jangkauan nilai yang cukup luas, secara utama bergantung pada jenis angkutan dominan kereta api dan kondisi alam di sekitar jalan rel (kecepatan angin, curah hujan, dll). Feldman dan Nissen (2002) menyebutkan bahwa rasio volume kontaminasi partikel batubara pada jalan rel di Queensland, Australia berkisar pada 70% - 95%. Sementara itu, Selig dan DelloRusso (1991) menyebutkan bahwa infiltrasi material pengotor yang berasal dari permukaan jalan rel (termasuk batubara) adalah 7%.

Di Indonesia, hingga tulisan ini dibuat, belum ada literatur yang bisa mendukung kedua *range* angka acuan. Pada penelitian ini digunakan asumsi bahwa sumber pengotor dari partikel batubara adalah sebesar 30%, sehingga didapatkan berat pengotor untuk pengujian pada setiap derajat pengotor (*fouling degree*) seperti pada Tabel 3.1.

Sampel batubara pada penelitian ini berjenis *low calorie* dan secara penuh disediakan oleh PT. Bukit Asam, Tbk (Pelabuhan Tarahan) selaku pengguna fasilitas kereta api babaranjang (batubara rangkaian panjang) lintas Tarahan-Tanjungenim.

Tabel 3. 1 Berat partikel batubara pada setiap derajat pengotor (*fouling degree*)

Persentase <i>fouling</i> batubara(%)	Berat partikel batubara (kg)
10	22,527
20	45,053
30	67,580

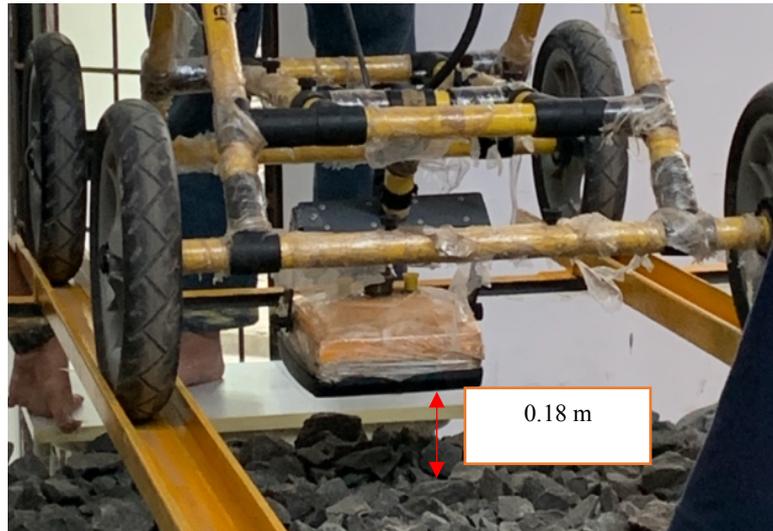
3.5 Akuisisi Data

Proses akuisisi data dilakukan di laboratorium Hidroteknik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung menggunakan alat GPR milik Jurusan Teknik Geofisika Fakultas Teknik Universitas Lampung. Alat GPR yang digunakan yaitu *Geoscanner Akula 9000C (ground-coupled antenna GCB 1000)* dengan frekuensi sentral 1 GHz seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.

Pembacaan dilakukan sebanyak minimal 3 kali pada setiap konfigurasi (lihat sub-bab 3.4) untuk memastikan kualitas akuisisi data. GPR berjalan di atas *detachable rails* sepanjang 1,35 m dengan kecepatan rata-rata 0,034 m/det. Setiap pembacaan memakan waktu kurang lebih 30 detik dengan jarak antenna terhadap permukaan atas balas sebesar 16 – 18 cm (jarak tidak absolut akibat permukaan balas yang tidak rata sempurna) seperti yang terlihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 4 GPR dengan antenna berfrekuensi 1 GHz



Gambar 3. 7 Proses akuisisi data menggunakan GPR

3.6 Pengolahan dan Analisis Data

3.6.1 Balas Bersih

Pengolahan data hasil akuisisi dilakukan dengan proses sebagai berikut.

a. *Static Correction*

Koreksi ini bertujuan untuk mengembalikan waktu tiba pertama gelombang pada pengolahan trace pada kontras pertama lapisan yang ditemukan (menempatkan posisi awal gelombang ke titik nol).

b. 1-D Filter – Dewow

Dewow adalah langkah proses yang dilakukan untuk menghilangkan frekuensi sangat rendah yang terekam dalam radargram. Dewow termasuk dalam *temporal filtering*. Wow adalah *noise* frekuensi rendah yang terekam oleh sistem radar. Terjadi akibat instrumen elektronik yang tersaturasi oleh nilai amplitude yang besar dari gelombang langsung dan gelombang udara.

c. 2-D Filter – *Background Removal*

Background removal dikenal juga dengan sebutan *background subtraction*. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan *noise* yang selalu muncul secara konsisten pada seluruh profil, sehingga menutupi sinyal

yang sebenarnya. Efek yang dilakukan proses ini adalah dengan menghilangkan energi koheren yang horizontal.

d. Analisis Domain Frekuensi

Analisis domain frekuensi dilakukan menggunakan transformasi Fourier dengan mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi (Franchetti dan Püschel, 2011). Analisis domain frekuensi dilakukan dengan tujuan mengidentifikasi perubahan spektrum pada masing-masing konfigurasi balas. Studi yang dilakukan oleh Wang et al. (2022) menunjukkan nilai spektrum yang lebih tinggi pada balas bersih dibandingkan balas kotor. Analisis domain frekuensi dilakukan berdasarkan persamaan berikut:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (3.1)$$

dimana,

ω : frekuensi

t : waktu

i : satuan imajiner

3.6.2 Balas Bersih Dengan Variasi Ketinggian Air dan Balas Kotor

a. *Static Correction*

Koreksi ini bertujuan untuk mengembalikan waktu tiba pertama gelombang pada pengolahan *trace* pada kontras pertama lapisan yang ditemukan (menempatkan posisi awal gelombang ke titik nol).

b. 1-D Filter – Dewow

Dewow adalah langkah proses yang dilakukan untuk menghilangkan frekuensi sangat rendah yang terekam dalam radargram. Dewow termasuk dalam *temporal filtering*. Wow adalah *noise* frekuensi rendah yang terekam oleh sistem radar. Terjadi akibat instrumen elektronik yang

tersaturasi oleh nilai amplitude yang besar dari gelombang langsung dan gelombang udara.

c. Gain – AGC

Koreksi berikutnya adalah AGC. Proses ini dilakukan karena sinyal radar sangat cepat teratenuasi ketika menjalar ke dalam permukaan objek pembacaan sehingga sinyal dari kedalaman yang lebih tinggi menjadi sangat lemah. Akibatnya untuk menampilkan informasi pada kedalaman ini sulit dilakukan.

d. 1-D Filter - *Bandpass Frequency*

Tujuan dari proses ini adalah untuk menghilangkan frekuensi-frekuensi yang tidak diinginkan (*noise*), dengan membatasi nilai jangkauan frekuensi sinyal pada radargram.

e. 2-D Filter – *Background Removal*

Background removal dikenal juga dengan sebutan *background subtraction*. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan *noise* yang selalu muncul secara konsisten pada seluruh profil, sehingga menutupi sinyal yang sebenarnya. Efek yang dilakukan proses ini adalah dengan menghilangkan energi koheren yang horizontal.

f. 2-D Filter - *Stack Trace*

Proses *stacking* ini dilakukan untuk meningkatkan *signal to noise ratio* (S/N). Asumsi yang digunakan adalah bahwa sinyal mempunyai fase yang sama sedangkan *noise* berfase acak. Pengumpulan *trace* diharapkan akan memperkuat amplitudo sinyal dan melemahkan amplitudo *noise*.

5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilaksanakan pengujian dalam konfigurasi berbeda, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Keberadaan fisik material pengotor dan tinggi hidrolis air dapat ditentukan dengan GPR 1 GHz melalui interpretasi amplitudo. Ketebalan material *fouling* yang teridentifikasi yaitu 8 cm pada derajat pengotor 10%, 16 cm pada derajat pengotor 20%, dan 23 cm pada derajat pengotor 30%.
2. Secara kualitatif, ada indikasi respon amplitudo yang khas (*signature response*) antara keberadaan tinggi hidrolis air dan material pengotor padat, dalam hal ini partikel batubara. Pada kondisi balas kotor, material pengotor dapat diindikasikan dari adanya *spike* (perkuatan sinyal), sementara keberadaan air (tinggi hidrolis) justru diindikasikan dari adanya atenuasi sinyal (pelemahan sinyal).
3. Secara kuantitatif, amplitudo yang dihasilkan oleh balas bersih berkisar antara 14 – 16, balas terendam air antara 6 – 8,5, dan balas kotor antara 3,5 – 6,5. Hal ini juga mengindikasikan bahwa material pengotor batubara halus memiliki kemampuan atenuasi (pelemahan) sinyal yang lebih kuat dibandingkan air. Analisis domain frekuensi yang dilakukan menggunakan Transformasi Fourier ini menunjukkan sinyal dominan dari karakter balas pada kondisi tertentu. Penentuan batas-batas kedalaman balas dan material pengisi (air dan pengotor batubara) dalam hal ini lebih jelas terlihat pada sifat amplitudo yang terlihat pada olahan data radargam (poin 2).
4. Eksperimen terhadap konduktivitas hidrolis balas belum bisa ditemukan karena faktor error dari *testing chamber* yang masih mengalami kebocoran dan belum bisa diatasi.
5. Hasil analisis estimasi gradien hidrolis berdasarkan persamaan Dupuit menunjukkan bahwa *faceline* dari parabola muka air lapisan balas adalah tetap.

5.2 Saran

Setelah ditarik kesimpulan, berikut beberapa saran yang dapat diberikan untuk kepentingan penelitian selanjutnya maupun kegiatan aplikasi metode ini di lapangan.

1. Apabila GPR 1 GHz masih akan digunakan untuk *monitoring* lapisan balas, analisis lanjutan dengan metode *Fourier Transform* ataupun *Short Time Fourier Transform* (STFT) sebaiknya dilaksanakan.
2. Penggunaan GPR dengan frekuensi yang lebih tinggi (misal 2 GHz) secara khusus lebih disarankan untuk *monitoring* lapisan balas.
3. Eksperimen permeabilitas dapat dilakukan untuk menentukan konduktivitas hidrolis secara lebih akurat dan memastikan hasil estimasi gradien hidrolis yang telah dilakukan.
4. Analisis gradien hidrolis berdasarkan *time variant* dapat dilakukan untuk membuktikan waktu pengosongan atau waktu aliran pada lapisan balas.
5. Analisis berbasis *image processing* sebaiknya dilakukan pada radargram untuk mempercepat proses deskripsi kondisi balas apabila dilakukan *scanning* di lapangan.

REFERENSI

Ahmadkhani, S. (2021). *“Investigation of Movement of Rain Water in Railway Track Ballast and Subballast Layers”*. PhD Thesis, University of Birmingham. Birmingham, UK.

Al-Qadi, I. L., Jones D. L., and Roberts, L. (2008). *“Development of a Time-Frequency Approach to Quantify Railroad Ballast Fouling Condition Using Ultra Wide Band Ground Penetrating Radar Data.”* Annual Meeting of The Transportation Research Board, Washington. D. C.

Al-Qadi, I. L., Xie, W., and Roberts, R. (2008). *“Scattering Analysis of Ground-Penetrating Radar Data to Quantify Railroad Ballast Contamination.”* Journal of Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 41, No. 6, pp. 441-447.

Bishop, A. W. (1966). *“The strength of soils as engineering materials.”* Geotechnique, Vol. 16, No.2, pp. 91-128.

Cedergren, H. (1977). *“Seepage, drainage, and flow nets.”* Wiley, New York.

Danquah, W., Ghataora, G., and Burrow, M. (2014). *“The effect of fouling on hydraulic conductivity of the rail track substructure.”* European Conference on Geotechnical Engineering. Vienna, Austria, pp. 225.

Diyaljee, V. A. (1987). *“Effects of stress history on ballast deformation.”* J. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 909-914.

El Naggar, H., Zahran, K., and Moussa, A. (2021). *“Effect of the Particle Size on the TDA Shear Strength and Stiffness Parameters in Large-Scale Direct Shear Test”*. Geotechnics 1(1), pp.1-17.

Feldman, F. and Nissen, D. (2002). “*Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination.*” In: Railway Engineering. Canberra, Australia: Railway Technical Society of Australia, pp. 101-109.

FHWA. (1980). “*Highway Subdrainage Design Manual.*” Washington D.C: Federal Highway Administration, Department of Transportation.

Franchetti, F. and Püschel, M. (2011). “*FFT (Fast Fourier Transform)*”. Encyclopedia of Parallel Computing. Springer: Boston.

Gupta, A. K. (2009). “*Effect of Particle Size and Confining Pressure on Breakage and Strength Parameters of Rockfill Materials*”. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 14, No. Bundle H: 12.

Guo, Y., Liu, G., Jing, G., Qu, J., Wang, S., and Qiang, W. (2022). “*Ballast fouling inspection and quantification with ground penetrating radar (GPR).*” International Journal of Rail Transportation, 11(8), pp. 1-18.

Han, X. and Selig, E. (1997). “*Effects of fouling on ballast settlement.*” 6th International Haul Conference. Int. Heavy Haul Association, SpoorNet Vol. 1, pp. 257-268.

Hardin, B. O. (1985). “*Crushing of soil particles.*” J. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, pp. 1177-1192.

Heyns, F. J. (1997). “*Drainage Systems for Railways Tracks.*” Geotechnical Report GTF98-453P, Amherst: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts.

Heyns, F. J. (2000). “*Railway track drainage design techniques.*” Ph.D Thesis, University of Massachusetts at Amherst, USA.

Indraratna, B. and Salim, W. (2002). “*Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy.*” Geotechnical Engineering, Proc. Institution of Civil Engineers, London, Vol. 155 (4), pp. 243-252.

Indraratna, B., Nimbalkar, S. S., and Tennakoon, N., (2010). “*The Behaviour of Ballasted Track Foundations: Track Drainage and Geosynthetic Reinforcement.*” Proc., GeoFlorida 2010 Conference on Advances in Analysis, Modeling, & Design, ASCE, Orlando, Florida, February 20-24, pp. 2378-2387.

Indraratna, B., Salim, W., and Rujikiatkamjorn, C., (2011). “*Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track.*” CRC Press/Balkema, pp. 2-7 and 81-87.

Indraratna, B., Su, L., and Rujikiatkamjorn, C. (2011). “*A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling.*” Canadian Geotechnical Journal, 48(2), pp. 322-326.

Jack, R. and Jackson, P. (1999). “*Imaging Attributes of Railway Track Formation and Ballast Using Ground Probing Radar.*” NDT & E International, Vol. 32, pp. 457-462.

Jeffs, T. and Marich, S., (1987). “*Ballast characteristics in the laboratory.*” Conference on Railway Engineering, Perth, pp. 141-147.

Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2022). “*Membangun jaringan transportasi KA luar Jawa.*” [Tersedia Online] pada: <https://portal.dephub.go.id/post/read/membangun-jaringan-transportasi-ka-luar-jawa> (diakses: 16 Februari 2023, 11:36)

Kutz, M. (2004). “*Handbook of transportation engineering.*” New York: Mc-Graw Hill.

Lackenby, J. (2006). *“Triaxial behavior of ballast and the role of confining pressure under cyclic loading.”* PhD Thesis, University of Wollongong. NSW, Australia.

Lackenby, J., Indraratna, B., McDowell, G. R., and Christie, D. (2007). *“Effect on confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading.”* Geotechnique 57, No. 6, pp. 527-536.

Liu, G., Peng, Z., Jing, G., Wang, S., Li, Y., and Guo, Y. (2022). *“Railway ballast layer inspection with different GPR antennas and frequencies”*. Transportation Geotechnics, 36(1-2):100823.

Marsal, R. J. (1967). *“Large scale testing of rockfill materials.”* J. of the Soil Mech. And Found. Div., ASCE, Vol. 93, No. SM2, pp. 27-43.

Muharomah, R. and Setiawan, B. I. (2022). *“Identification of Climate Trends and Patterns in South Sumatra”*. Agromet 36 (2), pp. 79-87.

Muir Wood, D. (1990). *“Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics.”* Cambridge University Press.

Mulke, F. (1981). *“Storm Water Drainage of Railway Tracks.”* D.Eng. Dissertation. Department of Civil Engineering, University of Pretoria, South Africa.

Narayanan, R. M., Kumke, C. J., and Li, D. (1999). *“Railroad Track Monitoring Using Ground Penetrating Radar: Simulation Study and Field Measurements.”* Proceedings of SPIE Conference on Subsurface Sensors and Applications, Vol. 3752, Denver, Colorado.

Neil, D. M. (1976). *“Railway Design Ballast and Subgrade.”* Residential Workshop on Materials and Methods for Low Cost Road, Rail and Reclamation Works, pp. 637-661.

Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012. (2012). "*Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*", Kementerian Perhubungan, Republik Indonesia.

Rahmani, H. and Panah, A, M. (2020). "*Influence of particle size on particle breakage and shear strength of weak rockfill.*" *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Roberts, R. I., Al-Qadi, I. L., Tutumluer, E., Boyle, J., and Sussmann, T. (2006). "*Advances in Railroad Ballast Evaluation Using 2-GHz Horn Antenna.*" 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, Columbus, Ohio.

Rushton, K. & Ghataora, G. (2009). "*Understanding and modelling drainage of railway ballast.*" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 162(4), pp. 227-236.

Selig, E. and DelloRusso, V. (1991). "*Sources and causes of ballast fouling.*" *Bulletin No. 731. American Railway Engineering Association*, Vol.92, pp. 145-457.

Selig, E. and Waters, J. M. (1994). "*Track Technology and Substructure Management.*" Thomas Telford, London.

Shangguan, P., Al-Qadi, I. L., and Leng, Z. (2012). "*Development of Wavelet Technique to Interpret Ground-Penetrating Radar Data for Quantifying Railroad Ballast Conditions.*" *Journal of the Transportation Research Board*, 2289(1), pp. 95-102.

Sun, L., Gu, C., and Wang, P. (2015). "*Effects of cyclic confining pressure on the deformation characteristics of natural soft clay.*" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (78), pp. 99-109.

Sun, Q. D., Indraratna, B., and Nimbalkar, S. (2016). "*Deformation and Degradation Mechanisms of Railway Ballast under High Frequency Cyclic*

Loading.” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 142 (1), 04015056, pp. 1-12.

Tennakoon, N. C. (2012). “*Geotechnical Study of Engineering Behaviour of Fouled Ballast.*” PhD Thesis , University of Wollongong. NSW, Australia.

Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948). “*Soil mechanics in engineering practice.*” John Wiley and Sons, Inc., New York.

Thom, N.H. and Brown, S.F. (1988). “*The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone.*” Proc. Of the 14th Australian Road Research Board Conference, Vol. 14, Part 7, pp. 94-100.

Wang, S., Liu, G., Jing, G., Feng, Q., Liu, H., and Guo, Y. (2022). “*State-of-the-Art Review of Ground Penetrating Radar (GPR) Applications for Railway Ballast Inspection*”. Sensors, 22(7), pp. 1-28.

Zhang, Y., Shao, J., Liu, Z., Shi, C., de Saxcé, G. (2019). “*Effects of confining pressure and loading path on deformation and strength of cohesive granular materials: a three-dimensional DEM analysis.*” Acta Geotechnica (14), pp. 443-460.