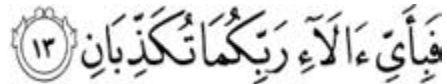




聖訓



“ *Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan*”  
(QS Ar Rahman)

Atas izin dan rahmat Allah SWT, monograf ini kupersembahkan kepada: *Allah SWT*, sebagai wujud pengabdian dan ibadah, serta bentuk kesyukuran penulis. Semoga Allah mengkaruniakan rahmat dan keberkahanNya menjadikan karya monograf ini sebagai ilmu yang bermanfaat dan amal jariyah. *Aamiin*

Ayah dan Ibuku tersayang,  
Almarhum Soeroso Sri Sedjati dan Almarhumah Suprastini  
Isteriku tercinta, *Rika Nuraini*  
dan anak-anakku tercinta,  
Naura Rucira Haya Pratista Aqila Rosyidi  
Mayassa Saffi Lalitya Nayaka Annora Rosyidi  
Abhipraya Arar Mecca Thariq Prasiddha Rosyidi

Para *ilmuan, praktisi* dan *insinyur* bidang Teknik Sipil. Semoga tulisan sederhana ini bisa memberikan manfaat bagi pengembangan bidang perkeretaapian di Indonesia.

MONOGRAF

**ANALISIS KEKAKUAN LAPISAN  
BALAS STRUKTUR JALAN REL  
PADA VARIASI KONDISI  
MATERIAL BERBASIS KUAT  
TEKAN DAN RESPON DEFLEKSI**

---

Undang-Undang Republik Indonesia nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

KETENTUAN PIDANA

Pasal 112

Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 7 ayat (3) dan/atau Pasal 52 untuk Penggunaan Secara Komersial, dipidana dengan pidana penjara paling lama 2 (dua) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp300.000.000,00 (tiga ratus juta rupiah).

*Sri Atmaja P. Rosyidi*

**ANALISIS KEKAKUAN  
LAPISAN BALAS  
STRUKTUR JALAN REL  
PADA VARIASI  
KONDISI MATERIAL  
BERBASIS KUAT  
TEKAN DAN RESPON  
DEFLEKSI**

MONOGRAF



**ANALISIS KEKAKUAN LAPISAN BALAS STRUKTUR JALAN  
REL PADA VARIASI KONDISI MATERIAL BERBASIS KUAT  
TEKAN DAN RESPON DEFLEKSI**

**SRI ATMAJA P. ROSYIDI**

Desain Sampul : Djoko Supriyanto

Desain Isi : Ngadimin Srowot

Cetakan pertama,  
UMY Press, September 2022

UMY Press  
Kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul DI Yogyakarta 55183  
Telp. 0274-387656  
Fax. 0274-387646  
WA: 085157715504

Email : [umypress@gmail.com](mailto:umypress@gmail.com)

instagram : UMY Press

shopee : umy press book

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia), APPTI (Asosiasi  
Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia), APPTIMA (Asosiasi  
Penerbit Perguruan Tinggi Muhammadiyah - 'Aisyiyah se-  
Indonesia)

Foto sampul depan: ANN RONAN PICTURES / Getty Images

Katalog dalam terbitan

**Analisis Kekakuan Lapisan Balas Struktur Jalan Rel Pada  
Variasi Kondisi Material Berbasis Kuat Tekan Dan Respon  
Defleksi**

Sri Atmaja P. Rosyidi

Yogyakarta, UMY Press 2022

(xiv + 71 hlm; 17 x 23cm)

# PRAKATA PENULIS

---

**A**lhamdulillah, puji syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan karunia dan hidayahNya, sehingga penulis telah diberikan anugerah yang tak terkira untuk bisa menyelesaikan naskah monograf ini yang diberikan judul: “ANALISIS KEKAKUAN LAPISAN BALAS STRUKTUR JALAN REL PADA VARIASI KONDISI MATERIAL BERBASIS KUAT TEKAN DAN RESPON DEFLEKSI”.

Buku monograf ini mengulas pendekatan empirik laboratorium dan pengukuran lapangan yang dilakukan untuk menganalisis dan menilai kekakuan material lapisan balas struktur jalan rel dengan berbagai kondisi yang berbeda. Kondisi balas yang berbeda menunjukkan berbagai variasi keadaan material lapisan balas, dari yang balas baik dan bersih hingga pada kondisi balas yang kotor dan buruk.

Monograf ini berasal dari penelitian yang mengambil topik rekayasa pengukuran badan jalan rel berupa lapisan balas dan tanah dasar dimana hingga saat ini, masih menjadi permasalahan utama dalam upaya pemeliharaan kinerja struktur jalan kereta api yang memenuhi persyaratan kelaikan dan kelayakan jalan. Permasalahan yang terjadi karena, pertama, belum adanya suatu pengujian yang efektif dapat digunakan untuk mendeteksi secara langsung kondisi lapisan balas terutama kondisi lapisan-lapisan balas kotor, kantong balas dan degradasi kekuatan tanah dasar karena penurunan daya dukungnya. Kedua, pengujian konvensional yang ada masih berbasis laboratorium, sehingga tidak dapat digunakan untuk menentukan nilai daya



dukung lapisan balas dan tanah dasar secara berkelanjutan disebabkan oleh luasnya jaringan jalan rel di Indonesia. Pengujian konvensional laboratorium memerlukan waktu yang relatif lama karena memerlukan pekerjaan pengambilan sampel dan mahal. Ketiga, adanya ketidakseimbangan antara ketersediaan dana dalam program pemeliharaan jalan rel dengan jumlah jaringan yang harus dievaluasi sehingga terjadi backlog pada penilaian dan pemeliharaan jalan rel yang berdampak kepada penurunan kualitas struktur jalan yang dapat mengancam keselamatan perjalanan kereta api. Dengan demikian, perlu dilakukan langkah inovatif untuk mengembangkan suatu teknik evaluasi struktur badan jalan rel yang inovatif, dan dapat menghasilkan produk pengukuran kinerja yang akurat dan sekaligus ekonomis; yang secara khusus digunakan untuk menilai kondisi dan daya dukung lapisan balas dan tanah dasar secara berkelanjutan.

Dalam penelitian ini, pendekatan pengujian dan evaluasi struktur jalan rel yang handal dan cepat yang mampu mengukur daya dukung struktur jalan rel khususnya pada lapisan fondasi menjadi vital dan signifikan untuk dikaji. Penelitian ini mengaplikasikan pendekatan defleksi sebagai metode tanpa merusak (*non-destructive testing*, NDT). Keunggulan penggunaan NDT ini adalah suatu pengujiannya tidak memberikan kerusakan terhadap struktur jalan rel dan dilakukan secara cepat, ekonomis dan tidak mengganggu pergerakan lalu lintas kereta api. Teknologi NDT memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut lagi supaya teknologi tersebut semakin inovatif, ekonomi dan mudah untuk diaplikasikan bagi monitoring kualitas pemeliharaan jalur kereta api di Indonesia.

Hasil penelitian yang dipublikasikan dalam monograf ini merupakan bagian dari penelitian yang telah direncanakan dalam Peta Jalan Pengembangan Teknologi Jalan Rel yang sejalan dengan Arah Riset Program Studi Teknik Sipil UMY 2010-2025 pada bidang *Transportation System and Engineering* dengan sub-bidang *Railway Engineering and Technology*. Studi yang ini menunjukkan pentingnya jalan rel yang merupakan prasarana penting dalam sistem perkeretaapian sehingga kualitas dan kinerjanya sangat menentukan kenyamanan dan keselamatan perjalanan kereta api.

Penulis menyampaikan penghargaan setinggi-tinggi kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan monograf ini secara khususnya, kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Indonesia melalui Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) Tahun 2019-2021, dan kepada berbagai pihak yang telah banyak memberikan ilmu dan diskusi ilmiah yang berbobot kepada penulis yaitu kepada yang saya hormati: Dr. Soerjanto Tjahjono (Ketua KNKT), Dr.Eng Imam Muthohar (Universitas Gadjah Mada), Bapak Chandrawan (Direktorat Jenderal Perkeretaapian, Kementerian Perhubungan). Penulis juga merekamkan penghargaan dan terima kasih kepada para asisten dan kolega penulis yang telah membantu penulis dalam berbagai penelitian ini.

Ucapan terima kasih secara khusus, penulis sampaikan kepada Prof. Diah Mutiarin, Budi Nugroho, SIP., Joko Supriyanto, S.Sn., Lembaga Riset dan Inovasi UMY, yang telah mendukung dan memperlancar penerbitan monograf ini serta membantu menyempurnakan layout dan editing buku ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada keluarga tercinta, Rika Nuraini, M.Eng.Env. dan anak-anak tercinta Haya, Naya dan Praya; yang dengan dukungan serta doanya mendampingi penulis hingga terselesaikannya monograf ini. Mengambil pepatah “Tiada Gading yang Tak Retak”, penulis menyadari buku ini masih banyak kekurangan dan ketidaksempurnaan. Untuk itu, penulis mengundang para peneliti dan pemerhati perkeretaapian di Indonesia untuk memberikan masukan dan diskusi terhadap monograf ini sehingga dapat diperbaiki kekurangan dan kelemahan monograf ini pada edisi selanjutnya.

Yogyakarta,  
1 September 2022

Sri Atmaja P. Rosyidi

# DAFTAR ISI

---

Prakata – vii

Daftar Isi – x

Daftar Tabel – xii

Daftar Gambar – xiii

BAB 1 PENDAHULUAN – 1

A. Latar Belakang Permasalahan – 1

B. Rumusan Masalah – 5

C. Tujuan Penelitian – 7

D. Urgensi Penelitian – 8

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA – 9

A. Struktur Jalan Rel – 9

B. Light Weight Deflectometer (LWD) – 16

1. PENENTUAN TEORITIS MODULUS ELASTIS – 17

2. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PENGUKURAN ELWD – 18

C. Parameter Kekakuan Material – 23

BAB 3 METODE PENELITIAN – 25

A. Tahapan Penelitian dan Pendekatan Studi – 25

B. Desain Eksperimen – 27

1. PERENCANAAN MATERIAL BALAS – 27

2. PEMBUATAN KOTAK UJI (BALLAST BOX) LABORATORIUM – 30

3. PEMBUATAN KOTAK UJI (BALLAST BOX) LAPANGAN – 32

C. Pengujian Kuat Tekan dengan Micro-computer Universal Testing Machine (UTM) – 36

D. Pengujian Lapangan Light Weight Deflectometer (LWD) – 40

E. Pengukuran Perbandingan dan Validasi – 42

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN – 43

A. Pengujian Sifat Fisik Agregat Balas di Laboratorium – 43

B. Pengujian Modulus Elastisitas di Laboratorium – 46

C. Pengujian Kekakuan di Lapangan dengan Light Wight Deflectometer (LWD) – 57

BAB 5 PENUTUP – 66

A. Kesimpulan – 66

DAFTAR PUSTAKA – 68

# DAFTAR TABEL

---

Tabel 2.1.	Hasil pengujian <i>LWD</i> dengan perbedaan tinggi jatuh, dan diameter pelat (Kavussi dkk. 2010) – 21
Tabel 2.2.	Hasil pengujian <i>LWD</i> pada tiap jenis perkerasan – 22
Tabel 3.1.	Persyaratan Gradasi untuk Material Balas (Rosyidi, 2016) – 27
Tabel 4.1.	Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar – 43
Tabel 4.2.	Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar – 44
Tabel 4.3.	Kadar Lumpur Agregat Kasar – 44
Tabel 4.4.	Keausan Agregat Kasar – 44
Tabel 4.5.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik – 46
Tabel 4.6.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terendam Air – 48
Tabel 4.7.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terinfiltrasi Tanah – 49
Tabel 4.8.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terinfiltrasi Campuran Air dan Tanah – 50
Tabel 4.9.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Terendam Air – 52
Tabel 4.10.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Tanah – 53
Tabel 4.11.	Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Tercampur Air dan Tanah (Lumpur) – 54

# DAFTAR GAMBAR

---

- Gambar 11. Penurunan dan Penggerusan Balas di Perlintasan Sebidang dan di Lintas – 4
- Gambar 3.1. Bagan alir pendekatan kajian dan metodologi penelitian – 26
- Gambar 3.2. Desain Ballast Box untuk Pengujian Kuat Tekan Balas – 31
- Gambar 3.3. Hasil Ballast Box – 31
- Gambar 3.4. Komponen alat uji berupa penumbuk dan plat baja penahan untuk pendistribusian beban – 32
- Gambar 3.5. Desain Ballast Box Lapangan dari Beton – 33
- Gambar 3.6. Pembuatan Ballast Box: Pembersihan Lokasi – 34
- Gambar 3.7. Pembuatan Ballast Box: Pemasangan Tulangan Pelat – 34
- Gambar 3.8. Pembuatan Ballast Box: Pengecoran Ballast Box – 35
- Gambar 3.9. Kondisi Ballast Box Lapangan – 35
- Gambar 3.10. Skematik Diagram antara Tegangan – Regangan – 37
- Gambar 3.11. Micro-computer Universal Testing Machine (UTM) – 38
- Gambar 3.12. Pelaksanaan Pengujian Tekan Balas dengan alat Universal Testing Machine (UTM) Hung Ta – 38
- Gambar 3.13. Bagian-bagian dalam alat *LWD* – 40
- Gambar 4.1. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik – 47
- Gambar 4.2. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terendam Air – 48
- Gambar 4.3. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terinfiltrasi oleh Tanah – 50
- Gambar 4.4. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terinfiltrasi oleh Campuran Air dan Tanah (Lumpur) – 51
- Gambar 4.5. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terendam oleh Air – 52
- Gambar 4.6. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Tanah – 53
- Gambar 4.7. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Air dan Tanah (Lumpur) – 55

- Gambar 4.8. Nilai modulus elastisitas rata-rata dari berbagai kondisi lapisan balas dari hasil uji kuat tekan – 56
- Gambar 4.9. Nilai deformasi permanen rata-rata dari berbagai kondisi lapisan balas dari hasil uji kuat tekan – 57
- Gambar 4.10. Dokumentasi Pengujian LWD pada Ballast Box – 58
- Gambar 4.12. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Baik – 59
- Gambar 4.13. Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWD untuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Baik – 60
- Gambar 4.14. Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi Balas Baik – 61
- Gambar 4.15. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Buruk dan Terendam Air – 62
- Gambar 4.16. Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWD untuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Buruk Terendam Air – 62
- Gambar 4.17. Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi
- Gambar 4.18. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Buruk dan Terinfiltrasi Tanah – 64
- Gambar 4.19. Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWD untuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Buruk Terinfiltrasi Tanah – 64
- Gambar 4.20. Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi Buruk yang Terinfiltrasi Tanah – 65 Buruk yang Terendam Air – 63

## **BAB 1**

# PENDAHULUAN

### **A. Latar Belakang Permasalahan**

Dari berbagai macam jenis moda transportasi darat, terdapat salah satu moda transportasi yang sangat menguntungkan bagi masyarakat Indonesia pada masa ini, dengan semakin bertambahnya jumlah pengguna transportasi jalan raya mengakibatkan peningkatan biaya pemeliharaan infrastruktur jalan yang juga diikuti dengan permasalahan lalu lintas seperti tundaan, kemacetan, depresiasi pelayanan jalan, bahkan semakin tingginya angka kecelakaan dan kerusakan lingkungan. World Bank pada tahun 2000 menyampaikan indikator kinerja infrastruktur transportasi jalan tol, jalan rel, pelabuhan dan bandar udara berkaitan dengan regulasi kerjasama pemerintah dan swasta yang menunjukkan bahwa perkembangan infrastruktur transportasi masih terbatas di Pulau Jawa dan sebagian Pulau Sumatera dan masih dalam kondisi yang sangat kurang (Estache dan Gines de Rus, 2000). Disisi lain, semakin bertambahnya tingkat sosial ekonomi masyarakat juga memicu pertumbuhan pergerakan yang selanjutnya memiliki dampak langsung terhadap peningkatan jumlah pengguna transportasi darat. Untuk itu, kebutuhan akan sistem transportasi darat yang handal, yang mampu mengurangi biaya pemeliharaan, dapat mengatasi permasalahan lalu lintas serta dapat memberikan dampak besar pada proses pengembangan wilayah dan peningkatan perekonomian masyarakat menjadi sangat penting dan signifikan untuk dikembangkan.

Pemerintah dalam hal ini, Presiden Joko Widodo telah mengamanatkan di dalam Program Nawacita bahwa pembangunan infrastruktur transportasi



menjadi salah satu fokus utama pemerintah Indonesia dalam upaya mendukung dan meningkatkan perekonomian bangsa. Sektor transportasi merupakan sektor yang memberikan dukungan terhadap hampir semua sektor lainnya, sehingga sektor ini menjadi sangat penting bagi kegiatan ekonomi masyarakat. Di lain pihak, sektor transportasi juga merupakan sektor yang mengkonsumsi bahan bakar minyak (BBM) sangat besar dan secara signifikan memberikan kontribusi terhadap pencemaran udara di kota-kota besar (RIPNas 2010-2030). Kementerian Perhubungan dalam menyikapi kondisi ini, mengungkapkan bahwa saat ini dan ke depan, pembangunan transportasi akan lebih diarahkan pada pengembangan moda-moda transportasi masal dan ramah lingkungan, dalam hal ini adalah pengembangan jalur kereta api.

Sektor transportasi merupakan sector dengan emisi gas buang CO<sub>2</sub> terbesar (27%) setelah sektor energi, sedangkan moda transportasi kereta api merupakan moda transportasi yang sangat rendah emisi gas buang CO<sub>2</sub> dibandingkan dengan moda darat, laut dan udara yaitu hanya sekitar 1.6% (RIPNAS 2010-2030). Selain itu, kereta api juga merupakan alat transportasi yang mampu mengangkut penumpang dan barang dalam berat dan jumlah yang besar. Dengan demikian, sistem perkeretaapian nasional yang saling terhubung akan berperan penting dalam mengantisipasi pertumbuhan permintaan transportasi, meningkatkan keterhubungan antar simpul transportasi, mendukung keterhubungan wilayah, menurunkan biaya pemeliharaan jalan raya, mengurangi kemacetan lalu lintas dan polusi udara, serta mendukung percepatan pertumbuhan ekonomi Indonesia di masa depan. Lanjut lagi, perkembangan kereta api ke depan memiliki prospek yang cerah sebagai upaya untuk mendukung program percepatan daerah dan perluasan pembangunan ekonomi Indonesia.

Seperti yang telah dituangkan di dalam Rencana Induk Perkeretaapian Indonesia (RIPNAS 2010-2030), dalam upaya untuk mendukung pertumbuhan ekonomi nasional, maka visi perkeretaapian nasional tahun 2030 ialah mewujudkan perkeretaapian yang berdaya saing, berintegrasi,

berteknologi, bersinergi dengan industri, terjangkau dan mampu menjawab tantangan perkembangan. Untuk mewujudkan visi penyelenggaraan perkeretaapian nasional tersebut, maka pengembangan perkeretaapian nasional diarahkan untuk mewujudkan penyelenggaraan perkeretaapian nasional yang mandiri dan berdaya saing dengan dukungan sumber daya manusia (SDM) perkeretaapian yang unggul dan industri yang tangguh, mewujudkan perkeretaapian yang berteknologi modern, berdaya angkut besar, berkecepatan tinggi dan ramah lingkungan, serta mewujudkan pelayanan prasarana dan sarana perkeretaapian yang handal.

Lebih jauh lagi, dengan pertumbuhan intensitas lalu lintas kereta api, maka menjadi semakin sulit melakukan pekerjaan pemeliharaan dan perbaikan. Di negara-negara maju Eropa, salah satunya adalah peraturan operasional kereta api di Belanda, ketersediaan waktu untuk pemeliharaan jalan rel pada malam hari seringkali disyaratkan tidak lebih dari 5 jam, dan pada jalur kereta api kecepatan tinggi, seperti di Korea (sepanjang 435 km dari Seoul ke Pusan), ketersediaan waktu efektif maksimum untuk pekerjaan pemeliharaan diperkirakan tidak lebih dari 1,5 jam per malam. Dalam hal ini, peningkatan popularitas desain jalan rel yang membutuhkan tingkat pemeliharaan yang lebih rendah saat ini tidaklah mengejutkan. Di masa lalu, proyek baru utamanya dinilai berdasarkan biaya investasi, sedangkan saat ini prinsip biaya yang dibutuhkan dalam satu siklus hidup sangat dipertimbangkan. Sebagai hasil dari pandangan baru ini, maka konsep jalan rel konvensional akan kehilangan daya tarik yang akhirnya mendukung perkembangan sistem jalan rel non-konvensional (Esveld, 2003).

Namun, saat ini seluruh jaringan kereta api Indonesia yang ada masih menggunakan sistem jalur konvensional. Lintasan tersebut mencakup sekitar 4.675 kilometer, diantaranya 3.362 kilometer (72%) berada di Pulau Jawa dan 1.313 kilometer (28%) berada di Pulau Sumatera. Menurut Kementerian Perhubungan Indonesia, sekitar 30% jalur kereta api dibangun dengan jari-jari lengkung yang kecil (300-500 m). Terdapat banyak isu seputar kinerja

infrastruktur jalur kereta api di Indonesia. Pada infrastruktur seperti lengkung dengan jari-jari kecil, dapat menghasilkan gaya lintasan yang besar sehingga menyebabkan terjadinya deformasi balas yang lebih tinggi dan menimbulkan ketidakseragaman geometri jalan rel (misalignments). Selain itu sering kali dijumpai jalan rel yang mengalami kekurangan lapisan balas di lintas dan transisi (perlintasan sebidang dan jembatan) akibat amblesan dan tergerus air hujan (Gambar 1.1). Terbentuknya kantung balas juga merupakan isu penting yang rawan terjadi pada struktur jalan rel (Yahya, 2012). Hasil akhir yang terjadi adalah meningkatnya penurunan balas, yang menyebabkan tidak hanya perlunya pembatasan kecepatan operasi kereta api yang berdampak pada waktu perjalanan yang lebih lama, namun juga peningkatan pekerjaan pemeliharaan jalan rel untuk memastikan kenyamanan dan keamanan operasi kereta api. Pemeliharaan jalan rel menghabiskan anggaran yang sangat besar, rumit untuk diatur dan memiliki banyak tantangan terkait koordinasi dengan operasi lalu lintas kereta api (Lidén, 2015). Pemeriksaan kondisi balas juga membutuhkan pengetahuan dan peralatan khusus, yang tergabung dalam indeks kualitas jalan rel (*Track Quality Index*) dan dapat dilakukan dengan berbagai metode (Berawi, et al. 2010; Liu, et al. 2015; Sadeghi and Askarinejad, 2012).



Gambar 1. 1 Penurunan dan Penggerusan Balas di Perlintasan Sebidang dan di Lintas

## B. Rumusan Masalah

Dalam Program *Roadmap to Zero Accident*, pemerintah memusatkan perhatian pada penyediaan prasarana perkeretaapian yang erat kaitannya dengan kondisi konstruksi jalan rel dari proses desain, pembangunan, pemeliharaan dan evaluasinya. Guna mencapai kinerja pelayanan yang maksimal dari suatu struktur jalan rel maka jalan rel perlu memenuhi kriteria pelayanan [1], antara lain: (1) Kekakuan, (2) Elastisitas, (3) Ketahanan terhadap deformasi tetap, (4) Stabilitas dan (5) Kemudahan untuk pengaturan dan pemeliharaan. Pada perkembangannya, pasca konstruksi jalan rel, kinerja dan kemampuan struktur jalan rel untuk menerima beban kereta api akan menurun. Penyebab utamanya adalah keausan dan kerusakan struktur, ketidaksesuaian spesifikasi material, pembebanan berulang, kualitas material balas yang rendah, ketebalan balas yang kurang, kondisi tanah dasar yang buruk, kondisi drainasi yang tidak berfungsi, muka air dangkal dan frekuensi perawatan balas yang kurang. Kondisi ini menyebabkan struktur jalan rel berisiko apabila dilalui kereta dengan kecepatan tinggi. Beberapa disfungsi balas yang dapat mengurangi kestabilan struktur adalah berkurangnya kemampuan balas sebagai lapisan fondasi jalan akibat infiltrasi material tanah. Infiltrasi material tanah akan mengurangi modulus (kekakuan) jalan rel yang berakibat berkurangnya kemampuan balas untuk mendukung beban. Apabila kondisi balas kotor tidak dapat dideteksi dari awal, akan berpengaruh pada kestabilan geometrik yang dapat mengakibatkan kereta anjlok (*derailment*), bahkan dapat menyebabkan kegagalan struktur. Dengan demikian, proses pemeliharaan struktur jalan rel perlu dilakukan secara periodik untuk identifikasi awal kerusakan dan kegagalan. Pemeliharaan perlu menjadi prioritas kegiatan sebagai tindakan preventif mencegah kecelakaan kereta api dan meningkatkan keselamatan.

Disebabkan oleh luasnya jalur kereta api yang perlu dipelihara, suatu evaluasi struktur jalan rel yang handal dan cepat yang mampu mengukur daya dukung khususnya pada lapisan fondasi menjadi signifikan untuk dipersiapkan. Salah satu metode tanpa merusak (*non-destructive testing*, NDT) yang memiliki

keunggulan sebagai pengujian yang tidak memberikan kerusakan terhadap struktur dan dilakukan secara cepat, ekonomis serta tidak mengganggu pergerakan perjalanan kereta api. Teknologi NDT memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut supaya teknologi menjadi semakin inovatif untuk diaplikasikan bagi monitoring kualitas pemeliharaan jalur kereta api di Indonesia.

Indonesia masih menjalankan kereta dengan kecepatan maksimal hanya 100 Km / jam, dan dalam kondisi ekstrim, seperti jalur kereta api di atas tanah lunak dan daerah perbukitan dengan lengkung berjari-jari kecil (300-500 m) dan peninggian rel maksimum (110 mm), kecepatan operasi kereta api hanya berkisar antara 30-40 km / jam karena tingginya risiko penggelinciran (anjlok) dan bencana kegagalan jalur. Sehingga tidak dapat dielakkan, ketika kereta api berjalan pada kecepatan rendah, maka frekuensi akan menjadi berkurang, dan berisiko pada tingkat pelayanan yang dijanjikan kepada pengguna jasa.

Namun, ke depan, otoritas perkeretaapian Indonesia mendorong pembangunan kereta api berkecepatan medium atau dikenal dengan istilah *Medium-Speed Railway* (kecepatan operasional 150-200 km/jam) yang menghubungkan Jakarta dan Surabaya. Selanjutnya, kecepatan operasional yang aman pada koridor reguler yang sudah ada diharapkan dapat meningkat dari semula hanya 70-90 km/jam menjadi 110-130 km/jam.

Diperkirakan bahwa jalur kereta api konvensional yang akan digunakan oleh kereta api kecepatan sedang mungkin tidak dapat secara memadai mempertahankan geometri jalur pada kecepatan 150-200 km/jam yang diusulkan. Ketidakstabilan timbunan, terutama di atas tanah yang lunak, akan menimbulkan masalah yang signifikan selama konstruksi dan operasional berlangsung. Sekitar 75% dari total rute akan dibangun di atas timbunan. Kecepatan setinggi yang direncanakan tersebut dapat menyebabkan kerusakan

jalan rel, balas, dan sub-balas yang cepat, termasuk kemungkinan penggelinciran dan kegagalan tanah.

Selain itu, juga diperkirakan bahwa peningkatan kecepatan operasional pada koridor reguler yang diajukan oleh otoritas perkeretaapian Indonesia akan menciptakan efek kecepatan kritis dan masalah yang signifikan terkait ketidakstabilan jalur. Kereta berkecepatan tinggi yang berjalan akan menciptakan masalah jalan rel yang dapat mengancam stabilitas dan keamanan kereta api.

Namun, peningkatan kekakuan tanah dasar yang besar dan jalan rel yang diletakkan pada jalan rel beton (*slab track*) akan menjadi lebih mahal dan lebih bising daripada jalan rel konvensional. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan untuk mencapai sebuah inovasi yang lebih efisien untuk dapat mempertahankan konstruksi eksisting. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi untuk menilai kekakuan dan kekuatan lapisan balas sebagai konstruksi jalan rel eksisting dalam menahan beban kereta api yang bekerja di atasnya.

### **C. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekakuan material lapisan balas jalan rel dengan berbagai kondisi lapisan balas, dari kualitas balas baik (bersih) hingga balas buruk (kotor). Pendekatan analisis dalam penelitian ini dilakukan secara empiris dengan pengukuran laboratorium menggunakan pengujian kuat tekan material dan lapangan berbasis pengujian tidak merusak atau NDT - *non destructive testing*, berbasis defleksi guna menentukan daya dukungnya. Tujuan khusus penelitian ini dijelaskan secara terperinci sebagai berikut:

- 1) Menganalisis kekakuan (modulus) lapisan balas struktur jalan rel dengan berbagai kondisi materialnya,
- 2) Membangun model empirik kekakuan balas berdasarkan metode defleksi lapangan,

- 3) Mengusulkan teknik pengukuran lapangan untuk kekakuan balas jalan rel.

#### **D. Urgensi Penelitian**

Jaringan jalan kereta api yang semakin luas memerlukan proses monitoring evaluasi struktur jalan untuk meningkatkan keselamatan perjalanan kereta api. Untuk itu, upaya terobosan untuk mengembangkan sistem pengujian yang inovatif dan akurat menjadi kebutuhan evaluasi konstruksi yang prioritas. Penelitian yang ini merupakan upaya pengembangan teknologi inovatif untuk evaluasi struktur jalan rel di Indonesia. Teknik NDT defleksi memiliki berpotensi untuk dikembangkan dengan pertimbangan instrumen pengujian yang relatif lebih sederhana dan akurat. Dari penelitian ini diharapkan akan menghasilkan sistem baru yang dapat diterapkan oleh Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan.

Adapun urgensi dari penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi usulan teknologi dan pendekatan pengukuran lapangan untuk pemeliharaan jalur kereta api di Indonesia yang hemat biaya dan efisien, baik di tingkat pembuat kebijakan maupun pemilik infrastruktur di Kementerian Perhubungan, dan tingkat operator kereta api di PT. Kereta Api Indonesia (PT KAI).
2. Hasil dari kajian ini juga diharapkan dapat menjadi acuan oleh direktorat teknis di Kementerian Perhubungan dan PT KAI untuk melakukan pengukuran kekuatan kondisi jalan rel di lapangan.
3. Penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai masukan dalam pedoman teknis dalam perencanaan pembangunan dan kebijakan strategis untuk kegiatan pemeliharaan dan peningkatan struktur jalan rel tipe konvensional.

## **BAB 2**

# TINJAUAN PUSTAKA

### **A. Struktur Jalan Rel**

Struktur jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api. Berdasarkan UU No.13 Tahun 1992 yang tertuang dalam Bab I Pasal 1 ayat 7, prasarana kereta api adalah jalur dan stasiun kereta api termasuk fasilitas yang diperlukan agar sarana kereta api dapat dioperasikan. Fasilitas penunjang kereta api diartikan sebagai kelengkapan penyelenggaraan angkutan kereta api guna memudahkan operasional dan meningkatkan kenyamanan angkutan kereta api. Prasarana kereta api sendiri lebih terperinci dapat digolongkan sebagai:

- a. Jalur atau jalan rel,
- b. Bangunan stasiun,
- c. Jembatan,
- d. Sinyal dan telekomunikasi.

Selain diatur dalam peraturan perundang-undangan, persyaratan teknis jalur kereta api dalam Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012, mengenai persyaratan jalur kereta api untuk lebar jalan rel 1067 mm dan 1435 mm. Dalam peraturan tersebut juga mengatur persyaratan sistem dan persyaratan komponen dalam prasarana kereta api. Persyaratan sistem merupakan kondisi yang harus dipenuhi untuk berfungsinya suatu sistem, sedangkan persyaratan komponen merupakan spesifikasi teknis yang harus



dipenuhi setiap komponen sebagai bagian dari suatu sistem yang meliputi jalan rel, jembatan dan terowongan.

Konsep pembangunan struktur jalan rel adalah rangkaian super-struktur dan sub-struktur yang menjadi satu kesatuan komponen yang mampu mendukung pergerakan kereta api secara aman. Karena menopang pergerakan kereta api, maka struktur jalan rel merupakan sistem dinamik antar komponen penyusunnya yang dapat mendistribusikan beban rangkaian kereta api dan sekaligus menyediakan pergerakan yang stabil dan nyaman. Dengan demikian, konsep akhir dari distribusi beban ini adalah menyalurkan tegangan dari beban kereta api kepada tanah dasar tanpa menimbulkan perubahan bentuk permanen pada tanah.

Selain konstruksi jalan rel harus stabil dan secara teknis dapat mendistribusikan beban dengan baik, jalan rel juga perlu dirancang dan direncanakan supaya ekonomis dalam pelaksanaan konstruksinya dan mudah untuk dilakukan pemeliharaan. Perencanaan konstruksi jalur kereta api sesuai dengan Peraturan Menteri Perhubungan No. PM. 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, bahwa jalan rel harus direncanakan sesuai persyaratan teknis sehingga dapat dipertanggung jawabkan secara teknis dan ekonomis. Secara teknis diartikan konstruksi jalur kereta api tersebut harus aman dilalui oleh sarana perkeretaapian dengan tingkat kenyamanan tertentu selama umur konstruksinya. Dan secara ekonomis, jalan rel diharapkan agar dapat dibangun dan dipelihara dengan biaya yang sekecil mungkin dengan output yang dihasilkan kualitas terbaik dan tetap menjamin keamanan dan kenyamanan.

Dalam perencanaan konstruksi jalur kereta api, parameter desain berupa jumlah beban, kecepatan maksimum, beban gandar dan pola operasi merupakan faktor utama yang mempengaruhi hasil akhir perencanaan. Mempertimbangkan parameter desain di atas, klasifikasi jalur kereta api dalam peraturan teknis menjadi referensi utama dalam perencanaan struktur jalan rel

supaya perencanaan dapat menghasilkan hasil desain yang tepat standar dan optimal. Dalam klasifikasinya juga, tipe konstruksi jalan rel dapat dibagi dalam dua bentuk konstruksi, yaitu:

- a. Jalan rel dalam konstruksi timbunan,
- b. Jalan rel dalam konstruksi galian.

Jalan rel dalam konstruksi timbunan biasanya terdapat pada daerah (medan) yang cenderung datar, sedangkan jalan rel pada konstruksi galian umumnya terdapat pada medan perunungan.

Jalur kereta api konvensional yang dibangun di atas lapisan fondasi adalah bentuk yang paling umum digunakan dalam transportasi kereta api karena jenis jalan rel ini memberikan serangkaian manfaat yang terkait dengan kecepatan dan biaya konstruksi. Untuk mendukung pembebanan yang baik, jalan rel perlu disusun dengan lapisan fondasi yang kaku dan stabil namun memiliki sifat elastik, yang dikenali sebagai lapisan balas yang dihamparkan di atas tanah dasar. Dengan lapisan fondasi yang baik, deretan bantalan disusun atas lapisan balas sebagai landasan bagi balok-balok baja yang disebut sebagai rel. Rel dalam pemasangannya akan diikatkan secara elastik dengan bantalan menggunakan penambat.

Lapisan balas terdiri dari bahan granular yang mendukung bantalan jalur kereta api dan fungsi utamanya adalah pengurangan beban dan getaran yang ditransmisikan ke lapisan bawah, memiliki fungsi drainase air dan mempunyai ketahanan terhadap gaya lateral dan longitudinal. Namun, rangkaian kereta api yang lewat menyebabkan degradasi kekuatan balas, yang dapat memicu perubahan dalam kekakuan vertikal jalur kereta api, dan penurunan diferensial jalur yang dapat terjadi karena dipengaruhi oleh distribusi beban dari struktur bantalan sebagai komponen yang paling berpengaruh pada deformasi vertikal jalur. Dengan demikian, degradasi balas memerlukan pekerjaan pemeliharaan

seperti tamping atau *stone blowing* ketika parameter geometrik mencapai nilai kritis, untuk memulihkan kualitas geometri lintasan.

Selama operasi kereta api, kondisi balas yang kotor dapat terjadi karena kerusakan lapisan balas, infiltrasi bahan lain dari permukaan jalan rel atau dari tanah dasar di bawah lapisan balas dengan mengisi rongganya. Pengotoran besar atau dikenal sebagai *ballast fouling* sebagian besar berasal dari kerusakan balas (kotoran balas yang dihasilkan dari pecahan batu balas atau balas halus), dan terkontaminasi oleh debu atau kotoran dari kereta api yang membawa logistik tambang misalnya batubara dan intrusi tanah dari dasar balas. Lapisan balas yang rusak dapat menyebabkan permasalahan sebagai berikut.

1. Pengurangan gaya vertikal (termasuk gaya angkat), lateral dan longitudinal yang diterapkan pada bantalan untuk mempertahankan lintasan pada posisi yang diperlukan.
2. Penurunan modulus/kekuatan dan kapasitas lapisan fondasi.
3. Pengurangan ruang rongga sehingga menyebabkan penurunan yang besar.
4. Drainase air yang buruk.
5. Pertumbuhan vegetasi di rel kereta api.
6. Peningkatan tingkat kebisingan.
7. Menurunkan resistansi listrik antar rel.

Oleh karena itu, diperlukan evaluasi pada jalur kereta api untuk menentukan tingkat pengotoran dan penurunan kekuatan lapisan balas untuk memastikan siklus perawatan yang optimal untuk meningkatkan stabilitas lintasan. Dengan tujuan untuk meningkatkan masa pelayanan jalan rel konvensional, berbagai solusi praktis telah dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir. Teknik yang paling banyak digunakan adalah pemasangan lapisan peredam (landasan) di bawah bantalan, lapisan karet (*mats*) di bawah bantalan dan juga geogrid. Dua solusi pertama utamanya untuk mengurangi degradasi bantalan karena landasan karet (*pads*) di bawah bantalan memungkinkan pengurangan tegangan yang ditransmisikan ke lapisan granular, sementara lapisan karet

dapat melayani kontak permukaan yang lebih besar pada struktur bawah kaku seperti terowongan atau jembatan (Sol-Sánchez et.al, 2015).

Selain itu, komponen elastis ini efisien untuk mendapatkan kekakuan vertikal yang optimal dari jalur kereta api dan menyerap banyak beban dan getaran. Di sisi lain, Walls dan Galbreath (1987) menemukan bahwa penggunaan perkuatan geogrid pada bantalan dapat meningkatkan periode antara pekerjaan pemeliharaan karena mengurangi penurunan deformasi vertikal dan lateral lapisan balas. Dengan demikian, efek dari geogrid telah banyak dipelajari (Indraratna et.al, 2006; Brown et.al, 2007; dan Indraratna et.al, 2013) dan telah berhasil diterapkan dalam balas jalur kereta api (Selig, 1994; Indraratna, 2010). Solusi teknis yang inovatif juga telah dikembangkan dengan menggunakan polimer sebagai elemen elastis antara partikel balas dengan tujuan yang sama untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan balas. Beberapa penulis diantaranya Keene et.al (2012), Kennedy et al (2013) telah menganalisis pengaruh pengisian rongga antara partikel balas dengan ikatan poliuretan. Penelitian tersebut telah menyimpulkan bahwa penggunaan poliuretan dapat meningkatkan elastisitas dan ketahanan terhadap deformasi plastik pada lapisan balas. Pada cara yang sama, peneliti lain telah memfokuskan studi mereka untuk menggunakan karet remah sebagai material pengubah perilaku balas, karena bahannya berasal ban bekas yang telah terbukti sesuai untuk pembuatan elemen elastis untuk rel kereta api (Sol-Sánchez et.al, 2014). Salah satu solusi ini disebut "*Resilient Bound Ballast*", yang merupakan campuran dari kerikil balas standar dan agregat ban bekas (Ho et.al, 2013).

Selain inovasi dan solusi untuk peningkatan material lapisan balas, permasalahan mendasar lainnya adalah penggunaan teknologi yang efektif dalam melakukan pengukuran dan penilaian dalam evaluasi kekuatan dan kekakuan lapisan fondasi jalan rel. Al-Qadi et al. (2006) menggunakan teknologi citra dengan alat *Ground Penetrating Radar* (GPR) untuk menilai tingkat kerusakan dan kotoran balas. Studinya dilakukan dengan

menggunakan antena dengan frekuensi tengah (MHz) untuk memetakan lapisan balas dengan menemukan refleksi dari antarmuka lapisan. Dalam beberapa kasus, ditemukan dengan jelas, batas pencitraan yang jelas antara lapisan balas bersih dan lapisan yang kotor. Walau bagaimanapun, citra dari lapisan balas kotor adalah fenomena gradasi yang seringkali tidak menghasilkan refleksi yang kuat. Untuk kasus ini, antena dengan frekuensi tengah 2 GHz digunakan untuk mendeteksi hamburan yang signifikan dari rongga di lapisan balas. Lapisan balas kotor dapat ditunjukkan oleh hamburan amplitudo yang sangat rendah dari kontras dielektrik antara balas dan butiran halus. Hasil kajiannya secara umum menunjukkan bahwa metodologi evaluasi balas dengan mengimplementasikan data antena 2 GHz dapat digunakan untuk teknik pemrosesan gambar sederhana untuk membatasi ketebalan lapisan balas yang bersih dan kotor (buruk). Kajian mengenai teknologi evaluasi NDT untuk lapisan balas, dilanjutkan oleh Robert De Bold (2011). Salah satu pendekatan yang digunakannya untuk mengevaluasi kekakuan lapisan balas jalan rel kereta api adalah dengan menggunakan Falling Weight Deflectometer (FWD). Kelayakan penggunaan Prima 100 mini-FWD pada rel kereta api untuk mengukur kekakuan dinilai kurang efektif karena menggunakan pemberat jatuh yang besar. Selanjutnya, digantikan pemberat dengan penerapan teknik respon impuls pada kereta api. Palu berinstrumen digunakan untuk menghasilkan sumber pengganti pemberat jatuh, dengan geofon mengukur responsnya. Fungsi respon frekuensi ini berhasil dikorelasikan dengan Indeks Fouling Ionescu dengan koefisien korelasi yang lebih besar dari 0,9. Seterusnya, hasil evaluasi ini divalidasi dengan penggunaan data GPR dan data kekakuan terukur yang dikumpulkan oleh Banverket, Swedia, serta penggunaan model numerik yang menghubungkan respons GPR dengan kekakuan Hasil kajiannya menemukan bahwa alat GPR teknik impuls dengan fungsi respon frekuensi dan GPR secara efektif dapat digunakan untuk menentukan kondisi dan kekakuan lapisan balas. Metode pengukuran konsolidasi lapisan balas dengan metode rambatan gelombang telah dikembangkan oleh Sysyn et al. (2019). Hasil kajian mereka menemukan

perubahan signifikan dalam sifat mekanis lapisan balas selama deformasi di bawah bantalan. Studi ini membuktikan penggunaan pengukuran multi-sensor gelombang untuk mendeteksi perubahan mekanis lapisan balas. Pendekatan kajian multi-sensor gelombang dijalankan untuk meningkatkan akurasi penentuan konsolidasi spasial lapisan balas selama pekerjaan mesin tamping, serta dalam proses pemodelan deformasi operasional lintasan. Penerapan teknologi sensor dan mikrokontroler modern ini memungkinkan penerapan metode teoretis yang sederhana dan efektif dalam pembuatan sistem otonom untuk memantau keadaan teknis lintasan dan struktur rekayasa dengan lapisan balas jalan rel. Kajian terbaru mengenai teknologi penilaian balas dilakukan oleh Liu et al. (2022) dengan menggabungkan uji eksperimen dan uji lapangan/pengukuran. Untuk pengujian eksperimental, mereka membangun trek balas skala penuh sepanjang 30 m untuk menguji GPR. Selain itu, antena dan parameter GPR dikonfirmasi untuk uji lapangan. Untuk uji lapangan, tiga jalur kereta api diperiksa dengan GPR (antena berbeda, 400 MHz dan 2 GHz). Sebuah lubang pada lapisan pemberat dibor untuk mengverifikasi hasil GPR. Dengan melakukan penelitian ini, dapat diberikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemeriksaan lapisan balas harus dilakukan terutama dengan antena 2 GHz dan dilengkapi dengan antena 400 MHz dan 900 MHz.
2. Hasil pemeriksaan GPR (pada jalur kereta api rel dan lapangan skala penuh) keduanya menunjukkan bahwa kedalaman deteksi efektif GPR 2 GHz tidak kurang dari 65 cm, yang dapat memenuhi kebutuhan pemeriksaan lapisan balas.
3. Parameter GPR 2 GHz untuk lapisan balast dapat diatur pada spasi saluran 5 cm, titik sampling 512 dan jendela waktu 15 ns.
4. Konstanta dielektrik lapisan balas bersih relatif seragam, dengan hasil 4,7 (rata-rata) dalam kondisi kering. Konstanta dielektrik meningkat secara signifikan dengan meningkatnya tingkat pengotoran.

Kajian menggunakan GPR untuk menentukan indeks pengotoran balas (kerusakan balas) terbukti dapat dijalankan dengan baik. Namun teknologi ini

hanya sebatas pada identifikasi kerusakan balas tanpa menghasilkan nilai kekakuan materialnya. Untuk mendapatkan nilai kekakuan antara lapisan balas kotor dan balas baik diperlukan teknologi yang dapat mengukur reaksi atau respon material akibat beban. Lamas-Lopez et al. (2016) mengkaji distribusi statistik kekakuan tanah yang dianalisis untuk setiap lapisan badan jalan rel. Selain itu, modulus elastisitas bahan yang berbeda diperkirakan dari kekakuannya menggunakan persamaan empiris. Uji beban pelat dinamik dengan menggunakan *light weight deflectometer* (LWD) dilakukan pada permukaan untuk memperkirakan modulus dinamik dan statis balas dan tanah dasar. Analisis statistik dari hasil yang diperoleh menunjukkan tingkat dispersi yang rendah dan pengulangan yang memuaskan. Modulus dinamik diperkirakan dari tes LWD ditemukan konsisten dengan modulus elastisitas yang diperkirakan dari tes PANDA, dan hasilnya menunjukkan bahwa metode auskultasi yang berbeda memberikan informasi pelengkap tentang sifat mekanik dari bahan yang membentuk jalan rel konvensional.

## **B. Light Weight Deflectometer (LWD)**

*Light Weight Deflectometer* (LWD) adalah alat yang dikembangkan di Magderburg, Jerman dan dikembangkan oleh *Highway Research Institutedan HMP Company in Germany* (HMP-LFG) sebagai alat alternatif ukur untuk menyelesaikan masalah konstruksi pada struktur perkerasan jalan maupun pekerjaan tanah (Shivamant et al. 2015). Dari sisi ini penggunaan alat LWD sangat memberikan keuntungan yang lebih besar dibandingkan dengan alat-alat konvensional seperti *Dynamic Cone Penetration* (DCP), CBR langsung, *Plate Bearing Test*, dll. baik dari sisi waktu maupun akurasi. Derajat kepadatan aktual dengan derajat kepadatan dengan LWD tidak berbeda jauh nilainya yang bekisar antara 80 hingga 90%.

Data yang dihasilkan dari alat LWD ini berupa nilai lendutan beserta turunan parameternya yaitu nilai modulus elastisitas. Data defleksi atau lendutan

dihasilkan dari deformasi vertikal oleh berat jatuh dari alat LWD. Perhitungan yang digunakan adalah berdasarkan teori-teori dasar seismology serta mekanika tanah khususnya teori Boussinesq untuk menghasilkan nilai modulus elastisitas. Teori dasar seismology digunakan dalam analisis gelombang sampai mendapatkan nilai lendutan yang dihasilkan sedangkan teori Boussinesq adalah untuk menghitung nilai modulus elastisitas lapisan tanah dengan mempertimbangkan nilai lendutan. Dua teori ini dalam pengujian LWD disandingkan untuk mendapatkan parameter dari tanah yang begitu penting berupa nilai lendutan dan modulus elastisitas.

Alat LWD ini dapat digunakan dengan mudah dan sangat cepat. Hasil perangkat uji LWD ini dapat digunakan untuk desain perkerasan mekanistik. Modulus elastisitas LWD dihitung dengan menggunakan teori setengah ruang elastik, mengukur tegangan kontak pelat dan defleksi, dan membuat asumsi untuk distribusi tegangan. Meskipun sebagian besar perangkat LWD menunjukkan kesamaan dalam operasi dan metodologi, ada perbedaan bagaimana tekanan dan tekanan lempeng kontak ditentukan. Hal ini menyebabkan perbedaan nilai modulus elastisitas yang dihitung. Komponen perangkat LWD umumnya terdiri dari pelat pemuatan berdiameter 100 sampai 300 mm dengan berat jatuh dari 10 sampai 20 kg, akselerometer atau geofon untuk menentukan defleksi, dan sel beban atau batas beban yang dikalibrasi untuk menentukan tegangan kontak pelat. Beberapa komponen penting dalam peralatan LWD antara lain:

#### 1. PENENTUAN TEORITIS MODULUS ELASTIS

Berdasarkan teori elastik *Boussinesq*, hubungan antara tekanan dan deformasi tanah untuk kasus perkerasan kaku atau fleksibel yang terletak pada ruang setengah elastik. Semua perangkat LWD menggunakan teori setengah ruang elastik dan mengasumsikan distribusi tegangan untuk menghitung modulus elastik dari tegangan kontak yang diukur (atau diasumsikan) dan defleksi puncak pelat atau tanah langsung di bawah pusat pelat.



## 2. FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PENGUKURAN ELWD

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai ELWD meliputi ukuran pelat pemuatan, tekanan kontak pelat, tipe dan lokasi transduser defleksi, rigiditas pelat, tingkat pemuatan, kekakuan penyangga, dan pengukuran beban di mana faktor-faktor ini mempengaruhi modulus.

### a. Tipe dan lokasi sensor defleksi

Sensor defleksi yang berbeda dan posisi pemasangan, misalnya, memiliki akselerometer yang terpasang di piring dari mana bacaannya dua kali terintegrasi untuk menghitung defleksi pelat.

### b. Beban transduser

Beberapa perangkat mengasumsikan kekuatan penerapan konstan berdasarkan uji kalibrasi yang dilakukan pada permukaan yang kaku, sedangkan perangkat lain mengukur beban sebenarnya yang diterapkan menggunakan sel beban. Secara teoritis, gaya yang diterapkan pada permukaan tidak dapat konstan, karena jelas tergantung pada kekakuan material yang digunakan untuk beban. Namun, karena LWD umumnya digunakan untuk pengujian lapisan padat yang relatif kaku, kesalahan apapun yang terkait dengan asumsi kekuatan penerapan konstan dalam perhitungan mungkin tidak terlalu signifikan.

### c. Tingkat Pembebanan dan Kekakuan Buffer

Dengan menggunakan teori seternagh ruang elastis dalam prosedur estimasi ELWD, defleksi transien maksimum diasumsikan setara dengan defleksi maksimum dari pelat statis dengan diameter dan tekanan terapan yang sama. Beberapa studi, menunjukkan bahwa tingkat pemuatan mempengaruhi ELWD. Tingkat pemuatan dapat dikontrol dengan memvariasikan kekakuan buffer yang ditempatkan di antara tetesan dan pelat kontak. Penopang dasar kekakuan yang relatif lebih rendah

memberikan transfer beban lebih efisien dan mensimulasikan kondisi pemuatan pelat secara lebih baik.

Dengan menggunakan data lendutan, yang biasanya disebut dengan mangkuk defleksi (*deflection bowl*), kekakuan lapisan pembentuk perkerasan dapat ditentukan dari hitungan balik, yaitu dengan menggunakan program-program komputer. Bentuk dari mangkuk defleksi, ditentukan oleh respon perkerasan terhadap beban yang bekerja. Defleksi terjadi di bawah beban dan semakin menjauh dari pusat beban, semakin mengecil.

Selain dari defleksi pada titik pembebanan, defleksi juga harus bisa diukur pada jarak tertentu dari titik pembebanan tersebut. Defleksi yang didapat bisa digunakan untuk perancangan tebal perkerasan jalan. Selain itu, nilai lendutan ini juga digunakan untuk parameter *quality control* dan *quality assurance* serta kekuatan struktural lapisan perkerasan seperti yang ditunjukkan pada ASTM D4695. Untuk pengujian pada lapisan tertentu (aspal, lapis pondasi, lapis pondasi bawah atau tanah dasar), harus memperhatikan level tegangan yang digunakan pada pengujian. Level tegangan yang harus diperhatikan sesuai Pedoman Metoda Uji Lendutan menggunakan LWD), Pd 03-2016-B, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat), yaitu:

1. Bahan tanah dasar dan lapis pondasi bersifat *stress dependent*, maka harus hati-hati dalam melakukan pengujian LWD pada bahan granural. Sebaiknya nilai  $\sigma$  yang digunakan tidak jauh berbeda dengan tegangan aktual rata-rata yang terjadi selama umur pelayanan perkerasan tersebut.
2. Volume bahan tanah dasar dan lapis pondasi yang dipengaruhi oleh beban merupakan fungsi dari besaran beban itu sendiri.

Beberapa penggunaan LWD untuk evaluasi material di perkerasan jalan telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya *Elhakim dkk. (2013)* yang melakukan penelitian menggunakan alat LWD untuk mengevaluasi derajat kepadatan pasir. Biasanya nilai modulus yang didapatkan akan digunakan untuk melihat tingkat kepadatan pada bagian tanah. LWD merupakan alat yang

cocok untuk menguji tanah yang memiliki butiran paling besar 63 mm. Benda uji yang digunakan adalah pasir kapur dan pasir yang mengandung silika. Pengujian *LWD* dilakukan pada benda uji dengan perbedaan kepadatan yaitu 20%, 40%, 60% dan 80% hal ini dilakukan untuk mempresentasikan kepadatan tanah yang kecil hingga besar. Penelitian ini meninjau efek dari kepadatan tiap lapisan pada pasir terhadap nilai modulus yang dihasilkan alat *LWD*. Dari hasil pengujian didapatkan nilai modulus *LWD* pada pasir silika lebih tinggi dibandingkan dengan pasir kapur dengan tingkatan pemadatan yang sama. Semakin besar angka kepadatan pasir maka modulus yang dihasilkan akan lebih besar, berlaku sebaliknya. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengukuran menggunakan alat *LWD* terbagi menjadi dua, pertama ialah instrumen pendukung dari alat *LWD* itu sendiri, seperti tinggi jatuh beban, ukuran pelat, radius/jarak antar sensor dan berat beban jatuh (Benedetto dkk. 2013), dan kedua ialah parameter dan sifat volumetrik tanah yang rentan dengan keadaan di sekitar (Tehrani dkk. 2010).

Kavussi dkk. (2010) mengkaji hubungan nilai modulus yang dihasilkan alat *FWD* (*Falling Weight Deflectometer*) dengan nilai modulus menggunakan alat *LWD*. Pengujian masing-masing alat dilakukan secara terpisah pada berapa lokasi, dengan parameter pengujian yang sama seperti variasi ketebalan lapisan AC sebesar 200 mm dan 350 mm serta panjang titik uji yang sama. Hasil pengujian didapatkan nilai modulus elastisitas yang dihasilkan meningkat sesuai dengan berat jatuh yang dilakukan. Pada pengujian ini berat jatuh beban yang digunakan seberat 15 kg dan pelat dengan variasi diameter antara 100 mm dan 300 mm. Pengujian dilakukan pada empat yang berbeda, untuk variasi tinggi sebesar 515 mm, 375 mm, dan 275 mm. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Hasil pengujian *LWD* dengan perbedaan tinggi jatuh, dan diameter pelat (Kavussi dkk. 2010)

Proyek	Lokasi	Tinggi Jatuh (mm)			Cv (%)
		515	375	275	
<i>Yadegar Expressway</i>	P1	91	93	N/A	1,50%
	P2	83	78	N/A	4,10%
	P3	96	94	N/A	1,70%
	P4	176	167	N/A	3,80%
	P5	155	150	N/A	2,50%
<i>Amamali Expressway</i>	P1 (Dia = 300 mm)	80	89	90	6,40%
	P1 (Dia = 100 mm)	118	128	121	4,20%
	P2 (Dia = 300 mm)	66	68	63	3,80%
	P3 (Dia = 300 mm)	62	60	58	3,30%
	P4 (Dia = 300 mm)	83	84	83	0,70%

Korelasi nilai *LWD* dan *CBR* juga dilakukan, pengujian *LWD* menggunakan berat jatuh 10 Kg dan diameter pelat 300 mm. Hasil dari pengujian didapatkan hasil korelasi yang baik antara nilai *CBR* dan *LWD* dengan nilai antara 20% - 80%. Nilai modulus yang dihasilkan *LWD* juga dibandingkan dengan nilai modulus yang dihasilkan alat *FWD* sehingga didapatkan korelasi dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,74 sehingga dapat dikatakan alat *LWD* atau *PFWD* bisa digunakan untuk mengevaluasi kekuatan dari struktur perkerasan jalan.

George dkk. (2009) melakukan penelitian terhadap korelasi antara nilai *LWD*, *DCP* dan *CBR* pada lapisan perkerasan *subgrade* menggunakan tanah laterit. Pengujian dilakukan di daerah Dakshina Kannada , Provinsi Karnataka, India. Tanah laterik biasa ditemukan pada kawasan yang memiliki intensitas hujan yang tinggi, temperatur tinggi dan tingkat kelembaban yang tinggi. Pengujian tiap alat dilakukan pada 45 titik dengan lokasi yang sama tiap alatnya. Hasil korelasi dari analisis regresi antara nilai *CBR* dan *DCP* didapatkan nilai  $R^2 = 0,82$ , untuk korelasi dari analisis regresi antara hasil *LWD* dan *DCP* didapatkan nilai  $R^2 = 0,72$ .

Jitareekul et al. (2017) melakukan penelitian menggunakan alat *LWD* untuk mengevaluasi lapis perkerasan terhadap keamanan jalan, hal ini dilakukan dikarenakan tingginya tingkat kecelakaan yang terjadi. Nilai defleksi dan modulus elastisitas menjadi tinjauan utama dalam pengujian ini. Hasil pengujian didapatkan dari berbagai lapis perkerasan dengan material yang paling sering digunakan di Thailand yaitu *Crushed Rock Base*, *Soil Aggregate Subbase*, *Selected material* dan *Subgrade*. Tiap material dibedakan diameter pelat dan tinggi jatuh. Pengujian diambil paling sedikit empat titik pengujian pada tiap jenis material. Untuk hasil modulus dan defleksi didapatkan dari hasil rata-rata, standar deviasi, dan koefisien varian dari tiap jenis material perkerasan. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.2. Hasil koefisien varian dari hasil pengujian defleksi dan modulus elastisitas pada masing-masing jenis perkerasan yang berkisar antara 58% - 77% dan 49% - 65%, besarnya angka variabilitasnya dapat disebabkan dari lokasi pengujian, jenis material, kandungan air, kepadatan dan ketebalan perkerasan.

Tabel 2. 2 Hasil pengujian *LWD* pada tiap jenis perkerasan

Type of Pavement Material	No. Data	D <sub>0</sub> (mm)	Rerata (mm)	Standar deviasi (mm)	Cv (%)	E <sub>LWD</sub> (MPa)	Mean (MPa)	Standar deviasi (MPa)	Cv (%)
Crushed Rock Base	52	0,025	0,087	0,051	58	170 – 1.794	693	399	58
		0,255							
Soil-Aggregate Subbase	80	0,027	0,076	0,068	62	64 – 730	287	141	49
		0,382							
Selected Material	114	0,009	0,044	0,025	57	106 – 1.215	404	227	56
		0,142							
Subgrade	81	0,013	0,067	0,052	77	34 – 738	200	131	65
		0,345							

(Sumber: Jitareekul et al. 2017)

Siegfried (2018) melakukan pengujian menggunakan alat *LWD* dimana hasil modulus akan dibandingkan dengan modulus hasil alat *FWD*, untuk mengetahui apakah alat *LWD* dapat dijadikan alat alternatif dari *FWD*. Dilakukannya hal ini karena alat *FWD* yang tersedia di Indonesia saat ini hanyalah sebanyak 11 buah. Jumlah ini tentu tidak bisa melayani pengujian untuk seluruh jalan yang ada. Alat *LWD* yang digunakan agak berbeda dengan alat *LWD* pada umumnya. Perbedaannya berupa tidak adanya *load cell* sebagai sensor untuk mengukur beban jatuhnya yang digunakan. Pengujian *LWD* dan *FWD* dilakukan pada titik uji yang sama, berlokasi di dalam kampus Pusjatan yang bisa diasumsikan sebagai jalan beraspal dengan lalu lintas rendah hingga sedang. Pengujian *FWD* dilakukan sebanyak 23 titik uji. Besarnya beban target yang diberikan pada umumnya adalah 40 kN atau dalam satuan tegangan sebesar 560 kPa yang terkadang dalam pengoperasiannya tegangan yang dihasilkan bisa mencapai 600 kPa. Pengujian *LWD* dilakukan sebanyak 23 titik uji yang berlokasi sama dengan pengujian *FWD*, jarak antar *geophone* pada *LWD* pusjatan adalah 0 mm, 200 mm, dan 900 mm. Dari hasil korelasi antara hasil uji alat *LWD* dan *FWD* didapatkan persamaan  $y = 1,0509x - 16,802$  dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9791, koefisien relasi yang cukup besar membuktikan bahwa hubungan modulus permukaan yang dihitung menggunakan data lendutan *FWD* dan *LWD* mempunyai hubungan yang cukup kuat. Dapat dikatakan alat *LWD* dapat digunakan sebagai alternatif dari alat *FWD* yang terbukti bisa diterima khusus untuk evaluasi dari sistem perkerasan pada jalan dengan lalu lintas rendah hingga sedang.

### **C. Parameter Kekakuan Material**

Kekakuan (*stiffness*) adalah ketahanan suatu material terhadap deformasi elastis, karena sifat rheologinya kekakuan merupakan hubungan antara tegangan dan regangan sebagai suatu fungsi lama pembebanan dan temperatur (untuk bahan yang bersifat viskos). Untuk menentukan sifat

kekakuan bahan, parameter modulus elastisitas dapat digunakan sebagai angka yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Salah satu jenis dalam modulus elastisitas adalah modulus kekakuan. Modulus kekakuan adalah modulus elastis yang digunakan dalam teori elastis. Seperti diketahui bahwa hampir seluruh material perkerasan tidak bersifat elastis tapi mengalami deformasi permanen setelah menerima pengulangan beban. Tetapi jika beban tersebut relatif kecil terhadap kekuatan material, maka deformasi permanen yang terjadi pada setiap pengulangan beban yang tinggi hampir dapat kembali secara sempurna dan proporsional terhadap beban. Pada kondisi ini material tersebut dapat dipertimbangkan sebagai material yang elastis.

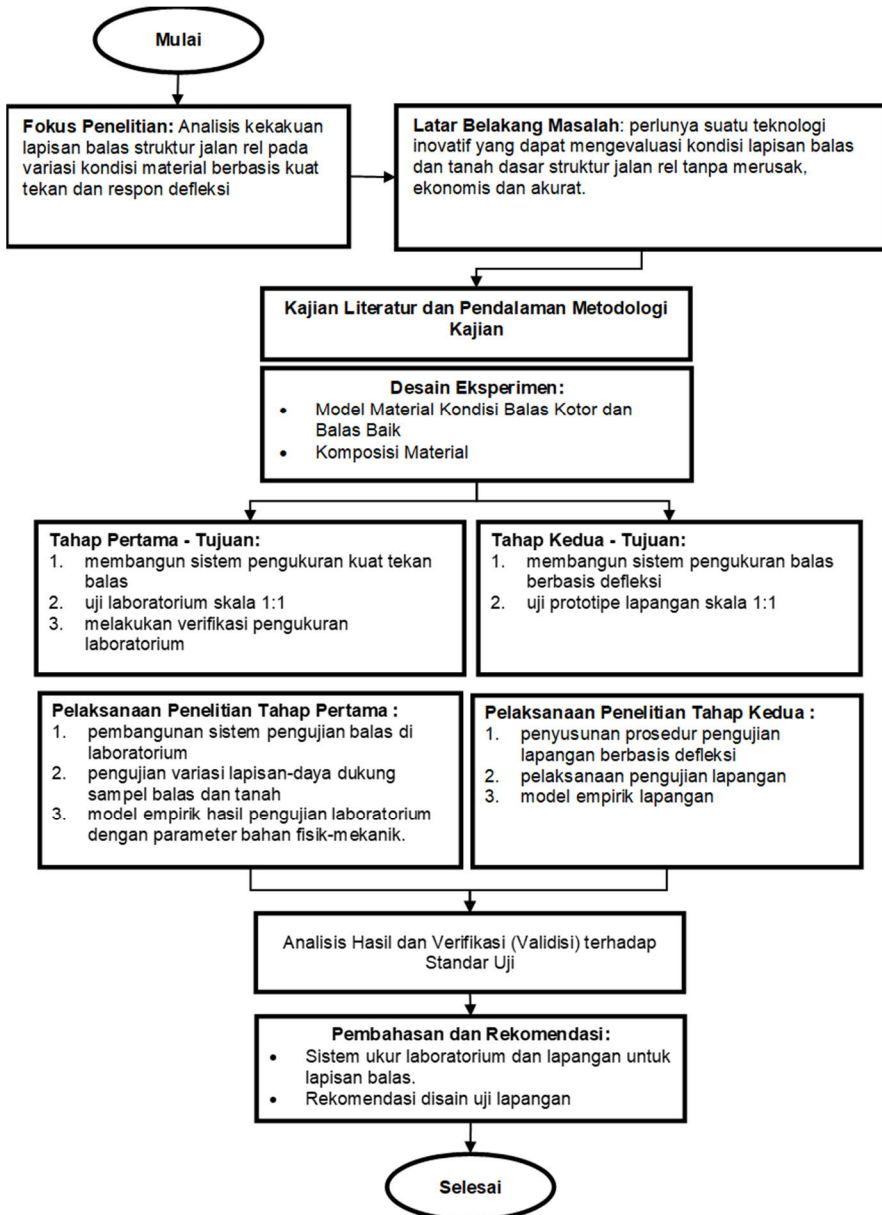
## **BAB 3**

# METODE PENELITIAN

### **A. Tahapan Penelitian dan Pendekatan Studi**

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan, yaitu tahap pertama adalah tahap empirik pengukuran kekakuan material lapisan balas pada skala laboratorium dan dalam tahap kedua dilakukan dengan pengembangan peralatan instrumentasi pengukur lapangan dan pengukuran empirik dengan skala lapangan. Metodologi kedua tahap penelitian tersebut dilakukan dengan pendekatan empiris eksperimen. Secara terperinci, uraian kedua tahapan utama penelitian dijelaskan berikut ini dan bagan alir kerangka (metode) penelitian secara global diberikan dalam Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Bagan alir pendekatan kajian dan metodologi penelitian

## B. Desain Eksperimen

Dalam penelitian terdapat beberapa langkah-langkah awal yaitu yaitu persiapan material dan peralatan yang digunakan, selain itu dilakukan juga pemeriksaan sifat fisik dan mekanik material, perencanaan campuran dan pembuatan benda uji. Selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan balas dan pengujian lapangan.

### 1. PERENCANAAN MATERIAL BALAS

#### a. Agregat Kasar

Dalam penelitian ini bahan agregat kasar yang digunakan merupakan material agregat kasar untuk lapisan balas jalan rel kelas . Agregat kasar yang digunakan berasal dari Clereng, Kabupaten Kulon Progo, D.I. Yogyakarta. Karena kelas jalan rel yang direncanakan adalah Jalan Rel Kelas 2 sehingga terdapat persyaratan gradasi untuk material agregat kasar yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1. Persyaratan Gradasi untuk Material Balas (Rosyidi, 2016)

Ukuran Material (Inchi)	Persen Lolos Saringan									
	3	2 ½	2	1 ½	1	¾	½	⅜	No.4	No.8
2½ - ¾	100	100	25-60	25-60	-	0-10	0-5	-	-	-
2 - 1	-	100	96-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-
1½ - ¾	-	-	100	90-100	15-20	0-15	-	0-5	-	-

Untuk kelas jalan 1 dan 2 digunakan material dengan ukuran nominal 2 1/2” - 3/4” , sedangkan untuk kelas jalan 3 dan 4 dapat digunakan ukuran nominal 2”-1” (Rosyidi, 2016).

Setelah dilakukan pemilihan ukuran nominal selanjutnya agregat kasar yang digunakan diuji sifat-sifat fisis dan mekanisnya untuk pengecekan apakah material sudah sesuai dengan spesifikasi baik berat jenis, analisis gradasi, abarasi los angeles dan kadar lumpur.

Ketentuan mengenai pengujian spesifikasi agregat terdapat pada Standar Nasional Indonesia dan *American Standart Testing and Material*, yaitu:

- i. Pengujian berat jenis bulk dan absorpsi yaitu menentukan BJ Bulk dan persentase material yang terabsorpsi dengan standar pengujian ASTM C142, SNI 3432:2008 dan SNI 4141:2014.
- ii. Analisis saringan merupakan pengujian gradasi material balas dan karet yang akan digunakan dengan mengacu kepada standar ASTM C 136, SNI 02-1968-1990 dan SNI ASTM C136:2012.
- iii. Pengujian kadar lumpur adalah pengujian agregat untuk mengetahui kadar lumpur dalam agregat yang akan digunakan untuk penelitian ini dengan standar SNI 03-2816-1992.
- iv. Uji keausan dengan alat *Los Angeles* adalah pengujian daya tahan agregat agar tidak hancur oleh pengaruh mekanis ataupun kimia dengan menggunakan alat *Los Angeles* dan standar pengujian yang mengacu pada SNI 2417-2008 tentang Cara Uji Keausan dengan Mesin Abrasi *Los Angeles*.

#### **b. Air dan Tanah**

Air dan tanah digunakan untuk campuran agregat saat pengujian, bahan ini diperlukan karena untuk mendapatkan data real seperti keadaan di lapangan pada saat-saat tertentu

#### **c. Pembuatan Benda Uji**

Sampel benda uji yang dibuat adalah:

- |                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| 1. Gradasi Baik                | : 3 Benda Uji |
| 2. Gradasi Baik + Air          | : 3 Benda Uji |
| 3. Gradasi Baik + Tanah        | : 3 Benda Uji |
| 4. Gradasi Baik + Air + Tanah  | : 3 Benda Uji |
| 5. Gradasi Buruk + Air         | : 3 Benda Uji |
| 6. Gradasi Buruk + Tanah       | : 3 Benda Uji |
| 7. Gradasi Buruk + Air + Tanah | : 3 Benda Uji |

Total benda uji yang akan dibuat adalah 21 benda uji

#### **d. Persiapan material**

Agregat kasar yang digunakan adalah agregat kasar dalam keadaan kotor dan bersih. Material balas kotor tidak perlu dilakukan pencucian sedangkan untuk balas bersih, material dicuci sampai pasir dan lumpur yang menempel tidak tersisa pada permukaan material agregat kasar. Pada kriteria 1 (Gradasi baik) diperlakukan berbeda dengan benda uji yang lain, karna pada gradasi ini balas di cuci dan dilakukan pengeringan menggunakan oven selama 24 jam  $\pm$  4 jam.

#### **e. Pencampuran dan Pemadatan Lapisan Balas**

Material agregat kasar yang digunakan adalah material balas sesuai Tabel 3.1. Selanjutnya campurkan agregat kasar ke dalam balas box dengan ketebalan lapisan 10 cm dan dilakukan pemadatan sebanyak 56 kali tiap lapisan/layer dilakukan sampai total 3 lapisan (mencapai tebal 30 cm). Selanjutnya setelah dimasukkan ke dalam balas box dengan ketebalan lapisan 10 cm, dipasang plat pemadatan dan dilakukan pemadatan sebanyak 56 kali tiap lapisan/layer sebanyak 3 kali pemadatan untuk 1 benda uji.

#### **f. Persyaratan Material Lapisan Balas**

Material penyusun balas merupakan batuan pecah yang bersifat keras, mempunyai sudut tajam untuk menghindari rongga saat taburasi. Jenis-jenis batuan penyusun lapisan balas sudah diatur dalam PM No. 60 Tahun 2012. Lapisan balas haruslah memiliki material penyusul yang baik dan mengikuti standar yang sudah ditetapkan agar lapisan balas dapat menjalankan fungsinya dengan optimal. Agar didapatkan material balas yang baik perlu dilakukan pengujian fisik dan mekanik pada lapisan balas tersebut sebelum digunakan. Jenis-jenis batuan penyusun lapisan balas menurut PM No. 60 Tahun 2012 :

- a. Material balas yang digunakan adalah batu pecah dengan ukuran 25-60 mm mempunyai ketahanan dan lahan gesek yang baik serta kemudahan dalam pemadatan.
- b. Batuan yang digunakan untuk lapisan balas berasal dari batuan pecah (*crushed stone*) dan mempunyai sudut tajam dan panjang.

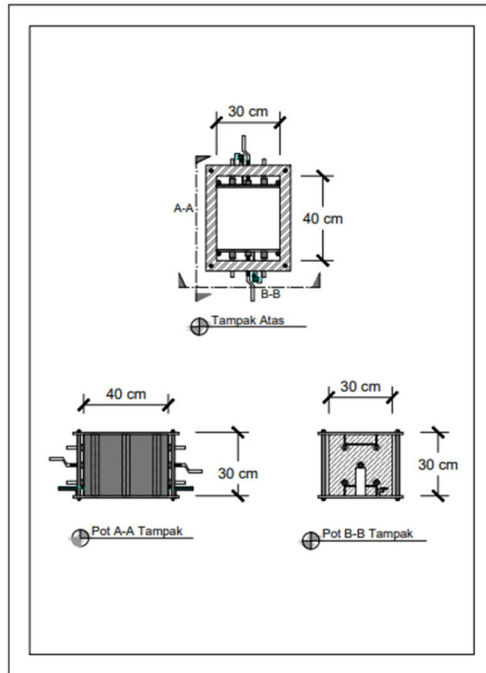
- c. Porositas maksimal 3%.
- d. Kuat tekan maksimum rata-rata 1000 kg/cm<sup>2</sup>.
- e. Berat jenis minimum 2,6.
- f. Kandungan tanah, lumpur dan organik maksimum 0,5%.
- g. Kandungan minyak maksimum 0,2%.
- h. Keausan agregat tidak boleh lebih dari 2,5%.
- i. Kemiringan pada lereng lapisan balas tidak boleh lebih curam dari 1:2.
- j. Bahan balas dihampar hingga mencapai elevasi yang sama dengan elevasi bantalan.

Sementara beberapa persyaratan teknik menurut PD.N0.10 Tahun 1986 menyatakan bahwa material balas sebagai berikut:

- a. Material balas merupakan batuan pecah, bersudut dan tahan lama.
- b. Beberapa substansi yang merugikan tidak diperbolehkan diantaranya:
  - 1) Material lunak dan mudah pecah harus <3%,
  - 2) Material yang lolos saringan No.200 (0,075 mm) <1%,
  - 3) Gumpalan lempung <0,5%.
- c. Nilai keausan material dengan mesin abrasi Los Angeles <40%.
- d. Berat padat per meter minimal 1400 kg.
- e. Partikel yang tipis dan panjang diharuskan kurang dari 5%.

## 2. PEMBUATAN KOTAK UJI (BALLAST BOX) LABORATORIUM

Ballast box yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dimensi panjang 40 cm, lebar 30 cm, dan tinggi 30 cm. Tahapan awal untuk proses pembuatan balast box dimulai dengan pembuatan *ballast box* di workshop, selanjutnya dibuat (difabrikasi) *ballast box* sesuai dengan desain ukuran dan mekanisme pengembangan sampel material akibat beban. Ballast box didesain dengan dinding fleksibel di sisi tegak alat uji yang dimaksudkan untuk memberikan penyaluran regangan di sisi lateral kotak uji. Gambar 3.2 menunjukkan gambar desain ballast box dan Gambar 3.3 menunjukkan hasil akhir ballast box yang digunakan dalam pengujian ini.



Gambar 3.2. Desain Ballast Box untuk Pengujian Kuat Tekan Balas



Gambar 3.3. Hasil Ballast Box

Penumbuk manual digunakan sebagai alat bantu pemadatan pada benda uji dengan jumlah penumbukan tiap lapisan/layer sebanyak 56 kali. Alat

penumbuk manual memiliki berat penumbuk 4,5 kg dengan tinggi jatuh 45,7 cm. Sedangkan plat penumbukan berfungsi untuk meratakan beban tumbukan yang dilakukan supaya material yang dipadatkan mendapatkan beban merata di seluruh permukaan sehingga pemadatan dapat mendapatkan hasil yang maksimal. Gambar 3.4 menunjukkan peralatan penumpuk dan pelat baja untuk pengujian kuat tekan balas.

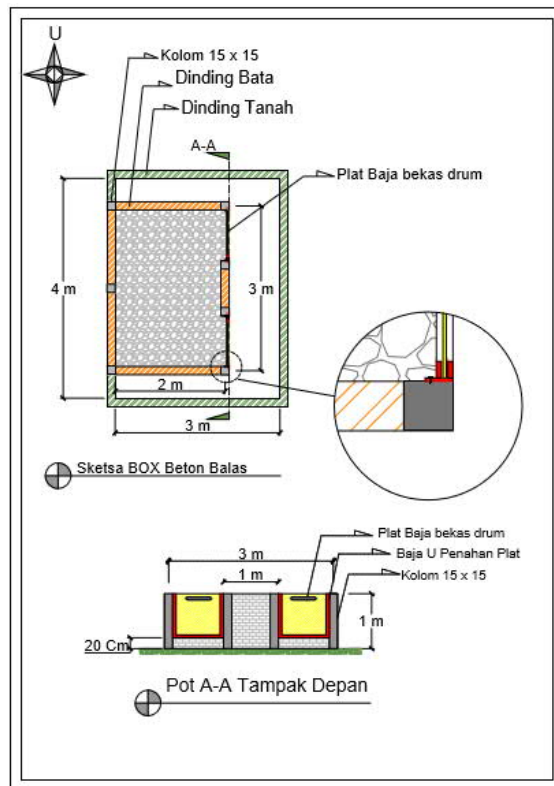


Gambar 3.4. Komponen alat uji berupa penumbuk dan plat baja penahan untuk pendistribusian beban

### 3. PEMBUATAN KOTAK UJI (BALLAST BOX) LAPANGAN

Dalam penelitian ini, model lapangan juga dibangun. Ballast box lapangan dibangun dengan dengan skala 1:1 dalam ukuran  $3 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ . Ballast box

dibangun dengan dinding beton dilapisi dengan waterproof (lapis kedap air). Sampel balas (agregat) baik dan balas kotor yang dicampur dengan tanah (lumpur) dalam jumlah tertentu dimasukkan ke dalam kotak tersebut dan sampel dikondisikan seperti kondisi lapangan. Pembuatan ballast box beton ini memakan waktu kurang lebih 1 bulan, berikut ini adalah foto-foto desain hingga pembuatan ballast box beton di lapangan (Gambar 3.5 hingga Gambar 3.9).



Gambar 3.5. Desain Ballast Box Lapangan dari Beton





Gambar 3.6. Pembuatan Ballast Box: Pembersihan Lokasi



Gambar 3.7. Pembuatan Ballast Box: Pemasangan Tulangan Pelat



Gambar 3.8. Pembuatan Ballast Box: Pengecoran Ballast Box

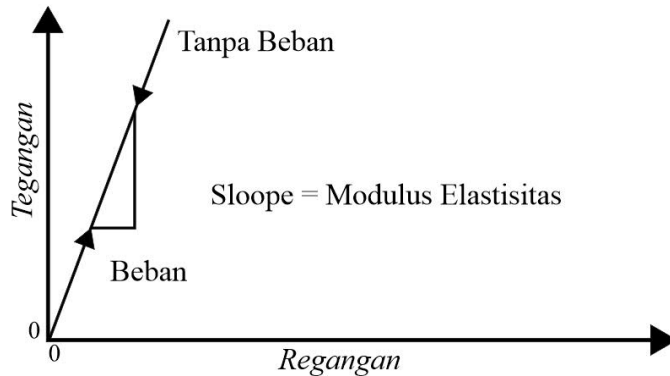


Gambar 3.9. Kondisi Ballast Box Lapangan

### **C. Pengujian Kuat Tekan dengan Micro-computer Universal Testing Machine (UTM)**

Uji tekan adalah metode pengujian yang sesuai dilakukan pada semua benda uji yang berbentuk padat yang akan mengalami perubahan bentuk apabila diberi pembebanan. Metode pengujian ini sangat bergantung pada besarnya beban yang diterima oleh benda uji, unsur kimia ataupun kondisi fisik material benda uji, kecepatan pembebanan, suhu dan sifat mekanik beban uji tersebut. Pengujian menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) merupakan pengujian untuk mendapatkan parameter antara lain seperti nilai deformasi, tegangan ( $\sigma$ ), regangan ( $\epsilon$ ) serta nilai modulus elastisitas ( $E$ ). Untuk pengujian kuat tekan pada penelitian ini berlandaskan pada pengujian tekan terhadap beton silinder maupun kubus (BSN, 1990) tentang tata cara pengujian tekan beton.

Dengan hasil akhir yang diperoleh berupa data tegangan dan regangan, kemudian data dianalisis dalam bentuk grafik guna menentukan nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas merupakan tingkat kekerasan dari suatu bahan (benda uji). Semakin tinggi nilai modulus elastisitas maka benda uji dikategorikan semakin kaku/keras. Secara eksperimental, nilai modulus elastisitas dapat ditentukan dari perhitungan berdasarkan rumus empiris atau pengukuran kemiringan (*slope*) kurva regangan-tegangan yang didapatkan dari uji tekan. Berdasarkan teori elastisitas, kemiringan kurva pada tahap awal atau pada jangkauan proporsional elastis menggambarkan suatu modulus elastis dari bahan tersebut.



Gambar 3.10. Skematik Diagram antara Tegangan – Regangan

Stabilisasi lapisan balas dilakukan supaya nilai pori yang ada dalam lapisan berkurang akibat rongga yang ada. Stabilisasi atau pemadatan berfungsi untuk menjaga stabilitas lapisan balas secara mekanis supaya material balas tidak berhamburan, hal ini disebabkan oleh bentuk material balas yang berbeda-beda. Untuk meningkatkan stabilitas lapisan balas dapat digunakan material dengan kualitas baik, gradasi material yang baik/ beragam untuk mengurangi rongga yang ada dan penambahan material lain yang dapat meningkatkan stabilitas lapisan balas.

Sebuah studi laboratorium dikembangkan untuk menganalisis keefektifan teknologi ini dalam kondisi dan pengaruh yang berbeda dengan alat pengujian tekan vertikal yang digunakan pada penelitian ini adalah *Universal Testing Machine* dengan merk *Hung Ta 9501*. Mesin ini memiliki kuatan tekan maksimal sampai dengan 45 kPa. *Output* yang dihasilkan dari alat *UTM* adalah tegangan dan regangan yang dihasilkan benda uji pada saat pengujian.



Gambar 3.11. Micro-computer Universal Testing Machine (UTM)



Gambar 3.12. Pelaksanaan Pengujian Tekan Balas dengan alat Universal Testing Machine (UTM) Hung Ta

### a. Prosedur Pengujian

Prosedur tekan benda uji dijalankan sebagai berikut:

1. Setelah setiap lapisan balas selesai dipadatkan selanjutnya dilakukan pengujian tekan pada benda uji.
2. Selanjutnya mempersiapkan plat besi ukuran 15 x 20 cm dengan tebal 2,5 cm
3. Setelah semua siap letakkan benda uji secara sentris pada alat uji tekan sehingga pembebanan dapat dilakukan secara merata.
4. Selanjutnya memasukkan dimensi benda uji berupa tinggi dan lebar benda uji pada mesin uji tekan dan dilakukan pengujian sampai pembebanan mencapai nilai 4 ton atau benda uji telah mengalami perubahan penurunan dan mendesak balas *box* hingga melengkung karena tidak dapat menahan pembebanan yang dilakukan.

### b. Analisis Hasil Pengujian

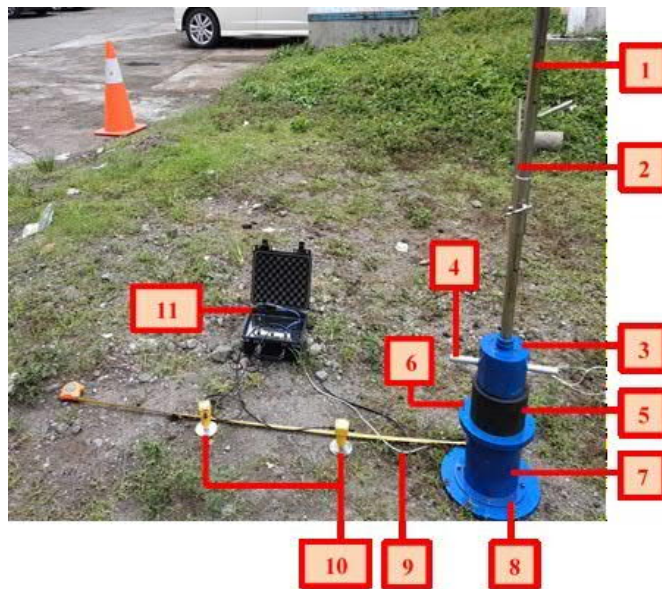
Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas. Nilai modulus elastisitas merupakan salah satu parameter untuk menentukan kekakuan suatu material. Setiap sampel yang telah diuji tekan akan menghasilkan nilai tegangan dan regangan yang dianalisis. Untuk mendapatkan nilai modulus elastis dilakukan pendekatan menggunakan penarikan garis *trendline* dari tiap perbandingan tegangan dan regangan dari hasil pengujian. Hal ini dilakukan karena nilai tegangan dan regangan yang terjadi mampu mencapai nilai pembebanan maksimum sebesar 4000 kg atau 0,889 MPa dan kemungkinan benda uji mampu menahan beban yang lebih tinggi dan regangan masih dapat bertambah. Keterbatasan nilai pembebanan disebabkan oleh kapasitas yang mampu ditahan oleh balas *box*. Penggunaan *trendline* berfungsi untuk mendapatkan kurva linier sehingga kemiringan batas linier dapat diketahui dari hubungan tegangan dan regangan yang ada.

## D. Pengujian Lapangan Light Weight Deflectometer (LWD)

Konsep kerja dari alat *Light Weight Deflectometer (LWD)* adalah dengan menjatuhkan beban seberat  $\pm 22$  lb atau sekitar 10-20 kg, dengan menggunakan *Geophone* ke *loading plate* untuk mengamati lendutan yang terjadi pada lapis permukaan tanah maupun perkerasan. Alat ini dihubungkan dengan sensor yang terhubung dengan perangkat elektronik yang dapat mencatat gerakan dari piringan pada saat uji dilakukan. Beban dijatuhkan pada ketinggian tertentu yang disebut *Leveling* maka akan menghasilkan getaran/vibrasi yang kemudian akan dicatat oleh *Geophone*. *Level* pada alat LWD terbagi menjadi 5 (0 - 4), dimana level 0 memiliki ketinggian jatuh sebesar 0,13 cm, level 1 sebesar 0,23 m level 2 sebesar 0,33 m level 3 sebesar 0,47 m dan level 4 sebesar 0,60 m.

### a. Bagian dan Penjelasan Alat LWD

Bagian-bagian penyusun alat *Light Weight Deflectometer (LWD)* dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. Bagian-bagian dalam alat *LWD*

Penjelasan bagian-bagian dari alat LWD dari Gambar 3.13 dijelaskan berikut ini.

1. *Guide rod* : berfungsi sebagai pemegang beban pada alat LWD.
2. Pengait beban : berfungsi sebagai penahan dan pelepas beban yang akan dijatuhkan.
3. Beban jatuh : beban yang akan diberikan kepada benda uji dengan berat berkisar 10-20 kg, untuk alat LWD pusjatan adalah 12 kg.
4. *Carry grip* : berfungsi sebagai pegangan beban agar lebih mudah ketika pengoperasian alat.
5. Karet *buffer* : berfungsi sebagai peredam beban yang jatuh agar pantulan yang terjadi tidak terlalu besar.
6. *Anti-tipping fixture* : berfungsi untuk menahan pemegang dan beban jatuh agar tetap pada posisi awal.
7. Tabung sensor lendutan : berfungsi sebagai pengukur defleksi pada titik jatuh beban.
8. Pelat pembebanan : berfungsi untuk mendistribusikan beban yang seragam ke permukaan.
9. Kabel : berfungsi sebagai penghubung antar instrumen alat agar dapat saling mengirimkan data hasil pengujian ke prosesor.
10. *Geophone* : berfungsi sebagai pencatat vibrasi/getaran yang dihasilkan oleh beban.
11. Prosesor : berfungsi sebagai “otak” dalam alat, dimana pengolahan data yang dihasilkan dilakukan di prosesor yang kemudian menghasilkan nilai modulus elastisitas dari pengujian.



## b. Perhitungan Modulus Elastisitas dari Defleksi LWD

Modulus elastisitas dari data defleksi pada permukaan (E0), dapat dihitung menggunakan rumus *Boussinesq*, sebagai berikut:

$$E_{LWD} = \frac{K \times (1 - \mu^2) \times P \times r}{d_0} \quad (3.1)$$

dimana,

K =  $\pi/2$  dan 2 untuk pelat kaku dan lentur ,

$d_0$  = Lendutan pada pusat pembebanan (mikron) ,

P = Tegangan seragam dibawah piring (MPa) ,

$\mu$  = Poisson Ratio , (0,15 untuk beton, 0,35 untuk perkerasan)

r = Radius / jari-jari pelat pembebanan (cm),

## E. Pengukuran Perbandingan dan Validasi

Hasil pengukuran dari penelitian ini diverifikasi dan divalidasi dengan pengujian fisik dan mekanik material pada sampel bahan lapisan balas dan tanah pencampur balas kotor, termasuk didalamnya perbandingan terhadap standar pengujian material dan peralatan yang berlaku di Indonesia.

## BAB 4

# HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pengujian Sifat Fisik Agregat Balas di Laboratorium

Beberapa hasil pengujian untuk memeriksa kualitas agregat dan karet yang digunakan pada penelitian ini yang akan dijelaskan di bawah ini. Hasil pemeriksaan agregat balas yang diambil dari daerah Kulon Progo, Jogjakarta diperoleh hasil yang terdapat pada Tabel 4.1 dan data selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4. 1 Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar

No	Jenis Pemeriksaan	Spesifikasi	Hasil	Satuan
Agregat Kasar				
1.	Berat Jenis Curah Kering	$\geq 2,5$	2,63	-
2.	Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan	$\geq 2,5$	2,66	-
3.	Berat Jenis Semu	$\geq 2,5$	2,70	-
4.	Penyerapan Air	$\leq 3$	0,95	%
5.	Kadar Lumpur		1,88	%
6.	Keausan Agregat	$\leq 40$	17,66	%

Agregat yang berasal dari Kulon Progo memenuhi standar dan spesifikasi yang diisyaratkan Standar Nasional Indonesia. Oleh karena itu, agregat tersebut layak dan dapat digunakan sebagai bahan untuk penelitian.

Dalam pemeriksaan agregat balas ini digunakan lima jenis sampel untuk setiap pemeriksaan (Tabel 4.2 dan Tabel 4.3), lalu diambil nilai rata-rata dari data

yang didapatkan agar nilai yang diperoleh lebih teliti dan terdapat perbandingan nilai terhadap semua sampel.

Tabel 4.2. Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Benda Uji	BJ Bulk	BJ SSD	BJ Semu	Penyerapan
1	2,66	2,68	2,72	0,9
2	2,63	2,65	2,69	0,8
3	2,61	2,64	2,68	1,0
4	2,66	2,68	2,71	0,7
5	2,60	2,64	2,70	1,4

Tabel 4.3. Kadar Lumpur Agregat Kasar

Benda Uji	Berat Awal (g)	Berat Kering Setelah Pencucian (g)	Kadar Lumpur (%)
1	4951,1	4860,8	1,8
2	4936,9	4827,2	2,2
3	4963,8	4870,3	1,9
4	4977,8	4900	1,6
5	4950,1	4857,2	1,9

Tabel 4.4. Keausan Agregat Kasar

Benda Uji	Berat Awal (g)	Berat Setelah Abrasi (g)	Keausan Balas (%)
1	5019,3	4154	17,24
2	5006,4	4138,7	17,33
3	5009,7	4087	18,42

a. Pemeriksaan berat jenis

Berat jenis adalah perbandingan antara berat volume dari suatu material terhadap berat air dengan volume yang sama. Berat jenis adalah suatu sifat yang umumnya digunakan dalam menghitung volume yang akan diisi oleh agregat dalam berbagai campuran yang mengandung agregat, termasuk beton semen, beton aspal dan campuran lain. Penentuan berat jenis disesuaikan dengan kondisi agregat diantaranya, berat jenis curah kondisi jenuh kering permukaan atau agregat dalam keadaan *saturated surface dry* (SSD) merupakan kondisi

dimana agregat dalam keadaan basah yaitu penyerapannya sudah terpenuhi, adapun berat jenis curah kering oven digunakan untuk mengetahui nilai berat jenis agregat dalam keadaan kering atau diasumsikan kering. Berat jenis semu (*apparent*) yaitu kepadatan relatif dari bahan padat dan tidak termasuk pori diantara partikel yang akan terisi oleh air.

Dari hasil pengujian pemeriksaan berat jenis yang sudah dilakukan diperoleh nilai rata-rata untuk berat jenis curah kering sebesar 2,63, berat jenis jenuh kering permukaan rata-rata sebesar 2,66, dan berat jenis semu rata-rata sebesar 2,70.

b. Pemeriksaan penyerapan air

Angka penyerapan air ini digunakan untuk menghitung perubahan berat dari agregat akibat air yang diserap ke dalam pori-pori agregat dibandingkan dengan saat kondisi kering, ketika agregat tersebut sudah dianggap cukup lama kontak dengan air sehingga air sudah menyerap penuh kedalam agregat tersebut. Angka penyerapan air yang didapatkan dari hasil pengujian adalah sebesar 0,95%.

c. Pemeriksaan kadar lumpur

Lumpur yang terdapat pada agregat sangat mempengaruhi ikatan agregat dengan bahan pengikat lain seperti semen dan aspal. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memeriksa kadar lumpur yang terkandung pada agregat yang akan digunakan agar tidak memengaruhi campuran yang akan dibuat. Kadar lumpur yang didapatkan dari hasil pengujian pemeriksaan kadar lumpur adalah sebesar 1,88%.

d. Pemeriksaan keausan agregat

Daya tahan agregat adalah ketahanan agregat untuk tidak hancur oleh pengaruh mekanis ataupun kimia. Agregat yang digunakan dalam suatu konstruksi perkerasan harus memiliki daya tahan terhadap gradasi yang mungkin terjadi saat proses pencampuran, pemadatan, repetisi beban serta

tahan terhadap desintegrasi yang menghancurkan agregat menjadi partikel yang lebih kecil akibat gaya yang ditimbulkan akibat pemadatan ataupun penimbunan. Hasil yang diperoleh dari hasil pemeriksaan dengan alat *Los Angeles* adalah sebesar 17,66%.

Dari semua hasil pemeriksaan yang dilakukan untuk agregat yang berasal dari Kulon Progo memiliki hasil pemeriksaan yang masuk ke dalam spesifikasi bahan yang disyaratkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI).

## **B. Pengujian Modulus Elastisitas di Laboratorium**

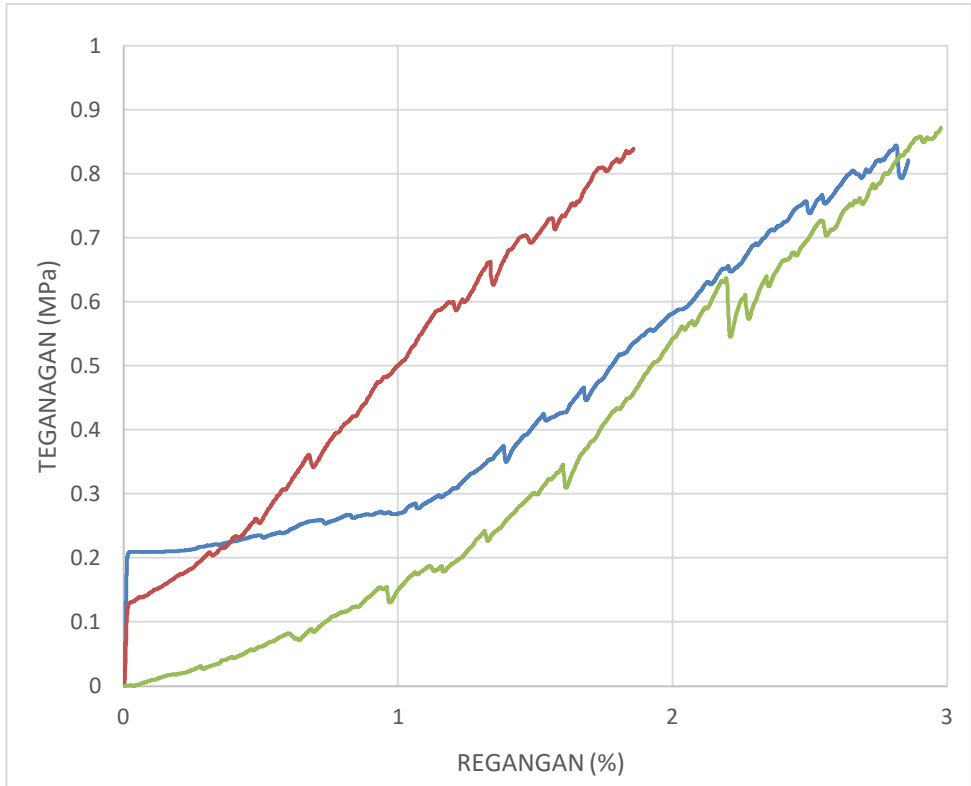
Berikut merupakan hasil pengujian modulus elastisitas pada masing-masing kriteria benda uji dari pengujian kuat tekan yang dilakukan pada variasi kondisi balas baik dan buruk.

### a. Benda Uji Kondisi Balas Baik

Tabel 4.5 berikut ini adalah data hasil pengujian kuat tekan material balas yang menghasilkan nilai deformasi, regangan, tegangan dan nilai modulus elastisitas untuk kondisi material lapisan balas yang baik. Trend hubungan tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material balas baik ini diberikan dalam Gambar 4.1.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik

Benda uji	Beban (Kgf)	Deformasi (mm)	Regangan (%)	Tegangan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
	4009.357	8,584	2,861	0,874	30,545
Balas baik	4002.937	5,575	1,858	0,872	46,958
	4000.477	8,933	2,977	0,8721	29,2898



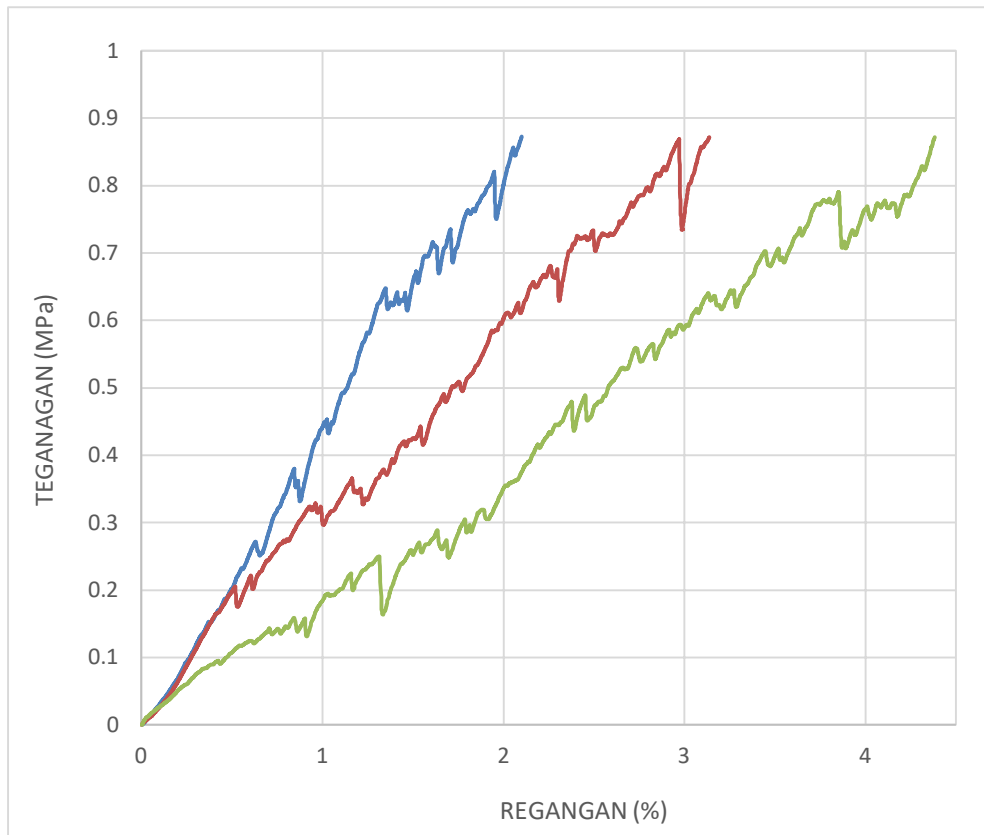
Gambar 4.1. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik

b. Benda Uji Kondisi Balas Baik yang Terendam Air

Tabel 4.6 berikut ini adalah data hasil pengujian kuat tekan material balas yang menghasilkan nilai deformasi, regangan, tegangan dan nilai modulus elastisitas untuk kondisi material lapisan balas yang baik yang terendam oleh air. Trend hubungan tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material balas baik yang terendam oleh air ini diberikan dalam Gambar 4.2.

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terendam Air

Benda uji	Pembebanan	Deformasi	Regangan	Tegangan	Modulus Elastisitas
	(Kgf)	(mm)	(%)	(MPa)	(MPa)
Balas baik	4002,994	6,3025	2,100	0,872	41,538
terendam air	4001,463	9,4125	3,1375	0,872	27,802
	4000,552	13,15	4,383	0,8721	19,896



Gambar 4.2. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terendam Air

### c. Benda Uji Kondisi Balas Baik yang Terinfiltrasi Tanah

Tabel 4.7 berikut ini adalah data hasil pengujian kuat tekan material balas yang menghasilkan nilai deformasi, regangan, tegangan dan nilai modulus elastisitas untuk kondisi material lapisan balas yang baik yang terinfiltrasi oleh tanah. Trend hubungan tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material balas baik yang terinfiltrasi oleh tanah ini diberikan dalam Gambar 4.3. Kondisi ini menggambarkan tanah mulai terinfiltrasi masuk ke lapisan balas dengan gradasi agregat yang baik.

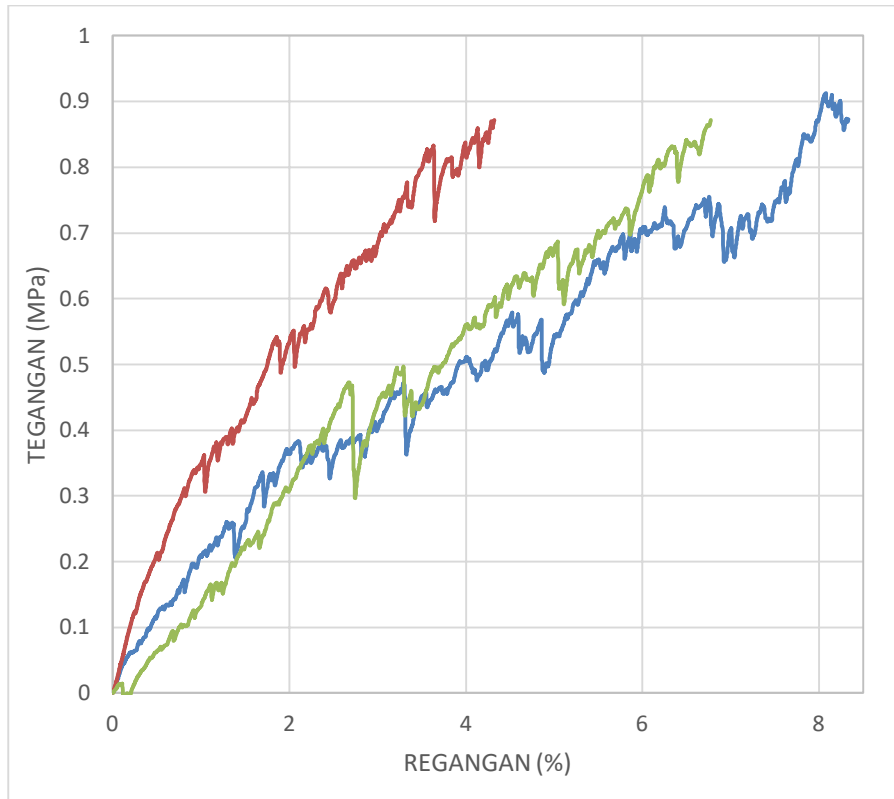
Tabel 4.7. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terinfiltrasi Tanah

Benda uji	Pembebanan	Deformasi	Regangan	Tegangan	Mmodulus elastisitas
	(Kgf)	(mm)	(%)	(MPa)	(MPa)
Balas baik yang terinfiltrasi tanah	4002,243	24,925	8,308	0,872	10,501
	4001,703	12,965	4,321	0,872	20,185
	4000,749	20,320	6,773	0,872	12,875

### d. Benda Uji Kondisi Balas Baik Terinfiltrasi Air dan Tanah

Tabel 4.8 di bawah ini menunjukkan hasil pengujian kuat tekan material balas meliputi nilai deformasi, regangan, tegangan dan nilai modulus elastisitas untuk kondisi material lapisan balas yang baik yang terinfiltrasi oleh campuran air dan tanah. Hubungan tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material balas baik yang terinfiltrasi oleh campuran tanah dan air ini diberikan dalam Gambar 4.4. Gradasi agregat baik untuk material balas disimulasikan dalam kondisi ini tercampur dengan air dan tanah yang berasal dari infiltrasi atau masukkan material tanah dasar ke atas lapisan balas. Kondisi ini merupakan permisalan untuk kondisi awal kerusakan balas dimana lumpur telah masuk diantara lapisan balas baik.

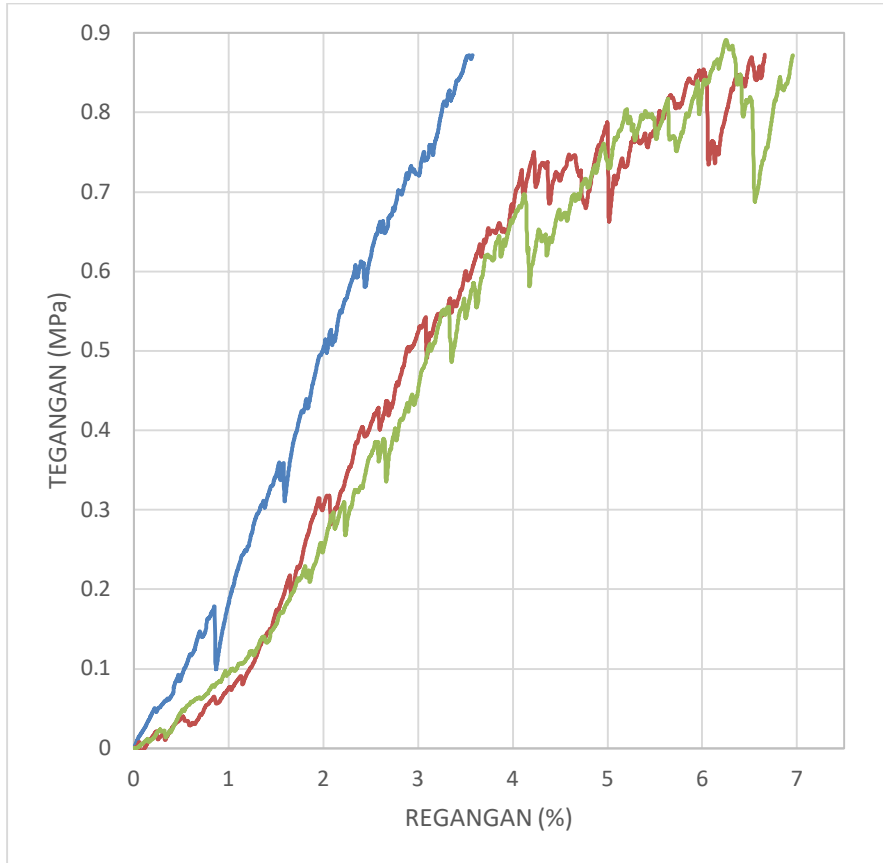




Gambar 4.3. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terinfiltrasi oleh Tanah

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Baik yang Terinfiltrasi Campuran Air dan Tanah

Benda uji	Pembebanan	Deformasi	Regangan	Tegangan	Modulus elastisitas
	(kgf)	(mm)	(%)	(MPa)	(MPa)
Balas baik yang tercampur dengan air dan tanah (lumpur)	4000,784	10,725	3,575	0,872	24,396
	4001,815	19,987	6,662	0,872	13,094
	4000,634	20,862	6,954	0,8721	12,541



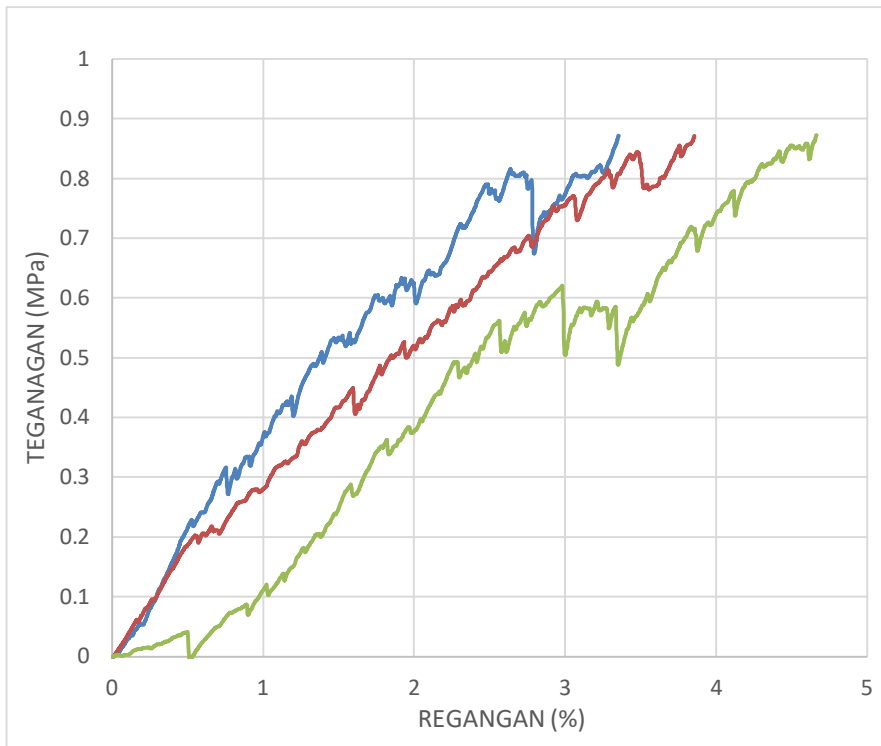
Gambar 4.4. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Baik yang Terinfiltrasi oleh Campuran Air dan Tanah (Lumpur)

e. Benda Uji Kondisi Balas Buruk yang Terendam Air

Variasi kondisi balas selanjutnya adalah lapisan balas buruk, yaitu lapisan dengan bahan agregat yang telah berubah gradasinya menjadi butiran yang lebih kecil dan cenderung seragam, yang terendam oleh air, dimana hasil pengujian kuat tekannya ditunjukkan dalam Tabel 4.9. Gradasi buruk material balas ini menggambarkan kondisi balas yang telah mengalami deformasi permanen dan penurunan kapasitas daya dukungnya akibat pembebanan. Grafik tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material balas ini diberikan dalam Gambar 4.5.

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Terendam Air

Benda uji	Pembebanan	Deformasi	Regangan	Tegangan	Modulus elastisitas
	(kgf)	(mm)	(%)	(MPa)	(MPa)
Balas buruk	4000,032	11,565	3,855	0,8720	22,618
yang terendam	4001,545	10,056	3,352	0,872	26,023
oleh air	4006,212	13,987	4,662	0,873	18,731



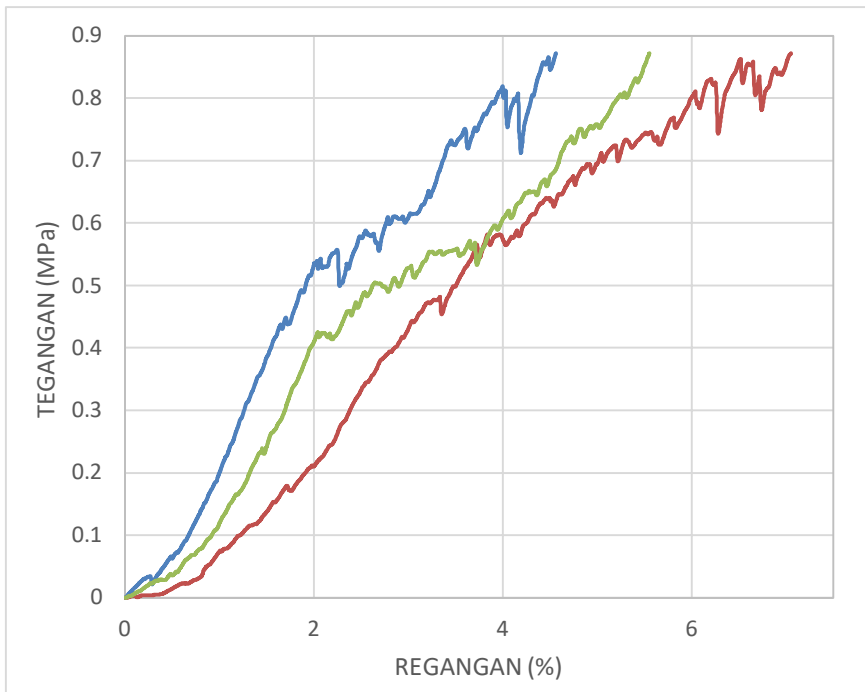
Gambar 4.5. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terendam oleh Air

f. Benda Uji Kondisi Balas Buruk yang Terinfiltrasi Tanah

Tabel 4.10 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan untuk kondisi balas buruk yang telah terinfiltrasi oleh tanah dasar. Adapaun, hasil pengujian berupa grafik tegangan dan regangan material balas ini diberikan dalam Gambar 4.6.

Tabel 4.10. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Tanah

Benda uji	Pembebanan (kgf)	Deformasi (mm)	Regangan (%)	Tegangan (MPa)	Modulus elastisitas (MPa)
Balas buruk yang terinfiltrasi oleh tanah	4001,322	13,687	4,562	0,872	19,118
	4000,744	21,162	7,054	0,8721	12,363
	4002,457	16,668	5,556	0,872	15,703



Gambar 4.6. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Tanah

g. Benda Uji Kondisi Balas Buruk yang Tercampur oleh Air dan Tanah

Parameter uji kuat tekan variasi kondisi balas buruk terendam oleh air dan tanah atau terinfiltrasi oleh lumpur diberikan dalam Tabel 4.11. Penurunan kemampuan balas akibat pembebanan ditampilkan dalam grafik gradasi buruk material balas yang tercampur lumpur. Gambar 4.7 menunjukkan hubungan

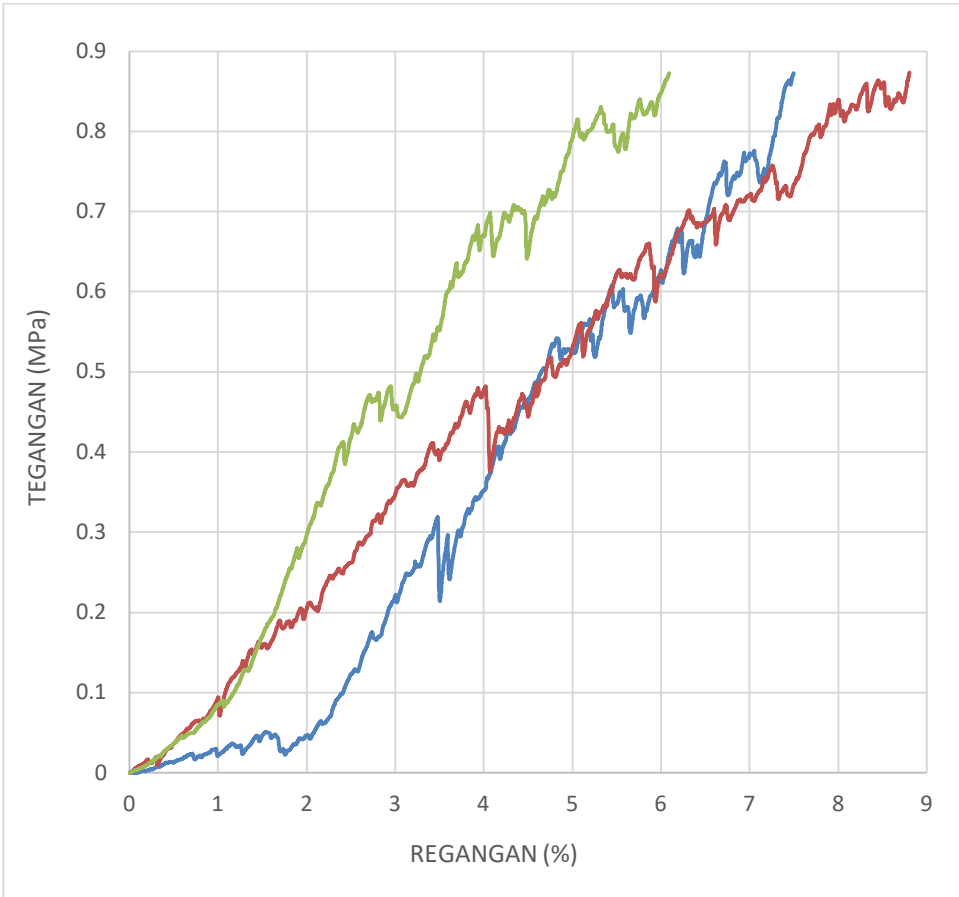
tegangan dan regangan untuk ketiga benda uji material pada kondisi balas buruk yang tercampur lumpur.

Tabel 4.11. Hasil Pengujian Kuat Tekan, Nilai Tegangan dan Regangan dan Modulus Elastisitas pada Material Balas Buruk yang Tercampur Air dan Tanah (Lumpur)

Benda uji	Pembebanan	Deformasi	Regangan	Tegangan	Modulus elastisitas
	(kgf)	(mm)	(%)	(MPa)	(MPa)
Balas buruk yang	4002,782	22,493	7,497	0,872	11,637
tercampur dengan	4005,344	26,412	8,804	0,873	9,9176
lumpur (air dan tanah)	4002,765	18,275	6,091	0,872	14,324

Berdasarkan analisis kuat tekan pada material balas dengan berbagai variasi kondisinya yang telah dilakukan di atas, didapatkan hasil dan pembahasan sebagai berikut:

1. Berat benda uji dipengaruhi oleh pemadatan dan keadaan benda uji yang digunakan yaitu balas bersih dan balas kotor. Dimana berat benda uji balas kotor secara konstan memiliki berat yang lebih tinggi dibandingkan dengan balas bersih karena pada balas kotor masih terdapat kandungan lumpur pada bagian permukaan material, sedangkan balas bersih telah melalui proses pencucian sehingga berat benda uji berkurang.

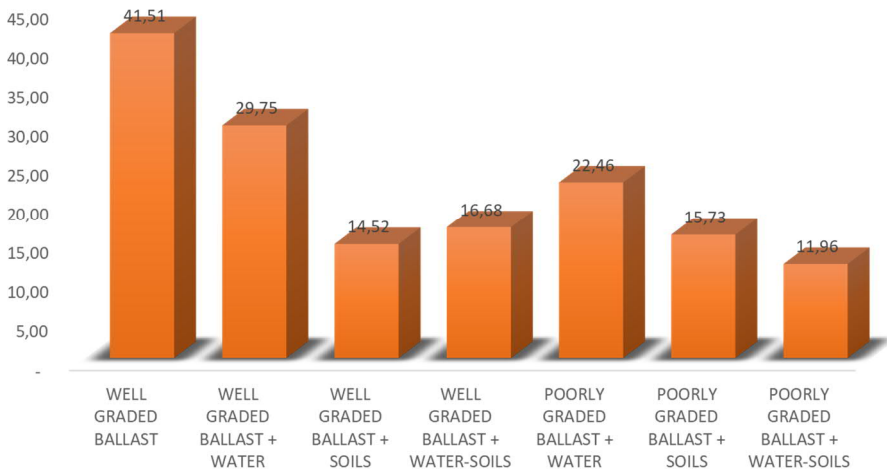


Gambar 4.7. Hubungan Tegangan dan Regangan untuk Kondisi Balas Buruk yang Terinfiltrasi oleh Air dan Tanah (Lumpur)

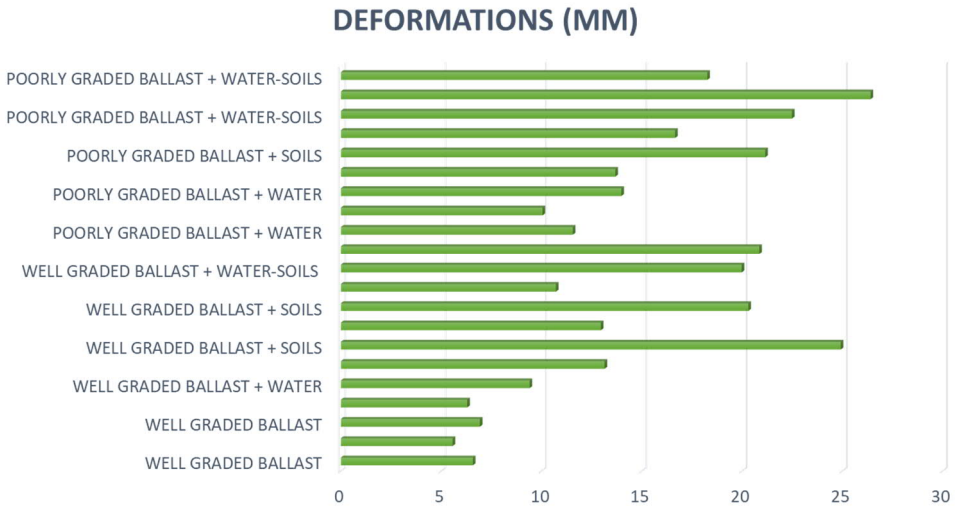
2. Penambahan material air dan tanah (lumpur) pada balas pada penelitian ini mengakibatkan turunannya kemampuan struktur balas terhadap pembebanan yang diberikan dan menghasilkan nilai deformasi terbesar. Hal ini dikarenakan air dan tanah yang mengisi rongga-rongga struktur balas yang menurunkan sifat elastis lapisan balas.
3. Khusus campuran lumpur pada material balas bergradasi buruk, merupakan kondisi material balas dengan nilai tahanan terhadap pembebanan yang

terendah. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi balas kotor (*fouling ballast*) mensimulasikan kondisi balas berdaya dukung rendah. Dengan demikian, tanah dasar akan menerima pembebanan berlebih karena lapisan fondasi sudah terjadi penurunan kemampuannya dalam menahan dan mendistribusikan beban dari perjalanan kereta api.

4. Berikut ini (Gambar 4.7 dan Gambar 4.8) adalah nilai modulus elastisitas rata-rata dan deformasi vertikal permanen yang diperoleh dari masing-masing benda uji dan sampel untuk kondisi balas dengan:
- a. Gradasi Baik = 35,6 Mpa
  - b. Gradasi Baik + Air = 29,75 Mpa
  - c. Gradasi Baik + Tanah = 14,52 Mpa
  - d. Gradasi Baik + Air + Tanah = 16,68 Mpa
  - e. Gradasi Buruk + Air = 22,46 Mpa
  - f. Gradasi Buruk + Tanah = 15,73 Mpa
  - g. Gradasi Buruk + Air + Tanah = 11,96 Mpa



Gambar 4.8. Nilai modulus elastisitas rata-rata dari berbagai kondisi lapisan balas dari hasil uji kuat tekan



Gambar 4.9. Nilai deformasi permanen rata-rata dari berbagai kondisi lapisan balas dari hasil uji kuat tekan

### C. Pengujian Kekakuan di Lapangan dengan Light Wight Deflectometer (LWD)

Perbedaan Tinggi Jatuh Beban Terhadap Pengukuran Modulus Elastisitas LWD (ELWD). Alat *Light Weight Deflectometer* (LWD) memiliki 5 level tinggi beban jatuh (0, 1, 2, 3, 4). Pengujian dilakukan sebanyak dua kali dengan levelling yang berbeda yaitu level 0-1, hal ini dilakukan karena terjadinya clipping ketika diaplikasikan ke beban yang lebih tinggi. *Clipping* terjadi apabila *count* ADC yang merupakan konversi dari *voltage* yang dihasilkan sensor melebihi 1024 untuk tipe-tipe mikrokontroler yang menggunakan 10 bits, hal ini diatasi dengan menurunkan beban yang akan memicu terjadinya gelombang pada lapisan yang diuji. Fenomena ini biasanya terjadi pada pengujian yang mempunyai kekuatan struktural rendah (Siegfried, 2018). Gambar 4.10 menunjukkan kegiatan pengukuran LWD pada ballast box untuk mendapatkan nilai kekakuan setempat (modulus elastisitas reaksi).





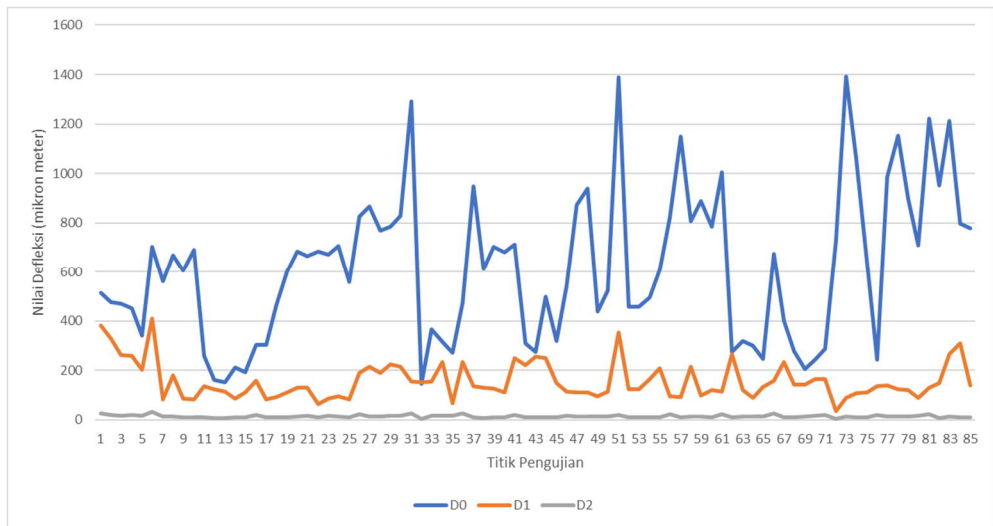
Gambar 4.10. Dokumentasi Pengujian LWD pada Ballast Box

Tiga variasi kondisi balas digunakan sebagai sampel yang digunakan dalam pengujian LWD untuk mendapatkan nilai kekakuan setempat, yaitu kondisi material balas baik dengan gradasi baik yang merepresentasikan kondisi balas yang agregat baik dan bersih, kondisi material balas buruk yang terendam air

yang mewakili kondisi balas buruk yang ditempatkan pada badan jalan rel yang memiliki permukaan air yang dangkal dan kondisi material balas buruk terinfiltrasi tanah yang menggambarkan kondisi ballast fouling (kondisi dimana rongga terisi oleh material tanah/*finer materials*).

a. Sampel Uji dengan Kondisi Material Balas Bergradasi Baik

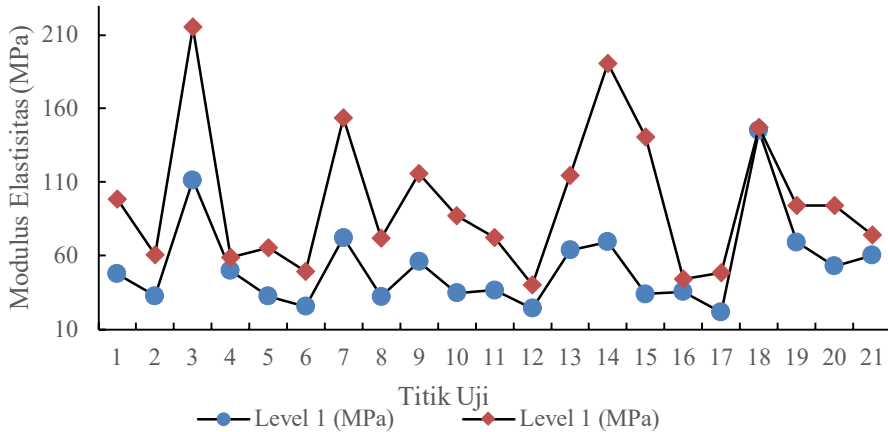
Gambar 4.11 menunjukkan hasil pengukuran defleksi dengan level pembebanan 0, yang dideteksi untuk sensor yang berada tepat di bawah beban, sensor G1 dan G2 yang berjarak antar sensor ditetapkan 90 cm. Grafik lendutan menunjukkan nilai yang fluktuatif khususnya pada level D0, hal ini menunjukkan respon kekakuan lapisan balas yang berbeda yang dimungkinkan disebabkan karena tingkat kepadatan yang berbeda. Nilai defleksi yang tinggi menunjukkan lapisan memiliki nilai kekakuan yang relatif lebih rendah dan demikian sebaliknya.



Gambar 4.12. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Baik

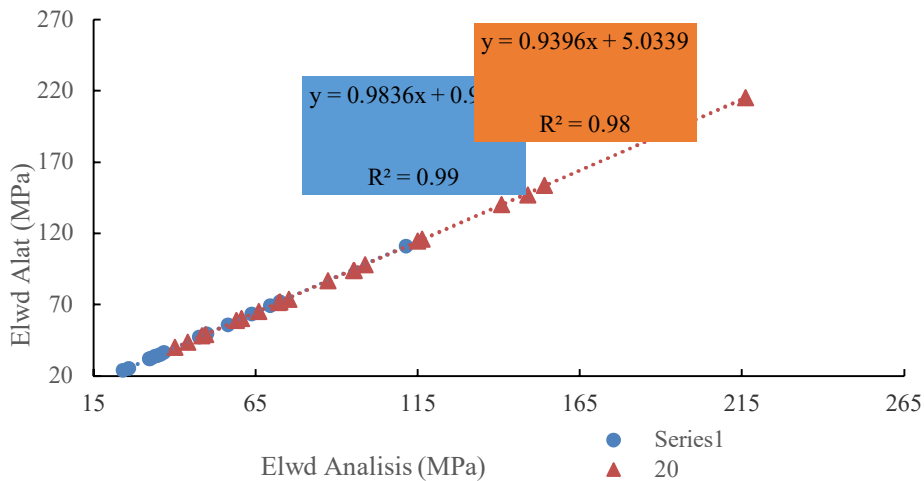
Selanjutnya dari nilai defleksi ini diperoleh modulus kekakuan bahan Berikut gambar di bawah ini adalah grafik perbandingan level 0 dan level 1 untuk pengujian LWD pada lapisan balas bergradasi baik. Nilai rerata untuk modulus

elastisitas dengan level pembebanan 0 sebesar 52,714 MPa, untuk level pembebanan 1 sebesar 97 MPa dan rerata kedua level pembebanan sebesar 74.857 MPa.



Gambar 4.13 Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWD untuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Baik

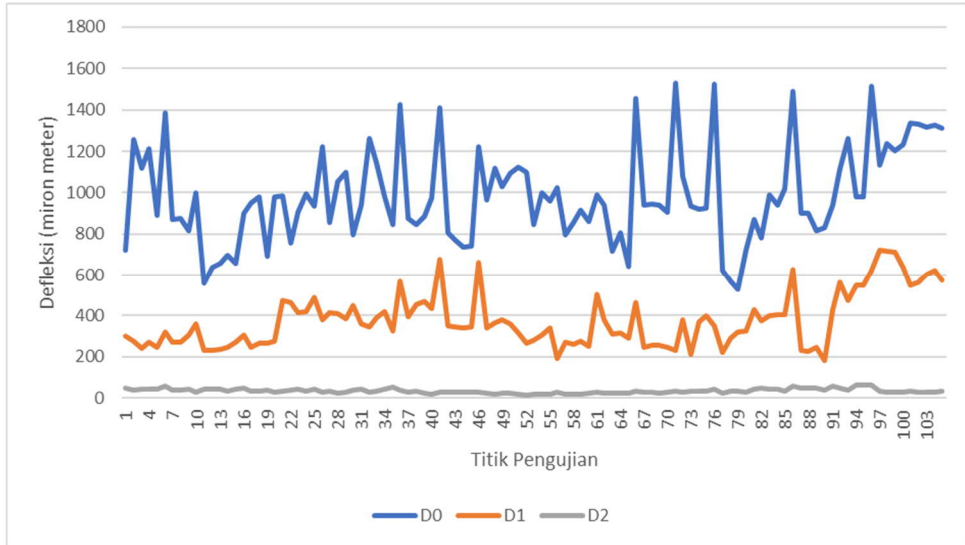
Untuk mengvalidasi hasil pengujian LWD pada lapisan balas baik, dilakukan analisis manual (penurunan analitik), hubungan antara nilai defleksi hasil pengukuran sensor dan perhitungan nilai modulus elastisitas respon setempat dari persamaan *Boussinesq* (Persamaan 3.1). Perbandingan dari hasil pengukuran dan perhitungan diberikan dalam Gambar 4.14 berikut ini. Dari hasil analisis regresi, didapatkan nilai  $R^2$  pada perbandingan level 0 sebesar 0,99 dan level 1 sebesar 0,98, dimana jika nilai  $R^2$  semakin mendekati 1 maka ikatan antar variabel semakin kuat, berlaku sebaliknya. Koefisien penentu atau dalam statistik biasa disebut *coefficient of determinant* adalah indeks yang menyatakan seberapa dekat garis hasil regresi linier dengan data. Hasil analisis menunjukkan bahwa hasil nilai kekakuan LWD mendekati 1 terhadap model perhitungan manual defleksi dengan kata lain memiliki korelasi yang kuat.



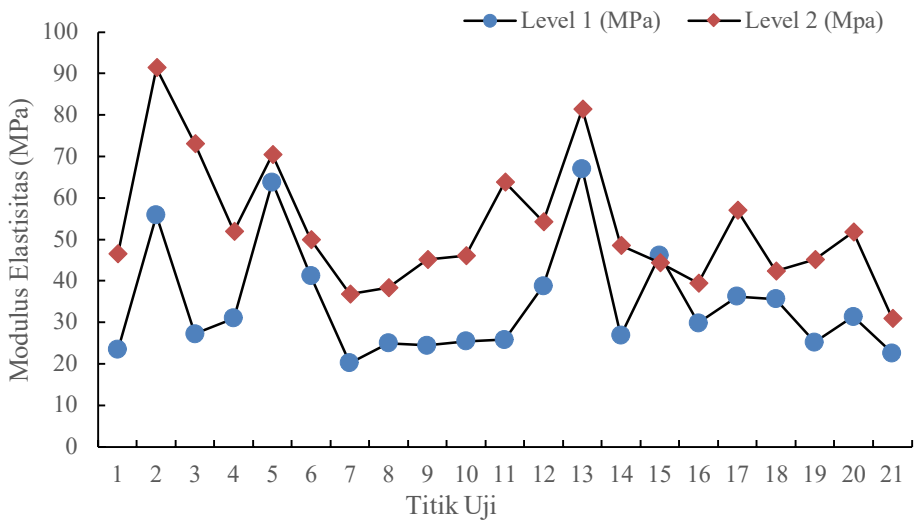
Gambar 4.14 Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi Balas Baik

b. Sampel Uji dengan Kondisi Material Balas Bergradasi Buruk dan Terendam Air

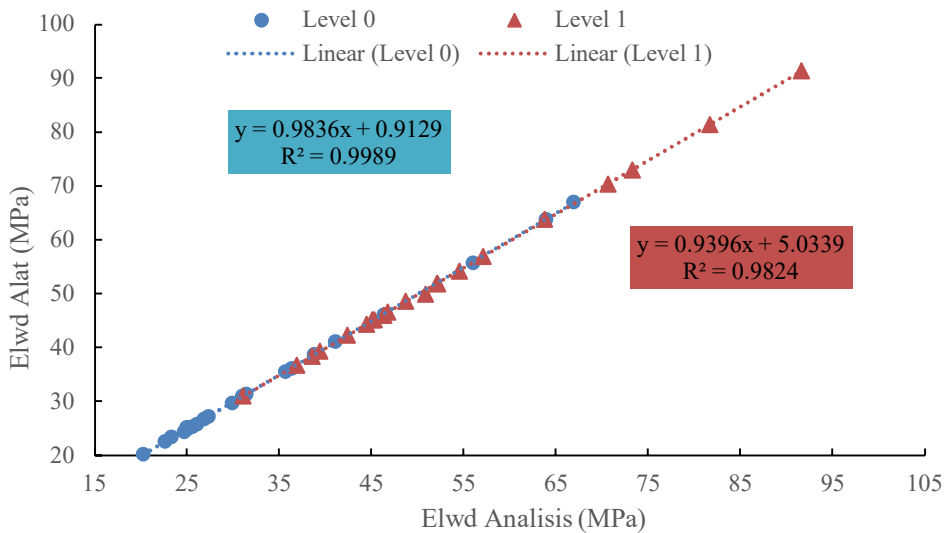
Gambar 4.15 menunjukkan hasil pengukuran defleksi dengan level pembebanan 0, yang dideteksi untuk sensor yang berada tepat di bawah beban, sensor G1 dan G2 yang berjarak antar sensor ditetapkan 90 cm untuk sampel balas bergradasi baik dan terendam oleh air. Sebagaimana kondisi balas baik sebelumnya, hasil defleksi menunjukkan nilai yang fluktuatif yang menjelaskan kepadatan lapisan yang beragam (atau tidak sama). Hasil analisis modulus elastisitas pada pengujian sampel kondisi balas buruk dan terendam air diberikan dalam Gambar 4.16. Hasil ini menunjukkan nilai modulus elastisitas pada pembebanan level 0 sebesar 22,457 MPa, pembebanan level 1 pada 41,752 MPa dan rerata modulus elastisitas 32,104 MPa. Gambar 4.17 menjelaskan validasi pengukuran LWD dengan perhitungan manual defleksi yang menunjukkan nilai korelasi yang tinggi. Hal ini menunjukkan keabsahan hasil pengujian LWD lapangan.



Gambar 4.15. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Buruk dan Terendam Air



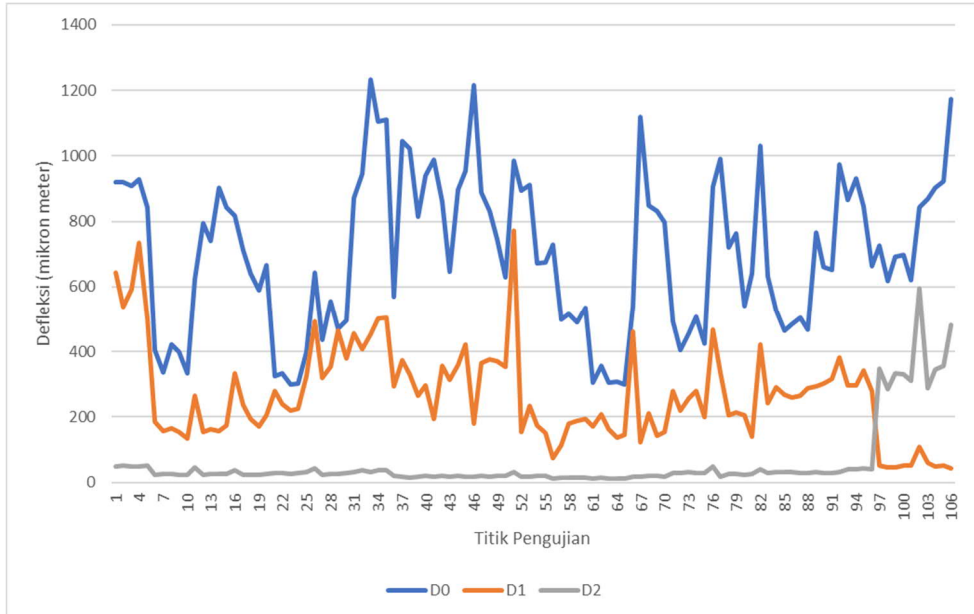
Gambar 4.16 Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWDuntuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Buruk Terendam Air



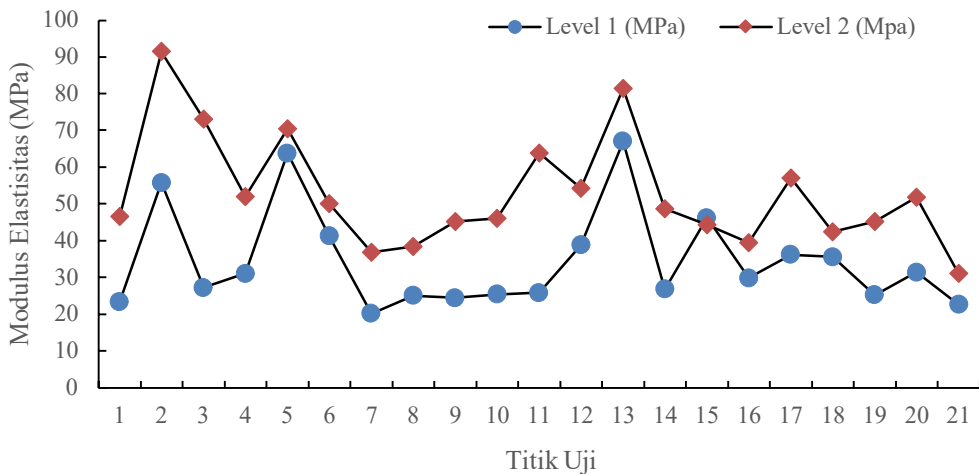
Gambar 4.17 Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi Buruk yang Terendam Air

c. Sampel Uji dengan Kondisi Material Balas Bergradasi Buruk, Terinfiltrasi Tanah

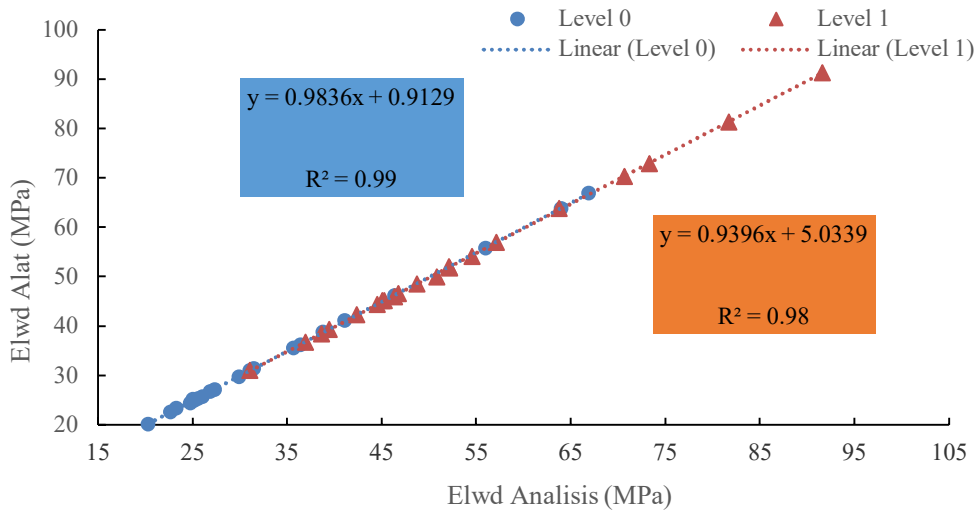
Gambar 4.18 menunjukkan nilai defleksi di bawah beban yang merupakan hasil pengujian dari LWD pada sampel lapisan balas bergradasi buruk dan terinfiltrasi oleh tanah. Hasil modulus kekakuan yang direpresentasikan dari modulus elastisitas yang diperoleh dari analisis defleksi di Gambar 4.18, diberikan pada Gambar 4.19 dengan level pembebanan 0 dan 1. Hasil rerata modulus elastisitas yang didapatkan masing-masing adalah 34,419 MPa untuk level pembebanan 0, 52,809 MPa untuk level pembebanan 1 dan nilai rerata pembebanan sebesar 43,614 MPa. Sebagaimana kondisi balas lainnya, validasi pengukuran LWD dengan perhitungan manual defleksi yang menunjukkan nilai korelasi yang tinggi dan keabsahan hasil pengujian LWD lapangan (Gambar 4.20).



Gambar 4.18. Sebaran Nilai Defleksi pada Level Pembebanan 0 untuk Kondisi Balas Buruk dan Terinfiltrasi Tanah



Gambar 4.19 Hasil Modulus Elastisitas Pengukuran LWD untuk Level Pembebanan 0 dan 1 untuk Kondisi Balas Buruk Terinfiltrasi Tanah



Gambar 4.20 Hubungan Modulus Elastisitas dari Hasil Analisis dan Hasil Pengukuran Lapangan LWD pada Setiap Level untuk Kondisi Buruk yang Terinfiltrasi Tanah



## **BAB 5**

# PENUTUP

### **A. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berat benda uji dipengaruhi oleh pemadatan dan keadaan benda uji yang digunakan yaitu balas bersih dan balas kotor. Dimana berat benda uji balas kotor secara konstan memiliki berat yang lebih tinggi dibandingkan dengan balas bersih karena pada balas kotor masih terdapat kandungan lumpur pada bagian permukaan material, sedangkan balas bersih telah melalui proses pencucian sehingga berat benda uji berkurang.
2. Penambahan material air dan tanah lapisan balas mengakibatkan turunannya kemampuan struktur balas dan mengalami deformasi berlebih pada saat beban diberikan.
3. Data Modulus Elastisitas rata-rata yang diperoleh dari masing-masing 3 sampel pada satu kriteria:
  - h. Gradasi Baik = 35,6 Mpa
  - i. Gradasi Baik + Air = 29,75 Mpa
  - j. Gradasi Baik + Tanah = 14,52 Mpa
  - k. Gradasi Baik + Air + Tanah = 16,68 Mpa
  - l. Gradasi Buruk + Air = 22,46 Mpa
  - m. Gradasi Buruk + Tanah = 15,73 Mpa
  - n. Gradasi Buruk + Air + Tanah = 11,96 Mpa

Berdasarkan hasil pengujian di lapangan maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk pengujian menggunakan LWD (*Light Weight Deflectometer*) terdapat perbedaan modulus yang didapat antara benda uji dengan lapisan material balas bergradasi baik dan bergradasi buruk baik yang terendam air maupun yang tercampur dengan tanah. Untuk rata-rata nilai modulus bergradasi baik memiliki nilai yang tinggi sementara untuk modulus bergradasi buruk yang tercampur tanah maupun terendam air memiliki nilai rata-rata modulus yang lebih kecil.
2. Alat ukur LWD memiliki potensi untuk mendapatkan nilai modulus lapangan bagi lapisan balas, baik untuk kondisi baik maupun buruk. Hal ini ditunjukkan dengan kemampuan alat defleksi LWD untuk membedakan kedua kondisi tersebut. Dengan demikian, teknologi ini dapat direkomendasikan untuk digunakan sebagai alat monitoring kekakuan lapisan balas pada struktur jalan rel.

# DAFTAR PUSTAKA

- Benedetto, A., Tosti, F. and Di Domenico, L. 2012. Elliptic model for prediction of deflection induced by a light falling deflectometer. *Journal of Terramechanics*, 49(1), 1-12.
- Berawi, Abdur Rohim Boy, Delgado, R., Calçada, R., Vale, C. 2010. Evaluating Track Geometrical Quality Through Different Methodologies. *International Journal of Technology* (2010) 1: 38--47, ISSN 2086--9614.
- Brown S. F, Kwan J, Thom N. H. 2007. Identifying the Key Parameters That Influence Geogrid Reinforcement of Railway Ballast. *Geotext Geomembr*, 25:326-35.
- D'Angelo. G. et. al. 2016. Bitumen Stabilized Ballast: A Potential Solution for Railway Track-Bed. *Construction and Building Materials*.
- Elhakim, A.F., Elbaz, K., Amer, M.I. 2013. The use of light weight deflectometer for in situ. *HBRC Journal*, 10, 298-307.
- Estache, Antonio, Gines de Rus. 2000. Privatization and Regulation Transport Infrastructure. Guidelines for Policymakers and Regulators, World Bank, World Bank Institute, Washington, D.C.
- Esveld. C, Markine, V. 2003. Slab Track Design for High-Speed. Delft University of Technology.

- George, V., Rao, N.C., Shivashankar, R. 2009. PFWD, DCP and CBR correlations for evaluation of lateritic subgrades. *International Journal of Pavement Engineering*, 10(3), 189-199.
- Ho CL, Humphrey D, Hyslip J, Moorhead W. 2013. Use of Recycled Tire Rubber to Modify Track Substructure Interaction, Transportation Research Board, Annual Meeting. Washington DC, USA.
- Imad L. Al-Qadi, John Rudy, Jeff Boyle, Erol Tutumluer. 2006. Railroad Ballast Fouling Detection Using Ground Penetrating Radar - A New Approach Based on Scattering from Voids. *Proceeding of 9th European Conference on NDT - September 2006 - Berlin (Germany) (ECNDT 2006)*.
- Indraratna B, Hussaini S. K. K, Vinod J. S. 2013. The Lateral Displacement Response of Geogrid-Reinforced Ballast Under Cyclic Loading. *Geotext Geomembr*, 39:20-9.
- Indraratna B, Khabbaz H, Salim W, Christie D. 2006. Geotechnical Properties of Ballast and The Role of Geosynthetics. *Journal of Ground Improvement*, 19, 91-102.
- Indraratna B, Nimbalkar S, Christie D, Rujikiatkamjom C, dan Vinod J. (2010). Field Assessment of The Performance of A Ballasted Rail Track With and Without Geosynthetics. *Journal of Geotech Geoenvironment Engineering*, 907-17.
- Jitareekul, P., Sawangsuriya, A. and Singhatiraj, P. 2017. Integration of Pavement Layer Evaluation Using LWD for Road Safety Control. *Procedia Engineering* 189,111-117
- Kavussi, A., Rafiei, K., Yasrobi Shahaboddin. 2010. Evaluation of PFWD as Potential Quality Control Tool of Pavement Layers. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16, 123-129.

- Keene A, Edil T. B, Tinjum JM. 2012. Mitigating Ballast Fouling and Enhancing Rail Freight Capacity, National Center for Freight and Infrastructure Research and Education. Report No. CFIRE 06-07. USA: University of Wisconsin-Madison.
- Kennedy J, Woodward P. K, Medero G, Banimahd M. 2013. Construction Building Material, 44:615-25.
- Lamas-Lopez, F., Y.J.Cui, S.Costa D'Aguiar, N.Calon. Geotechnical auscultation of a French. 2016. conventional railway track-bed for maintenance purposes. Soils and Foundations, 56(2), 240-250
- Lidén, T. 2015. Railway Infrastructure Maintenance - A Survey Of Planning Problems And Conducted Research. 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands.
- Liu, et al. 2015. Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro. Hindawi Publishing Corporation, Discrete Dynamics in Nature and Society, Volume 2015, Article ID 473830, 9 pages.
- Liu, G., Zhan Peng, Guoqing Jing, Shilei Wang, Yaonan Li, Yunlong Guo. 2022. Railway Ballast Layer Inspection with Different GPR Antennas and Frequencies. Transportation Geotechnics 36 (2022) 100823
- Mykola Sysyn, Vitalii Kovalchuk, Ulf Gerber, Olga Nabochenko, Bogdan Parneta. 2019. Laboratory Evaluation Of Railway Ballast Consolidation By The Non-Destructive Testing. Komunikacie · Vol. 21 May 2019, DOI: 10.26552/com.C.2019.2.81-88, Hal.81-88.
- Robert De Bold, 2011. Non-Destructive Evaluation of Railway Trackbed Ballast. PhD Thesis: Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering, University of Edinburgh, Scotland.

- Rosyidi, S.A.P. 2016. *Rekayasa Jalan Kereta Api. Tinjauan Struktur Jalan Rel*. LP3M UMY, Yogyakarta.
- Sadeghi, J., Askarinejad, H. 2012. Application of Neural Networks in Evaluation of Railway Track Quality Condition. *IJE Transactions B: Applications*, Vol. 20, No. 3, December 2012.
- Sekretariat Negara. 2011. *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 43 Tahun 2011 Tentang Rencana Induk Perkeretaapian Nasional*
- Selig E. T, Waters J. M. 1994. *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford, London, UK.
- Siegfried. 2018. Penggunaan LWD Pusjatan Pada Jalan Tanah Untuk Pengecekan Kekuatan Tanah. *Jurnal Jalan-Jembatan* 34 (1), 1-7.
- Sol-Sánchez M, Moreno-Navarro F, Rubio-Gámez MC. 2014. Viability of Using End-of Life Tire Pads as Under Sleeper Pads in Railway. *Construction Building Material*, 64, 150-156.
- Sol-Sánchez, M., Thom, N,H., Rubio-Gamez, M,C., dan Airey, G.D. (2015). A Study Into The Use Of Crumb Rubber In Railway Ballast. *Construction and Building Materials*, 75, 19-24.
- Tehrani, F.S., Meehan, C.L. 2010. The effect of water content on light weight deflectometer measurement. In: *Geoflorida 2010: Advances in Analysis, Modelling & Design*, Orlando, 930-939.
- Walls J. C, Galbreath L. L. 1987. Railroad Ballast Reinforcement Using Geogrids, *Proceedings of Geosynthetics*, Vol. 1, p. 38-45, New Orleans, USA.
- Yahya, Qi. 2012. *Identifikasi Penyebab Kantung Balas Pada Jalan Rel Berdasarkan Karakteristik Balas dan Drainase*. Skripsi. Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.