



NASKAH
ILMIAH

PERENCANAAN TIMBUNAN TINGGI



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
JALAN DAN JEMBATAN | 2012

Kementerian Pekerjaan Umum
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

NASKAH ILMIAH

Perencanaan Timbunan Tinggi

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Kementerian Pekerjaan Umum

Diproduksi : Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Kementerian Pekerjaan Umum
Penyusun : Dea Pertiwi, MT
Reviewer : Erza Rismantojo, Ph.D, Ir. Kabul Suwitaatmadja

Cetakan Pertama 2012
Hak cipta dilindungi undang-undang

Kementerian Pekerjaan Umum
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

NASKAH ILMIAH
: Perencanaan Timbunan Tinggi ; --
cet.1—

Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan Kementerian Pekerjaan Umum, 2012.

ISBN : 978 – 602 – 8256 – 83 – 4

KATA PENGANTAR

Buku yang berjudul Perencanaan Timbunan Tinggi ini merupakan kumpulan *technical note* dari kegiatan Penyusunan Naskah ilmiah Perencanaan Timbunan Tinggi pada Kelompok Program Penelitian Pekerjaan dan Perbaikan Tanah pada Tahun 2012.

Buku ini berisikan informasi dan pembahasan mengenai prinsip-prinsip perencanaan timbunan, material dan cara pemadatan material timbunan, sifat-sifat tanah merah sebagai material timbunan, bagaimana menganalisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi, serta proteksi lereng timbunan.

Keberadaan buku ini diharapkan dapat memberikan pemahaman kepada kita tentang perencanaan timbunan tinggi untuk jalan. Kami menyadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat membangun selalu kami harapkan demi kesempurnaan buku ini.

Bandung, Desember 2012

Tim Penulis

DAFTAR ISI

1	PENDAHULUAN.....	1
1.1	Latar belakang	1
1.2	Tujuan.....	3
1.3	Sistematika bab	3
2	PRINSIP- PRINSIP DASAR DAN KRITERIA PERENCANAAN	
	TIMBUNAN	6
2.1	Pembatasan masalah	6
2.2	Prinsip perencanaan.....	6
2.3	Kriteria deformasi.....	8
2.4	Kriteria stabilitas.....	15
2.5	Kriteria pemadatan dan kekuatan timbunan	17
2.6	Kriteria gempa.....	22
	2.6.1 Peraturan gempa di Indonesia	22
	2.6.2 Pendekatan kesetimbangan batas	22
2.7	Kriteria material timbunan tanah.....	25
3	MATERIAL DAN PEMADATAN TIMBUNAN	26
3.1	Gambaran umum material timbunan	26
3.2	Sifat-sifat pemadatan timbunan tanah	27
	3.2.1 Indeks Kepadatan.....	29
	3.2.2 Kepadatan Relatif.....	29
	3.2.3 Air Voids Content.....	30
3.3	Hubungan antara pemadatan dan Air Voids Content terhadap potensi kolaps.....	32
3.4	Hubungan antara pemadatan dan kompresi timbunan....	36
4	SIFAT-SIFAT TANAH MERAH SEBAGAI MATERIAL TIMBUNAN	39
4.1	Proses pembentukan tanah merah.....	39
4.2	Program pengujian sifat-sifat tanah merah	48
	4.2.1 Pengambilan contoh tanah merah.....	48

4.2.2	Kadar air lapangan dan batas Atterberg tanah merah	53
4.2.1	Klasifikasi tanah merah	57
4.2.2	Nilai kepadatan dan CBR	58
4.2.3	Nilai kuat geser.....	62
4.2.4	Sifat pemampatan dari uji konsolidasi	69
4.2.5	Penghitungan Air Void Content	69
4.3	Rangkuman sifat-sifat tanah merah.....	69
5	STABILITAS DAN DEFORMASI TIMBUNAN	72
5.1	Penampang melintang timbunan standar	72
5.2	Tahapan analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi	74
5.3	Analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi dengan metode elemen hingga	76
5.3.1	Model geometri dan pembebanan timbunan tinggi	76
5.3.2	Model numerik timbunan tinggi.....	78
5.3.1	Parameter analisis stabilitas dan deformasi	86
5.3.2	Validasi respon tegangan-regangan di dalam program elemen hingga.....	89
5.4	Pembahasan hasil analisis	91
5.4.1	Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 1 (kepadatan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)	91
5.4.2	Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)	96
5.4.3	Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 3 (dengan penambahan sandwich layer).....	100

6	PROTEKSI LERENG	107
6.1	<i>Vetiver System (VS)</i>	107
6.2	Prinsip stabilisasi lereng dengan Vetiver System	113
6.2.1	Perencanaan dan teknik yang sesuai.....	113
6.2.2	Penerapan yang tepat	114
6.2.3	Pemeliharaan menyeluruh.....	114
6.3	Kelebihan dan kekurangan dari Vetiver System	114
6.4	Aplikasi Vetiver System dengan material lain	115
7	PENUTUP	116
7.1	Sifat-sifat tanah merah.....	116
7.2	Prediksi kinerja timbunan.....	116
7.3	Saran untuk perencanaan Timbunan Tinggi.....	117
7.4	Saran untuk penelitian lanjutan.....	119

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Kriteria penurunan timbunan (DPU, 2002)	8
Tabel 2-2 Klasifikasi Perencanaan Jalan Tipe II (Dit.Bina Marga, 1982)	8
Tabel 2-3 Kriteria kinerja timbunan selama masa layan/ kondisi SLS (diadopsi dari SCDOT, 2008)	11
Tabel 2-4 Kriteria kinerja ketidakstabilan timbunan pada kondisi terekstrim (EE I) (diadopsi dari SCDOT, 2008)	13
Tabel 2-5 Kriteria kinerja penurunan timbunan pada kondisi terekstrim (EE I) (diadopsi dari SCDOT, 2008)	15
Tabel 2-6 Kriteria pemadatan dan kekuatan timbunan	18
Tabel 2-7 Kriteria gempa	24
Tabel 2-8. Rangkuman Persyaratan Timbunan Tanah Menurut DPU (2010)	25
Tabel 3-1. Evaluasi umum pada tanah sebagai material jalan	26
Tabel 3-2 Rangkuman dari penelitian-penelitian mengenai potensi kolaps	35
Tabel 4-1 Lokasi Pengambilan Contoh Tanah Laterit	49
Tabel 4-2 Kadar air lapangan contoh tanah merah	54
Tabel 4-3. Kuat geser hasil pengujian Triaxial CU	63
Tabel 4-4 Plot jarak PI-0.73 (LL-20) terhadap garis A di dalam grafik plastisitas Wesley	65
Tabel 4-5 Rangkuman hasil uji laboratorium dan penghitungan AV contoh Tanjung Sari	70
Tabel 5-1 Kemiringan standar lereng berdasarkan material timbunan dan tinggi timbunan	73
Tabel 5-2 Jenis Analisis dalam Plaxis (Plaxis BV, 2005)	80
Tabel 5-3. Analisis untuk Material <i>Undrained</i> (Surarak, 2010)	81
Tabel 5-4. Input Parameter <i>Hardening Soil</i> (Surarak 2010)	84
Tabel 5-5 Parameter analisis material timbunan sesuai spesifikasi	87

Tabel 5-6 Parameter analisis material timbunan yang tidak sesuai spesifikasi.....	87
Tabel 5-7 Parameter dan model material untuk analisis stabilitas dan deformasi timbunan dengan sandwich layer	88
Tabel 6-1 Jenis tanaman berdasarkan kemiringan lereng (Pd.T-04-2002-B)	107
Tabel 6-2 Perkembangan aplikasi VS sebagai proteksi lereng	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Ilustrasi penurunan (potongan A-A) (SCDOT, 2008).....	12
Gambar 2-2 Profil penurunan timbunan (SCDOT, 2008)	12
Gambar 2-3 Ilustrasi penurunan vertikal dan lateral akibat ketidakstabilan global timbunan	14
Gambar 2-4 Skema perubahan faktor keamanan sepanjang umur timbunan (DPU ⁴ , 2002)	23
Gambar 3-1 Contoh kurva kompresi dari uji potensi kolaps (ASTM D 5333-92)	33
Gambar 3-2. Pengaruh pemadatan relatif (R,dalam (TRRL, 1952 di dalam DPU ² , 2006).....	37
Gambar 4-1 Penampang Vertikal Proses Pembentukan Laterit.....	39
Gambar 4-2 Gambaran Umum Geologi Pulau Jawa (Wesley, 2012)	40
Gambar 4-3 Penyebaran Laterit di Pulau Jawa (Wesley, 2012).....	42
Gambar 4-4 Peta Geologi Regional Jawa Barat (Sampurno, 1976).....	44
Gambar 4-5 Peta Geologi Daerah Transisi antara Jawa Tengah dan Jawa Timur (Van Bemmelen, 1948)	46
Gambar 4-6 Peta Batuan Vulkanis Jawa Timur (Badan Geologi).....	47
Gambar 4-7 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Barat	50
Gambar 4-8 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Tengah.....	51
Gambar 4-9 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Timur	52
Gambar 4-10 Penimbangan Berat Contoh Tanah dalam Krus (Dok. Pusjatan, 2012)	53
Gambar 4-11. Plot Data LL dan PI Tanah Merah pada Kurva Plastisitas Wesley (2010)	55
Gambar 4-12. Plot data hasil pengujian tanah merah pada kurva AASHTO	56
Gambar 4-13 Uji pemadatan standar dan CBR.....	60
Gambar 4-14 Uji pemadatan modified dan CBR	61

Gambar 4-15 Sudut geser efektif dan posisinya pada grafik plastisitas (Wesley, 2010)	64
Gambar 4-16. Hubungan c' dan nilai CBR dengan kepadatan standar	66
Gambar 4-17. Hubungan ϕ' dan nilai CBR	67
Gambar 4-18. Hubungan c dalam kondisi tegangan total dan nilai CBR Standar	68
Gambar 5-1 Tinggi timbunan menurut DPU (2006).....	74
Gambar 5-2 Tahapan analisis stabilitas dan deformasi.....	75
Gambar 5-3 Model geometri timbunan tinggi	77
Gambar 5-4 Geometri sandwich layer.....	77
Gambar 5-5 Tipe Analisis dalam Metode Elemen Hingga (Surarak, 2010)	79
Gambar 5-6. Penentuan Parameter Hardening Soil (Plaxis BV, 2005)	84
Gambar 5-7. Contoh Plot E_{50} dan σ_3'	86
Gambar 5-8 Kurva tegangan-regangan untuk variasi tegangan 50 kPa, 100 kPa dan 150 kPa di Triaxial CU berbanding dengan tegangan-regangan model Mohr-Coulomb dan Hardening-Soil	90
Gambar 5-9 Stabilitas timbunan Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)	93
Gambar 5-10 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)	94
Gambar 5-11 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)	95
Gambar 5-12 Stabilitas timbunan Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga)	97
Gambar 5-13 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga).....	98
Gambar 5-14 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga)	99

Gambar 5-15 Contoh sistem pelapisan (<i>sandwich</i>) untuk timbunan (Suwitaatmadja, tidak bertahun).....	100
Gambar 5-16 Stabilitas timbunan Kondisi 3 , timbunan dengan sandwich layer dibandingkan dengan tanpa sandwich layer.....	102
Gambar 5-17 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 3 timbunan dengan sandwich layer dibandingkan dengan tanpa sandwich layer.....	103
Gambar 5-18 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 3 timbunan dengan sandwich layer dibandingkan dengan tanpa sandwich layer.....	104
Gambar 5-19 Perbandingan grafik penurunan timbunan terhadap waktu	105
Gambar 5-20 Profil tekanan air pori pada as timbunan (keterangan: tekanan air pori negatif = eksesi)	106
Gambar 6-1 Rumput vetiver (Paul Trong, 2008 di dalam Pusjatan, 2009)	108
Gambar 6-2 Penahan limpas (<i>run-off</i>) dan pengendapan tanah oleh Vetiver (R. Wijayakusuma, 2007 di dalam Pusjatan, 2009).....	109
Gambar 6-3 Aplikasi VS pada lereng galian terjal	113

GLOSARI

<i>Highways</i>	Jalan bebas hambatan
<i>Serviceability Limit State (SLS)</i>	Kondisi batas layan
<i>Extreme Event limit state (EE)</i>	Kondisi batas ekstrim
<i>Vertical settlement</i>	Penurunan pada arah vertikal
<i>Longitudinal settlement</i>	Penurunan pada arah longitudinal
<i>Lateritic soil</i>	Tanah laterit
<i>Profile grade (PG)</i>	Profil grade
<i>Extreme Event I (EE I)</i>	Kondisi terekstrim I
<i>Unconsolidated Undrained (UU)</i>	Tak terkonsolidasi dan tak terdrainase
<i>Consolidated Undrained (CU)</i>	Terkonsolidasi dan tak terdrainase
<i>Small fill</i>	Timbunan kecil
<i>Medium fill</i>	Timbunan sedang
<i>Large fill</i>	Timbunan besar
<i>Limit equilibrium approach</i>	Pendekatan kesetimbangan batas
<i>Density index</i>	Indeks kepadatan
<i>Relative density</i>	Kepadatan relatif
<i>Soaked</i>	Terendam
<i>Unsoaked</i>	Tak direndam
<i>ZAV-line</i>	Garis Zero Air Voids
<i>Swelling</i>	Mengembang
<i>Clay fill</i>	Timbunan tanah lempung
<i>Volumetric strain</i>	Regangan volumetrik
<i>Collapse Potential</i>	Potensi kolaps
<i>Suction</i>	Hisapan
<i>Double oedometer test</i>	Uji konsolidasi identik
<i>Tropical red clays</i>	Lempung merah tropis
<i>Moist tamping</i>	Metode pemadatan di dalam cetakan triaxial
<i>Confining pressure</i>	Tekanan pengekan

1 Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Pada kurun waktu 2003-2011 terdapat kecenderungan pembangunan jalan di atas timbunan yang relatif tinggi. Di beberapa lokasi, hal ini harus dilakukan karena adanya kendala waktu, biaya, ketersediaan material timbunan, dan kondisi topografi di lapangan. Contoh konstruksi jalan yang dibangun di atas timbunan tinggi adalah beberapa ruas Jalan Tol Cipularang, Jalan Lingkar Nagreg, dan Jalan Tol Semarang – Bawen. Tinggi timbunan pada lokasi-lokasi tersebut mencapai 40 m sehingga berpotensi menimbulkan permasalahan yang berhubungan dengan deformasi dan stabilitas timbunan.

Deformasi timbunan jalan diakibatkan oleh berbagai macam mekanisme dan proses. Deformasi lokal yang besar dapat terjadi misalnya akibat ketidakstabilan badan timbunan maupun tanah pondasinya. Selain itu deformasi akibat penurunan konsolidasi yang terjadi pada badan timbunan dan atau tanah pondasi akan menjadi masalah ketika jalan melewati struktur kaku seperti jembatan atau ketika timbunan mempunyai tinggi yang bervariasi.

Masalah stabilitas dan deformasi timbunan sangat dipengaruhi oleh hasil pemadatan di lapangan. Kuat geser timbunan yang ditargetkan dapat dicapai di lapangan melalui pemadatan yang baik. Untuk timbunan dari tanah berbutir kasar kepadatan yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah distribusi ukuran butirannya. Timbunan dari tanah kohesif salah satu parameter yang berpengaruh adalah nilai kadar air tanah pada saat pelaksanaan pemadatan. Deformasi (penurunan) akibat konsolidasi timbunan sendiri merupakan faktor yang harus dipertimbangkan jika menggunakan tanah kohesif dengan kadar air di atas kadar air optimum

sehingga perlu ditentukan batas atas kadar air. Timbunan yang dipadatkan pada kadar air di atas kadar air optimum cenderung memiliki koefisien permeabilitas yang rendah sehingga proses konsolidasi yang mungkin terjadi akan membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan timbunan yang dipadatkan pada kadar air yang lebih rendah.

Selain itu, hasil pemadatan juga berpengaruh terhadap tingkat kerentanan potensi kompresi kolaps pada saat terjadi penjenjutan tanah timbunan oleh air. Potensi kompresi kolaps umumnya terjadi pada tanah timbunan tak jenuh yang kurang padat atau yang dipadatkan pada kadar air di bawah kadar air optimum. Penjenjutan pada tanah timbunan diakibatkan misalnya oleh air permukaan dari hujan atau dari saluran air yang retak meresap kedalam tanah menyebabkan terjadinya kompresi kolaps dan penurunan lokal. Kompresi kolaps dapat terjadi tanpa terduga beberapa tahun setelah konstruksi timbunan selesai dan penurunan lokal yang terjadi dapat menyebabkan kerusakan konstruksi perkerasan di atasnya.

Semakin tinggi timbunan maka semakin besar pula resiko terjadinya hal-hal yang dibahas di atas. Oleh karena itu, konstruksi timbunan tinggi membutuhkan perencanaan yang rinci dan pelaksanaan yang hati-hati. Saat ini, pedoman perencanaan timbunan tinggi (termasuk kriteria kinerja) belum tersedia dan acuan yang digunakan dalam konstruksi adalah Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 3 (DPU, 2010). Di dalam spesifikasi tersebut tercantum persyaratan pemilihan material timbunan, nilai kadar air tanah pada saat pemadatan, dan nilai California Bearing Ratio (CBR) tanah hasil pemadatan sehingga perlu dikaji apakah spesifikasi umum tersebut dapat memenuhi kriteria kinerja konstruksi timbunan tinggi.

Adapun metodologi kegiatan di dalam penelitian ini secara garis besar adalah studi literatur, kegiatan eksperimental (uji laboratorium dan verifikasi lapangan), analisis sensitivitas parameter perencanaan, dan pemodelan numerik dengan metode elemen hingga.

Kajian perencanaan timbunan tinggi di dalam naskah ilmiah ini dibatasi dengan asumsi tanah dasar mempunyai daya dukung yang cukup sehingga metode perbaikan tanah dasar tidak diulas dalam naskah ilmiah ini. Di samping itu jenis tanah yang dikaji difokuskan hanya pada tanah merah yang banyak terdapat di Indonesia dan telah sering digunakan sebagai bahan timbunan.

1.2 Tujuan

Dari latar belakang tersebut, naskah ilmiah ini bertujuan untuk mengkaji aspek-aspek perencanaan yang dibutuhkan dalam perencanaan timbunan tinggi. Aspek-aspek perencanaan timbunan tinggi tersebut mencakup kriteria kinerja, persyaratan stabilitas dan deformasi timbunan.

Dalam naskah ilmiah ini juga dikaji perilaku tanah merah jika digunakan sebagai bahan timbunan tinggi. Kajian ini dilakukan mengingat ketersediaannya yang melimpah dan telah sering digunakan di Indonesia, khususnya di Jawa. Selain itu, tanah merah merupakan tanah spesifik yang mempunyai sifat mekanis yang sangat baik. Tanah merah yang digunakan dalam kajian ini merupakan material yang memenuhi persyaratan timbunan biasa menurut Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 3 (DPU, 2010).

1.3 Sistematika bab

Buku naskah ilmiah ini terbagi menjadi lima bab sebagai berikut:

1. Bab 1: Pendahuluan

Bab 1 berisi latar belakang kegiatan penelitian, tujuan dibuatnya naskah ilmiah serta sistematika bab yang akan dibahas.

2. Bab 2: Prinsip-prinsip dasar dan kriteria perencanaan timbunan

Bab 2 membahas mengenai prinsip-prinsip perencanaan yang mencakup kriteria stabilitas dan deformasi timbunan dari berbagai pedoman dan

spesifikasi. Dalam bab ini juga diulas hubungan antara batasan tinggi timbunan terhadap syarat material, kepadatan dan kekuatan timbunan dari beberapa referensi. Selain itu, bab ini secara singkat mengulas mengenai kriteria gempa dan kriteria material timbunan tanah di dalam spesifikasi umum. Bab 2 merupakan pengantar dan menjadi dasar bagi kajian yang diuraikan secara lebih mendalam pada Bab 3, Bab 4 dan Bab 5.

3. Bab 3: Material dan Pemadatan Timbunan

Bab 3 membahas mengenai gambaran umum material timbunan, sifat-sifat pemadatan timbunan, grafik klasifikasi Wesley (2010) serta deskripsi geologi dan mineralogi tanah vulkanik sebagai material timbunan. Pada bab ini juga dibahas hubungan antar parameter-parameter pemadatan. Selain itu dibahas pula secara singkat mengenai perilaku timbunan lainnya yang perlu menjadi perhatian perencanaan yaitu potensi kolaps dan kompresi timbunan dan air voids content.

4. Bab 4: Sifat-sifat tanah merah sebagai material timbunan

Bab 4 membahas mengenai proses pembentukan tanah merah, sifat-sifat tanah merah, dan program pengujian untuk tanah merah. Di dalam bab 4 juga disampaikan rangkuman sifat-sifat tanah merah dari hasil pengujian.

5. Bab 5: Stabilitas dan deformasi timbunan

Bab 5 berisi pembahasan mengenai penampang-penampang melintang timbunan dari berbagai literatur sebagai acuan dalam analisis. Di dalam bab 5 juga diuraikan secara detail hasil analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi dengan menggunakan metode elemen hingga. Pembahasan hasil analisis disampaikan dalam bentuk grafik hasil evaluasi kinerja timbunan tinggi dan timbunan tinggi dengan sandwich layer.

6. Bab 6: Proteksi lereng

Bab 6 membahas proteksi permukaan lereng timbunan menggunakan rumput vetiver.

7. Bab 7: Penutup

Bab 7 berisi kesimpulan dari hasil pengkajian pustaka, pengujian laboratorium dan evaluasi kinerja timbunan tinggi. Dalam bab Penutup ini juga disampaikan saran untuk perencanaan timbunan tinggi serta saran untuk penelitian lanjutan.

2 Prinsip- Prinsip Dasar dan Kriteria Perencanaan Timbunan

2.1 Pembatasan masalah

Di dalam naskah ilmiah ini hanya akan dibahas prinsip-prinsip dasar dan kriteria perencanaan timbunan dengan asumsi tanah dasar mempunyai daya dukung yang cukup sehingga metode perbaikan tanah dasar tidak diulas. Pengkajian jenis tanah timbunan difokuskan hanya pada tanah merah yang banyak terdapat di Indonesia dan telah sering digunakan sebagai bahan timbunan.

2.2 Prinsip perencanaan

Secara prinsip, timbunan jalan harus dapat menyediakan ruang yang dibutuhkan untuk pergerakan lalu lintas dengan aman dan dapat mendukung beban lalu lintas yang disalurkan padanya melalui perkerasan (DPU, 2006). Material timbunan jalan umumnya berasal dari tanah atau batuan yang terbentuk secara alami sehingga mempunyai sifat-sifat yang bermacam-macam.

Selain itu, konstruksi timbunan dilaksanakan di bawah kondisi cuaca sehingga sangat dipengaruhi oleh karakter musiman dari cuaca, curah hujan, air rembesan dan sebagainya. Oleh karena itu, agar timbunan dapat berfungsi sesuai dengan yang direncanakan, diperlukan tindakan yang tepat agar timbunan dapat memenuhi kriteria stabilitas dan deformasi (penurunan).

Agar timbunan dapat berfungsi sesuai rencana, DPU (2007) memberikan persyaratan utama timbunan adalah sebagai berikut:

1. Timbunan harus mempunyai kemampuan untuk menyebarkan beban lalu lintas yang berulang secara memadai tanpa mengalami deformasi atau penurunan,
2. Timbunan harus mempunyai stabilitas yang cukup terhadap faktor perusak seperti curah hujan, air rembesan, dan gempa.

Deformasi timbunan dapat diakibatkan oleh instabilitas lereng, penurunan tanah dasar akibat konsolidasi, dan penurunan akibat kompresi timbunan itu sendiri. Stabilitas lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah daya dukung tanah dasar, kemiringan lereng timbunan, kekuatan dan kepadatan timbunan.

Penurunan yang disebabkan oleh konsolidasi tanah dasar dari tanah organik atau tanah kohesif dengan kadar air tinggi biasanya cukup besar dan cenderung berlanjut untuk waktu yang lama setelah dilalui lalu lintas. Besarnya penurunan akibat kompresi timbunan bervariasi tergantung pada jenis material, tinggi timbunan dan derajat pemadatan.

ARUP (2007) menyebutkan bahwa selain penurunan total, potensi terjadinya penurunan diferensial juga perlu dievaluasi pada tahap perencanaan. Penurunan diferensial dapat terjadi pada timbunan dengan tinggi yang bervariasi (misalnya timbunan antara dua bukit), antara timbunan pendekat dan abutmen jembatan, antara timbunan lama dan timbunan baru pada kasus pelebaran jalan, dan akibat adanya lokasi tanah dasar lunak.

Selain masalah stabilitas dan penurunan, ARUP (2007) menambahkan bahwa faktor potensi kembang susut dan penurunan kolaps (*collapse settlement*) perlu dipertimbangkan dalam perencanaan timbunan. Kembang susut terjadi terutama pada tanah lempung dengan plastisitas tinggi pada saat perubahan musim. Saat musim hujan, lempung plastisitas tinggi akan mengembang dan saat musim kering lempung akan menyusut sehingga menyebabkan kerusakan pada perkerasan.

Penurunan kolaps adalah pengurangan volume yang terjadi pada timbunan yang kurang padat ketika mengalami penjenruhan. Pada timbunan,

penjenuhan tersebut dapat diakibatkan misalnya oleh rembesan air hujan maupun kebocoran drainase sehingga menyebabkan penurunan lokal yang besar. Dari penjelasan di atas, maka sub bab berikut membahas mengenai penurunan, stabilitas, dan pemadatan. Potensi penurunan kolaps dan kompresi timbunan dibahas secara lebih rinci pada Bab 3.

2.3 Kriteria deformasi

Kriteria deformasi (penurunan) selama masa konstruksi serta kecepatan penurunan yang disyaratkan oleh DPU (2001) dapat dilihat di dalam Tabel 2-1, dimana s adalah jumlah penurunan selama masa konstruksi dan s_{tot} adalah penurunan total yang diperkirakan. Akan tetapi kriteria ini berlaku untuk timbunan jalan di atas tanah dasar yang lunak.

Tabel 2-1 Kriteria penurunan timbunan (DPU, 2002)

Kelas Jalan	Penurunan yang Disyaratkan selama Masa Konstruksi, s/s_{tot}	Kecepatan Penurunan setelah Konstruksi (mm/tahun)
I	> 90%	< 20
II	> 90%	< 25
III	> 90%	< 30
IV	> 90%	< 30

Ditjen Bina Marga (1982) menjelaskan klasifikasi perencanaan jalan Kelas I sampai IV dan besar volume Lalu-lintas Harian Rata-rata (LHR) di dalam Tabel 2-2. Klasifikasi Jalan Tipe II yang dimaksud adalah klasifikasi sebagian atau tanpa pengaturan jalan masuk.

Tabel 2-2 Klasifikasi Perencanaan Jalan Tipe II (Dit.Bina Marga, 1982)

Fungsi	LHR	Kelas
Primer	Arteri	I
	Kolektor ≥ 10.000 ≤ 10.000	I II
Sekunder	Arteri ≥ 20.000 ≤ 20.000	I II
	Kolektor ≥ 6.000 ≤ 6.000	II
		III
	Lokal ≥ 500 ≤ 500	III
		IV

Kriteria penurunan tanah timbunan lainnya yang pernah diterapkan di Indonesia adalah kriteria penurunan untuk jalan tol Cipularang (Djajaputra,A., dkk.). Kriteria tersebut mensyaratkan penurunan maksimum timbunan jalan sebesar 10 cm untuk timbunan jalan dan 4 cm untuk timbunan oprit.

Berbeda dengan kriteria di Indonesia, SCDOT (2008) memberikan kriteria penurunan total, penurunan diferensial dan laju penurunan pada kondisi batas layan (*Serviceability Limit State*, SLS) dan kondisi batas ekstrim (*Extreme Event Limit State*, EE) untuk kasus timbunan, pelebaran dan transisi antara jembatan dan timbunan. Pada naskah ilmiah ini yang dibahas adalah hanya untuk kasus timbunan.

Kriteria SLS diperlihatkan pada Tabel 2-3 sedangkan kriteria EE disajikan pada Tabel 2-4 dan Tabel 2-5. Gambar 2-1 dan Gambar 2-2 merupakan ilustrasi penurunan timbunan pada arah vertikal dan arah memanjang jalan untuk digunakan bersama dengan Tabel 2-3.

Kriteria penurunan dalam SCDOT (2008) dibuat berdasarkan kelas jalan dengan memperhitungkan umur rencana minimum, penurunan vertikal selama umur rencana, laju penurunan per tahun, serta penurunan diferensial vertikal maksimum. Kelas jalan tersebut dibagi menjadi tiga klasifikasi yang disebut sebagai *Roadway structure Operational Classification* (ROC).

ROC dikembangkan khususnya untuk perencanaan timbunan jalan dan struktur di sepanjang jalan bebas hambatan (*highways*). Klasifikasi tersebut berhubungan langsung dengan klasifikasi operasional jembatan atau *Bridge Operational Classification* (OC) dengan menghubungkan jarak timbunan dan struktur terhadap jembatan. Pembagiannya adalah sebagai berikut:

1. **ROC I** adalah timbunan jalan atau struktur (dinding penahan tanah, dll) yang berlokasi 45,72 m dari jembatan dengan Kategori I (OC I), dinding kaku dengan tinggi > 4,57 m dan dinding fleksibel dengan tinggi > 15,24 m.

2. **ROC II** adalah timbunan jalan atau struktur (dinding penahan tanah, dll) yang berlokasi 45,72 m dari jembatan dengan Kategori II (OC = II).
3. **ROC III** adalah timbunan jalan atau struktur (dinding penahan, dll.) yang berlokasi 45,72 m dari jembatan kategori III (OC = III) atau berlokasi lebih jauh dari 45,72 m dari jembatan dengan mengabaikan klasifikasi jembatannya.

SCDOT (2008) lebih lanjut menjelaskan ketiga kategori yang disebutkan di atas sebagai berikut:

- **Kategori I (OC I)**, adalah jembatan - jembatan standar antar wilayah termasuk jembatan yang memenuhi kriteria sebagai:
 - Struktur yang tidak memiliki akses putar balik (*detour*)
 - Struktur dengan akses putar balik lebih panjang dari 40 km
 - Struktur dengan umur rencana > 75 tahun
- **Kategori II (OC II)**, adalah jembatan-jembatan yang tidak termasuk ke dalam Kategori I dan memenuhi kriteria:
 - Lalu lintas Harian Rata-rata (LHR) diproyeksikan ≥ 500
 - LHR diproyeksikan < 500, dengan panjang jembatan ≥ 55 m, atau panjang bentang individual $\geq 18,3$ m
- **Kategori III (OC III)**, adalah semua jembatan yang tidak termasuk ke dalam Kategori I dan II.

Jika dihubungkan dengan kriteria dari DPU (2002) dan Dit. Bina Marga (1982), maka jalan dengan SCDOT (2008) Kategori II adalah jalan lokal dengan kelas jalan III dan IV dengan LHR ≥ 500 dan < 500. Dengan demikian, jalan Kelas I dan II diasumsikan masuk ke dalam jalan Kategori I berdasarkan SCDOT (2008).

Kriteria yang kedua yaitu penurunan minimum dan maksimum dalam arah lateral dan vertikal badan jalan yang disyaratkan pada kondisi batas ekstrimnya atau disebut juga sebagai *Extreme Event / Limit State (EE- I)*

seperti diperlihatkan pada Tabel 2-4 dan Tabel 2-5. Ilustrasi dari penjelasan pada tabel-tabel tersebut dapat dilihat pada Gambar 2-1, 2-2, dan 2-3.

Tabel 2-3 Kriteria kinerja timbunan selama masa layan/ kondisi SLS
(diadopsi dari SCDOT, 2008)

Arah penurunan	Deskripsi batasan kinerja Kondisi Batas Layan (Service Limit State, SLS)	ROC		
		I (Jalan Kelas I dan Kelas II)	II (Jalan Kelas III dan Kelas IV)	III
	Umur Rencana Minimum (Tahun)	100	100	100
Longitudinal (memanjang)	Penurunan vertikal (total) maksimum di sepanjang profil kelas jalan selama umur rencana timbunan, Δ_v (mm)	203.2	203.2	406.4
	Laju penurunan per tahun setelah konstruksi perkerasan selesai (mm/tahun)	2.54	2.54	5.08
	Penurunan diferensial vertikal maksimum yang terjadi di sepanjang profil jalan setelah konstruksi perkerasan selesai. (milimeter per 15 m panjang longitudinal timbunan)	25.4	38.1	50.8

Profil Grade (PG) untuk jalan tanpa median umumnya terletak di bagian tengah jalan, sebagaimana diperlihatkan pda Gambar 2-1. Gambar 2-1 merupakan potongan yang diambil dari Gambar 2-2 dalam arah melintang jalan (potongan A-A). Penurunan yang dievaluasi adalah penurunan di bagian tengah timbunan, dimana penurunan maksimum dan diferensial maksimum umumnya terjadi.

Kriteria kinerja berikutnya dari SCDOT (2008) adalah kriteria kinerja timbunan pada kondisi terekstrim I atau *Extreme Event I* (EE I) yaitu kondisi kestabilan paling kritis serta menyertakan pengaruh gempa. Tujuan ditetapkannya kriteria kinerja ini adalah mempertahankan lalu-lintas kendaraan dan hanya berdasarkan pada timbunan yang mendukung perkerasan jalan. Tabel 2-4 memperlihatkan kriteria kinerja dan Gambar 2-3 memperlihatkan ilustrasi penurunan pada arah vertikal dan lateral akibat ketidakstabilan global timbunan.

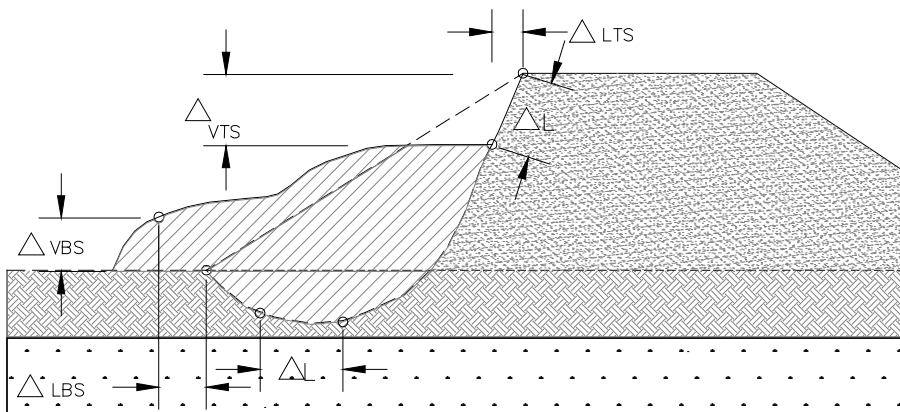
Tabel 2-4 Kriteria kinerja ketidakstabilan timbunan pada kondisi terekstrim (EE I) (diadopsi dari SCDOT, 2008)

Arah penurunan	Kinerja Kondisi Batas Ekstrim I (EE I Limit State)	Gempa desain	ROC		
			I (Jalan Kelas I dan Kelas II)	II (Jalan Kelas III dan Kelas IV)	III
Vertikal	Deformasi vertikal maksimum pada bagian atas bidang keruntuhan lereng, Δ_{VTS} (mm)	Untuk mempertahankan fungsi jalan	25.4	50.8	101.6
		Untuk keselamatan pengguna jalan	50.8	101.6	203.2
	Deformasi vertikal maksimum pada bagian bawah bidang keruntuhan lereng, Δ_{VBS} (mm)	Untuk mempertahankan fungsi jalan	25.4	50.8	101.6
		Untuk keselamatan pengguna jalan	50.8	101.6	203.2
Lateral*	Deformasi lateral maksimum pada bagian atas bidang keruntuhan lereng, Δ_{LTS}	Untuk mempertahankan fungsi jalan	76.2	152.4	609.6
		Untuk keselamatan pengguna jalan	101.6	304.8	1524

Arah penurunan	Kinerja Kondisi Batas Ekstrim I (<i>EE I Limit State</i>)	Gempa desain	ROC		
			I (Jalan Kelas I dan Kelas II)	II (Jalan Kelas III dan Kelas IV)	III
	(mm)				
	Deformasi lateral maksimum pada bagian bawah bidang keruntuhan, Δ_{LBS} lereng (mm)	Untuk mempertahankan fungsi jalan	76.2	152.4	609.6
		Untuk keselamatan pengguna jalan	101.6	304.8	1524

Keterangan:

*) penurunan pada arah ketidakstabilan global timbunan



Keterangan gambar:

Δ_{VTS} adalah penurunan vertikal maksimum pada bagian atas bidang keruntuhan

Δ_{VBS} adalah penurunan vertikal maksimum pada bagian bawah bidang keruntuhan

Δ_{LTS} adalah penurunan lateral maksimum pada bagian atas bidang keruntuhan

Δ_{LBS} adalah penurunan lateral maksimum pada bagian bawah bidang keruntuhan

Gambar 2-3 Ilustrasi penurunan vertikal dan lateral akibat ketidakstabilan global timbunan

Tabel 2-5 memperlihatkan kriteria kinerja penurunan timbunan pada kondisi terekstrim atau EE I.

Tabel 2-5 Kriteria kinerja penurunan timbunan pada kondisi terekstrim (EE I)
(diadopsi dari SCDOT, 2008)

Arah penurunan	Kinerja Kondisi Batas Ekstrim I (EE I Limit State)	Gempa desain	ROC		
			I (Jalan Kelas I dan Kelas II)	II (Jalan Kelas III dan Kelas IV)	III
Longitudinal (memanjang)	Penurunan diferensial vertikal maksimum pada arah memanjang badan jalan setelah konstruksi jalan selesai (mm per 15 m panjang longitudinal timbunan)	Untuk mempertahankan fungsi jalan	25.4	38.1	50.8
		Untuk keselamatan pengguna jalan	50.8	76.2	101.6

2.4 Kriteria stabilitas

Kriteria stabilitas mengikuti pedoman-pedoman perencanaan yang menyebutkan bahwa untuk analisis stabilitas lereng timbunan digunakan faktor keamanan (FK) $\geq 1,30$. Panduan Geoteknik 4 (2002) memberikan faktor keamanan minimum untuk analisis stabilitas sebesar 1,40 untuk jalan kelas I dan kelas II, dan faktor keamanan minimum sebesar 1,30 untuk jalan kelas III.

DPU (2006) memberikan faktor keamanan minimum untuk analisis stabilitas sebesar 1,20, namun ditunjukkan pula bahwa pada kasus timbunan dengan tinggi 10 m digunakan FK $\geq 1,25$.

Penentuan kriteria stabilitas timbunan ini terkait dengan pemilihan jenis pengujian untuk mendapatkan parameter perencanaan serta pemilihan metode analisisnya. DPU (2006) menyarankan, sebagai berikut:

- Analisis tegangan total dilakukan, apabila:
 - Timbunan dengan tinggi $\leq 5\text{m}$ dari tanah kohesif dengan koefisien permeabilitas rendah, parameter kekuatan geser tanah timbunannya ditentukan dengan cara uji triaksial UU. Meningkatnya kekuatan akibat konsolidasi tidak diharapkan untuk timbunan dengan tinggi hingga 5m. dan analisis stabilitas dengan metoda tegangan total.
 - Timbunan dengan tinggi $> 5\text{m}$ dari tanah kohesif dengan koefisien permeabilitas rendah, parameter kekuatan geser tanah timbunannya ditentukan dengan cara uji triaksial CU.
 - Timbunan dengan koefisien permeabilitas tinggi, parameter kekuatan geser tanah timbunannya ditentukan dengan cara uji triaksial CD.
- Analisis tegangan total, dilakukan apabila:
 - Timbunan kohesif dengan koefisien permeabilitas rendah parameter kekuatan geser tanah timbunannya ditentukan dengan cara uji triaksial CU.
 - Timbunan kohesif dengan koefisien permeabilitas tinggi parameter kekuatan geser tanah timbunannya ditentukan dengan cara uji triaksial CD.

Konstruksi-konstruksi timbunan di jalan tol Cipularang (2005) menggunakan faktor keamanan minimum tanpa beban gempa untuk timbunan di Kelas Jalan I dan II, $FK \geq 1,30$, dan Kelas Jalan III $FK \geq 1,25$ (tidak ada hunian sekitar). Analisis stabilitas jangka pendek tanah dasar lunak menggunakan parameter kuat geser tanah tak teralirkan (*undrained shear strength*) dari hasil pengujian triaksial UU atau CU. Analisis stabilitas jangka panjang tanah

dasar keras menggunakan parameter kuat geser tanah efektif dari hasil pengujian triaksial CU atau CD.

2.5 Kriteria pemadatan dan kekuatan timbunan

Sejumlah literatur (1982-2011) memiliki definisi yang berbeda untuk penentuan batas tinggi timbunan yang berhubungan dengan kondisi tanah dasar, jenis material dan kriteria pemadatan timbunan seperti diperlihatkan pada Tabel 2-6. Selain itu, teridentifikasi dua literatur (DPU, 2010 dan DPU, 2002) yang secara eksplisit mensyaratkan kekuatan timbunan berdasarkan nilai CBR dan parameter kuat geser.

Dari rangkuman Tabel 2-6 dapat disimpulkan bahwa timbunan dengan tinggi lebih dari 3 m memerlukan analisis stabilitas di dalam perencanaannya. Kategori tinggi timbunan sendiri bervariasi dari tinggi (H) lebih 15 m, sampai dengan H lebih dari 25 m. Selain itu Tabel 2-6 dapat menyimpulkan hal-hal berikut:

- Dari seluruh pedoman yang dikaji, WSDOT (2010), PDDM (2008) dan Indian Standard (2007) mensyaratkan batas minimum yang paling rendah untuk timbunan yang memerlukan analisis stabilitas. Batas tinggi timbunan yang harus dilakukan analisis stabilitas tersebut adalah 3m.
- Sebanyak lima pedoman dan spesifikasi menjadikan 15 m sebagai suatu batasan. Tinggi timbunan 15 m memerlukan pemadatan non-standar, nilai CBR yang lebih tinggi, dan disebut *large fill* serta mensyaratkan faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan timbunan yang lebih rendah dari 15m.
- Spesifikasi Umum Bina Marga (DPU, 2010) hanya mensyaratkan nilai CBR, rentang kadar air terhadap kadar air optimum serta derajat kepadatan. Akan tetapi kriteria tersebut tidak dihubungkan dengan tinggi timbunan.

Tabel 2-6 Kriteria pemadatan dan kekuatan timbunan

Acuan	Kriteria	Persyaratan
TRH 9 Construction of Road Embankments (1982)	Tinggi timbunan (dengan kemiringan 1V: 1,5H)	CBR minimum pada 100% pemadatan Modified:
	• 0 – 6 m	• Tidak ada pembatasan
	• 6 – 9 m	• 3%
	• 9 – 15 m	• 5%
	• > 15 m	• 7%
FHWA Highway Slope Maintenance and Slide Restoration Workshop Participant Manual (1988)	Timbunan kecil (<i>small fill</i>) ≤ 6 m	Tidak diberikan
	Timbunan sedang (<i>medium fill</i>) $6 \leq H \leq 15$ m	
	Timbunan besar (<i>large fill</i>) > 15 m	
Military Soil Engineering USA FM 5-410 Soil Compaction (1992)	Tinggi timbunan < 15 m	Area lalu-lintas kendaraan:
		• Timbunan non kohesif ($PI \leq, LL < 25$) : 95% pemadatan • Timbunan kohesif ($PI > 5$) : 90% pemadatan
		Bukan area lalu-lintas kendaraan:
		• Timbunan non kohesif: 90% pemadatan • Timbunan kohesif: 85% pemadatan
EM 1110-2-1902 Slope Stability (2003)	Tinggi timbunan > 15 m di atas tanah dasar lunak	Faktor keamanan minimum di akhir konstruksi harus lebih tinggi.

Acuan	Kriteria	Persyaratan
PT. Jasa Marga Spesifikasi Proyek Jalan Tol Cipularang (2005)	• Tinggi timbunan ≤ 15 m	• 95% kepadatan kering maksimum Standar
	• $15 < \text{Tinggi timbunan} \leq 25$ m	• 95% kepadatan kering maksimum Standar tetapi pemasangan perkerasan harus 6 bulan setelah 2/3 tinggi timbunan selesai, bila tidak harus dipadatkan 95 % Modified
	• Tinggi timbunan > 25 m	• 95% MDD Modified
Geo Kentucky Government Geotechnical Manual (2005)	• Tinggi timbunan badan jalan > 6 m	• Perlu analisis stabilitas
	• Tinggi timbunan oprib jembatan > 6 m	• Perlu analisis stabilitas
DPU Panduan Manajemen Pekerjaan Tanah (2006)	Tinggi timbunan maksimum dari material vulkanik disyaratkan 5 m, jika lebih dari 5 m perlu analisis stabilitas	Berdasarkan material: • Tanah dasar, kepadatan kering maksimum $\geq 90\sim 95\%$ • Urugan/bahan timbunan, kepadatan kering maksimum $\geq 85\sim 90\%$ • Tanah lempungan, kepadatan kering maksimum $85\sim 95\%$
Indian Standard (IS) IRC:SP:73-2007 Manual, Specification & Standar (2007)	• Tinggi timbunan ≤ 3 m • Tinggi timbunan ≥ 3 m	• Kepadatan kering maksimum dengan pemadatan berat $\geq 15,2 \text{ kN/m}^3$; Kepadatan relatif $\geq 95\%$ • kepadatan kering maksimum dengan pemadatan berat $\geq 16,0 \text{ kN/m}^3$; Kepadatan relatif

Acuan	Kriteria	Persyaratan
California DOT Highway Design Manual, Chapter 610 Pavement Design Considerationsp.610-15 (2008)	Tidak diberikan batasan	Kepadatan relatif material timbunan harus $\geq 95\%$ harus dipenuhi untuk minimum 0,76 m di bawah elevasi akhir timbunan, sepanjang lebar badan jalan dan lebar tambahan sebesar 0,9 m di kedua sisi jalan. 
PDDM Chapter 6, Earthworks, Analysis and Design (2008)	Tinggi timbunan > 3 m	Perlu analisis stabilitas lereng
FHWA Design Manual (2006-2008)	Tidak diberikan batasan	Sekurang-kurangnya 95%, kecuali untuk timbunan terluar dengan jarak horisontal 1,5 m dari sisi lereng.
Manual Of Contract Documents For Highway Works, Volume 1 Specification For Highway Works (2009)	Tidak diberikan batasan tinggi timbunan	Timbunan kohesif biasa (<i>general cohesive materials</i>) - Tidak disebutkan derajat kepadatannya, hanya disyaratkan menggunakan Pemadatan Standar. Timbunan kohesif pilihan (<i>selected cohesive materials</i>) 100% kepadatan kering maksimum dengan

Acuan	Kriteria	Persyaratan
		Pemadatan Standar, atau Kepadatan kering dengan kondisi Air Void (AV) 5% pada kadar air lapangan (pilih nilai terkecil dari keduanya)
Ditjen Bina Marga DPU Spesifikasi Umum (2010)	Tidak diberikan batasan tinggi timbunan	- Dipadatkan pada kadar air Wopt-3 dan Wopt+1 - CBR 6% (timbunan biasa) - CBR 10% (timbunan pilihan) 95% kepadatan kering maksimum
WSDOT Geotechnical Design Manual M 46-03.01 Chapter 9 Page 9-9 (2010)	Timbunan badan jalan: - Tinggi timbunan ≤ 3 m (2H:1V), didesain dengan asumsi tidak ada masalah tanah dasar - Tinggi timbunan > 3 m atau timbunan di atas tanah lunak, perlu analisis stabilitas lereng	Timbunan badan jalan: 90% kepadatan kering maksimum untuk pemadatan timbunan per 20 cm, kecuali untuk 0,6 m teratas timbunan, dimana tebal yang harus dicapai adalah 10 cm dengan 95% kepadatan kering maksimum.
	Timbunan pada oprit jembatan: Tidak ada pembatasan tinggi, perlu analisis stabilitas lereng	Tidak diberikan persyaratan

2.6 Kriteria gempa

Percepatan gempa di batuan dasar dapat mengakibatkan gaya-gaya inersia yang signifikan pada lereng atau timbunan, dan gaya-gaya tersebut memicu ketidakstabilan ataupun deformasi permanen.

Anderson, D.G., et.al. di dalam NCHRP Report 611 (2008) memberikan kriteria perencanaan gempa untuk timbunan. Adapun timbunan yang dimaksud adalah timbunan dengan kemiringan lereng 2H:1V sampai dengan 3H:1V. Tinggi timbunan jalan bervariasi hingga mencapai 15 m, sedangkan tinggi timbunan oprit (pendekat) hingga mencapai lebih dari 10 m.

2.6.1 Peraturan gempa di Indonesia

Pada tahun 2010 di bawah koordinasi Kementerian Pekerjaan Umum telah dibuat Peta Gempa Indonesia yang terdiri dari peta percepatan puncak (PGA) dan respon spektra percepatan 0.2 detik dan 1.0 detik di batuan dasar (SB) yang mewakili tiga level hazard (potensi bahaya) gempa setara 500, 1000 dan 2500 tahun. Level hazard yang diakomodasi adalah kemungkinan terlampaui 10% dalam 50 tahun, 10% dalam 100 tahun, dan 2% dalam 50 tahun.

2.6.2 Pendekatan kesetimbangan batas

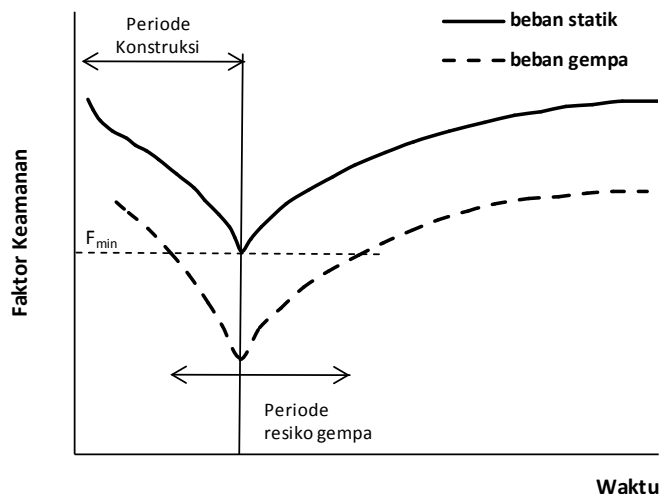
Analisis kinerja lereng dan timbunan selama beban gempa bekerja dapat dilakukan dengan dua metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium approach*).

Dengan menggunakan pendekatan kesetimbangan batas (*limit equilibrium approach*), tipikalnya lereng timbunan disebut aman apabila memiliki faktor keamanan atau $FK > 1,1 - 1,3$. $FK > 1,0$ saat menggunakan koefisien gempa puncak tidak menimbulkan pergerakan lereng, sedangkan $FK < 1,0$ menimbulkan pergerakan yang permanen. Dengan demikian disyaratkan agar FK selalu $> 1,1 - 1,3$ agar deformasi yang terjadi dapat dikurangi.

SCEC guidelines (2002) menyarankan agar mengurangi percepatan gempa di California hingga menjadi 0,3 – 0,6 (tergantung dari besar gempa dan PGA) untuk memastikan pergerakan lerengnya sebesar < 15 cm.

DPU⁴ (2002) menyebutkan bahwa jika suatu proyek konstruksi memiliki nilai strategis maka beban gempa harus dimasukkan ke dalam analisis untuk mencapai faktor keamanan sesuai persyaratan atau melakukan suatu analisis resiko keruntuhan dengan pendekatan yang ditunjukkan pada Gambar 2-4. Walaupun demikian akibat meningkatnya faktor keamanan minimum timbunan terhadap beban statis selama pelaksanaan (secara skematis seperti terlihat pada Gambar 2-4), akan sangat tidak beralasan untuk menambahkan kondisi beban gempa secara penuh pada proses analisis dan perencanaan.

DPU⁴ (2002) masih menggunakan enam zona gempa berdasarkan SNI-T14-1990-03 di dalam perencanaan. Percepatan gempa diperoleh dengan menghubungkan zona tersebut dengan tipe tanah dan frekuensi dasar (*fundamental frequency*) seperti yang diperlihatkan di dalam Tabel 2-7.



Gambar 2-4 Skema perubahan faktor keamanan sepanjang umur timbunan (DPU⁴, 2002)

Perubahan terhadap DPU⁴ (2002) diakomodir di dalam peta gempa Indonesia tahun 2010, namun hingga saat ini masih dalam tahap finalisasi khususnya untuk persyaratan faktor keamanan terhadap gempa untuk timbunan jalan.

Sembilan literatur memberikan angka koefisien gempa dan syarat faktor keamanan yang berbeda-beda, seperti yang diperlihatkan di dalam Tabel 2-7.

Tabel 2-7 Kriteria gempa

Acuan	Koefisien gempa	Persyaratan Faktor Keamanan
Corps Engineering Manual EM-111-2-1902 (1982)	0,10	Gempa utama (major), FK > 1,0
Corps Engineering Manual EM-111-2-1902 (1982)	0.15	Gempa besar, FK > 1,0
Acuan Jepang	0,15 – 0,25	FK > 1,0
State of California-Southern California Earthquake Center Guidelines (SCEC) (2002)	0,05 – 0,15	FK > 1,1
Seed (1979)	0,15	FK > 1,15 dan 20% pengurangan kekuatan
Marcuson & Franklin (1983)	$1/3 - 1/2$ PGA	FK > 1,0
Hynes & Franklin (1984)	$1/2$ PGA	FK > 1,0 dan 20% pengurangan kekuatan
DPU ⁴ (2002)	0,07 – 0,23 Berlaku untuk enam zona gempa di Indonesia (SNI-T-14-1990-03)	Tidak dinyatakan
DPU (2010)	Respon spektra percepatan 0.2 detik dan 1.0 detik di batuan dasar mewakili tiga level hazard (potensi bahaya) gempa setara 500, 1000 dan 2500 tahun.	Kemungkinan terlampauinya level hazard 10% dalam 50 tahun, 10% dalam 100 tahun, dan 2% dalam 500 tahun FK belum dinyatakan

2.7 Kriteria material timbunan tanah

Dalam Spesifikasi Umum Divisi 3.2 (DPU, 2010), timbunan tanah masuk dalam kategori Timbunan Biasa. Akan tetapi, untuk lereng atau pekerjaan stabilisasi timbunan atau pada situasi lainnya yang memerlukan kuat geser yang cukup, Timbunan Pilihan juga termasuk sebagai timbunan tanah karena DPU (2010) mensyaratkan penggunaan timbunan batu atau kerikil lempungan bergradasi baik atau lempung pasir atau lempung berplastisitas rendah untuk kasus ini.

Persyaratan timbunan tanah yang merupakan kategori Timbunan Biasa dan Timbunan Pilihan menurut DPU (2010) diperlihatkan pada Tabel 2-8.

Tabel 2-8. Rangkuman Persyaratan Timbunan Tanah Menurut DPU (2010)

	Timbunan Biasa	Timbunan Pilihan
Syarat material	- Tidak termasuk tanah: A-7-6 (SNI-03-6797-2002), CH, OL, OH dan Pt (USCS), derajat pengembangan "<i>very high</i>" atau "<i>extra high</i>" (AASHTO T258), tanah ekspansif dengan nilai aktif > 1.25 (Van Der Merwe) - CBR > 6 (CBR setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100 % MDD). - Tidak mempunyai kadar air alamiah sangat tinggi yang tidak praktis dikeringkan (>OMC+1%).	- Memenuhi ketentuan Timbunan Biasa - CBR paling sedikit 10.% setelah 4 hari perendaman bila dipadatkan sampai 100% kepadatan kering maksimum
Pemadatan timbunan	- Pemadatan timbunan: kadar air bahan berada dalam rentang - 3 % sampai +1% dari kadar air optimum - 30 cm di bawah elevasi tanah dasar harus dipadatkan sampai 95 % dari kepadatan kering maksimum	
Pengendalian mutu bahan	- Untuk setiap 1000 meter kubik bahan timbunan yang diperoleh dari setiap sumber bahan paling sedikit harus dilakukan suatu pengujian Nilai Aktif. - Pengujian kepadatan harus dilakukan pada setiap lapis timbunan yang dipadatkan	

3 Material dan Pemadatan Timbunan

3.1 Gambaran umum material timbunan

Tanah yang paling ideal sebagai material timbunan adalah tanah yang mudah dikerjakan dan yang memiliki sifat kuat geser yang tinggi dan kompresibilitas yang rendah. Namun karena secara ekonomis tidak mungkin hanya memilih dan menggunakan material yang berkualitas terbaik, maka material yang tersedia tetap perlu digunakan. Walaupun tidak ideal, hal ini tetap bisa dilakukan dengan memanfaatkan keahlian mendesain, termasuk menerapkan metode stabilisasi atau perkuatan tanah.

DPU (2006) memberikan acuan awal pemilihan kesesuaian setiap jenis tanah sebagai material timbunan seperti diperlihatkan pada Tabel 3-1. Sebagai catatan, acuan tersebut merupakan adopsi dari pedoman Jepang.

Tabel 3-1. Evaluasi umum pada tanah sebagai material jalan

Klasifikasi Tanah dengan <i>Japan Unified Soil Classification</i>	Material Timbunan	Material Tanah Dasar	Tanah Fondasi untuk Timbunan	Keterangan
Massa batuan (<i>cobblestones</i>)	Δ	X	O	Kategori penggunaan tergantung pada derajat pemecahan
Kerikil (G)	O	O	O	Yang mengandung bahan organik atau tanah halus vulkanik (GO, BV) digolongkan ke dalam Δ untuk material timbunan dan fondasi timbunan
Tanah berkerikil/kerikilan (GF)	O	Δ	O	
Pasir (S)	O	O	O	Digolongkan ke dalam Δ untuk material fondasi

Klasifikasi Tanah dengan Japan Unified Soil Classification	Material Timbunan	Material Tanah Dasar	Tanah Fondasi untuk Timbunan	Keterangan
Tanah pasiran	O	Δ	O	timbunan di atas tanah lepas/gembur dan jenuh air Yang mengandung bahan organik atau tanah halus vulkanik (SO, SV) digolongkan ke dalam Δ untuk material timbunan dan fondasi timbunan
Lanau (M)	Δ	Δ	Δ	
Tanah lempungan (C)	Δ	Δ	Δ	
Tanah kohesif vulkanik (V)	Δ	Δ	Δ	
Tanah organik (O)	Δ	X	Δ	
Tanah organik tinggi (Pt)	X	X	Δ	

Keterangan:

O: kurang lebih tidak ada masalah; Δ: gunakan dengan hati-hati atau memerlukan perlakuan khusus; X: tidak boleh digunakan.

Catatan: (Massa batuan/cobblestone) tidak termasuk ke dalam Japan Unified Soil Classification.

Material tanah merah yang saat ini telah banyak dipertimbangkan sebagai timbunan jalan karena ketersediaannya di Indonesia lebih banyak dibandingkan dengan material lain seperti pasir atau kerikil. Tanah merah ini bersifat spesifik karena mempunyai karakteristik mekanis yang lebih baik dibandingkan tanah lempung sedimen.

3.2 Sifat-sifat pemadatan timbunan tanah

Pemadatan tanah didefinisikan sebagai proses dimana butiran-butiran tanah dipaksa untuk lebih rapat melalui pengurangan rongga udara akibat usaha mekanis. Tanah yang dipadatkan pada kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum, secara definisi memiliki angka pori terkecil dan jumlah

udara yang tertinggal di dalam rongga tidak dapat dikurangi lagi oleh energi pemadatan yang diberikan. Ini berarti bahwa setelah pemadatan sifat tanah sulit untuk berubah akibat rembesan karena rongga yang tertinggal sukar menyerap air.

Sementara itu kekuatan tanah yang dipadatkan berubah tergantung pada partikel tanah atau kadar air. Namun umumnya segera setelah pemadatan, kekuatan maksimum, ketahanan terhadap deformasi dan kompresibilitas minimum dicapai pada kadar air yang agak lebih rendah daripada kadar air optimum. Hal ini khususnya terlihat pada kasus tanah berbutir halus yang sifatnya pada dasarnya dipengaruhi oleh tingkat kadar airnya.

Apabila jenis tanah ini tergenang air, maka tanah tersebut akan mengembang karena rongga udaranya yang relatif lebih besar dibandingkan dalam keadaan kadar air optimum dan kepadatan kering maksimumnya. Akibatnya, kekuatan tanah ini menurun bila dibandingkan dengan kekuatan yang dicapai dalam keadaan kadar air maksimum dan kepadatan kering maksimumnya.

Sebaliknya, tanah yang dipadatkan pada tingkat kadar air yang sedikit lebih tinggi daripada kadar air optimumnya memiliki sedikit rongga udara yang dapat diisi oleh air karena penyerapan air. Oleh karena itu, tanah ini kemungkinan besar mengalami sedikit perubahan pada kekuatannya karena tergenang air, namun kekuatannya lebih rendah daripada tanah yang dipadatkan pada kepadatan kering maksimumnya.

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kepadatan kering dari uji pemadatan di lapangan, adalah:

- Kadar air
- Input energi pemadatan
- Volume tanah padat
- Karakteristik material

Berbedanya karakteristik material timbunan mengakibatkan kepadatan kering saja tidak cukup untuk menggambarkan suatu proses pemadatan, sehingga perlu dikorelasikan juga dengan kepadatan-kepadatan standar material timbunan yang memenuhi sifat teknisnya. ARUP (2007) memberikan tiga cara interpretasi kepadatan kering lapangan untuk material timbunan, yaitu:

- Indeks kepadatan (I_D)
- Kepadatan relatif (C_R)
- Air Voids Content (AV)

3.2.1 Indeks Kepadatan

Indeks kepadatan (*Density Index*, I_D) dapat digunakan untuk mengkorelasikan kepadatan kering lapangan (γ_d) timbunan berbutir dengan kepadatan kering maksimum ($\gamma_{d \text{ max}}$) dan kepadatan kering minimum ($\gamma_{d \text{ min}}$) melalui persamaan berikut.

$$I_D = \frac{(\gamma_d - \gamma_{d \text{ min}})}{(\gamma_{d \text{ max}} - \gamma_{d \text{ min}})} \frac{\gamma_{d \text{ max}}}{\gamma_d} \dots\dots\dots [3.1]$$

3.2.2 Kepadatan Relatif

Kepadatan relatif (*Relative density*, C_R) didefinisikan sebagai perbandingan persentase antara kepadatan kering lapangan dengan kepadatan kering maksimum dari uji pemadatan standar di laboratorium. Penggunaan pemadatan standar untuk mencari kepadatan acuan berarti nilai $C_R = 100\%$ tidak selalu dihubungkan dengan kepadatan kering maksimum yang dapat dicapai. C_R terendah yang bisa dicapai material timbunan adalah sekitar 60%.

Trenter (2001) di dalam ARUP (2007) menyampaikan catatan kekurangan dari perhitungan kepadatan relatif, yaitu tidak dapat memberikan nilai AV. C_R sebesar 95% diperoleh dari timbunan yang dipadatkan pada kondisi kering maksimum maupun basah maksimum. Pada kondisi kering maksimum, AV

akan menjadi tinggi nilainya, sedangkan pada kondisi basah maksimum adalah sebaliknya.

3.2.3 Air Voids Content

Air Voids Content (AV) adalah jumlah pori di dalam timbunan dan proporsi pori yang terisi air. Jumlah pori di dalam timbunan dapat dinyatakan sebagai porositas (n), yang merupakan perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah. Proporsi pori yang terisi air dapat dinyatakan sebagai derajat kejenuhan (S_r), yang merupakan volume air terhadap volume pori. Baik n maupun S_r dinyatakan sebagai persentase dan Air Voids Content (AV) dihitung dengan persamaan berikut.

$$AV = n(1 - [S_r/100]) \dots\dots\dots [3.2]$$

dimana AV, n dan S_r dalam satuan persen.

Parameter yang biasanya dicari saat menentukan persen AV adalah berat isi (γ) dan kadar air (w), dengan persamaan berikut.

$$\gamma = \gamma_d(1 + w) \dots\dots\dots [3.3]$$

AV adalah volume udara yang merupakan persentase volume total material padat dan merupakan fungsi dari kepadatan kering lapangan, kadar air dan berat jenis (G_s) yang dihitung dengan persamaan berikut.

$$AV = \left[1 - \gamma_d \left(\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100} \right) \right] \dots\dots\dots [3.4]$$

Di dalam kurva pemadatan, garis Zero Air Voids (*ZAV-line*) menunjukkan kondisi pori di dalam tanah yang seluruhnya terisi air. AV tidak boleh bernilai negatif sehingga hasil pengeplotan ke dalam kurva harus berada di kanan atas ZAV.

Jika AV bernilai negatif kemungkinan terjadi kesalahan pada saat penentuan nilai G_s . Ketika AV berada jauh di kiri garis jenuh atau *ZAV line*, material timbunan akan berangsur-angsur mengering dan AV pun akan meningkat

nilainya. Akan tetapi kelemahan penggunaan AV untuk kontrol pemadatan adalah nilainya bisa diturunkan hanya dengan meningkatkan kadar airnya.

Apabila kadar air optimum dihubungkan dengan perilaku teknis tanah timbunan kohesif, maka akan terdapat perbedaan perilaku lempung yang dipadatkan di atas nilai optimumnya (kondisi basah) dan di bawah nilai optimumnya (kondisi kering) dengan pemadatan standar. Perbedaan tersebut adalah:

- Kering optimum dengan AV yang menerus tidak akan menyebabkan masalah konsolidasi, melainkan masalah yang berkaitan dengan kolaps atau mengembang (*swelling*) akibat pembasahan.
- Basah optimum dengan pori yang sebagian besar terisi air akan menyebabkan masalah konsolidasi.

Penggunaan AV di dalam spesifikasi timbunan jalan telah dikaji di dalam dua literatur dengan kesimpulan sebagai berikut:

- TRL (1953) menetapkan batasan AV 10% di dalam spesifikasi timbunan. Penetapan ini berdasarkan percobaan terhadap klasifikasi tanah CH, CL, CL, SU dengan kadar air (W) rata-rata sebesar 8 – 28 %, Kepadatan Kering (γ_d) lapangan sebesar 1,51 – 2,02 gr/cm³, Specific Gravity (G_s) rata-rata sebesar 2,70 – 2,75. Dari percobaan tersebut diperoleh nilai AV rata-rata sebesar 1 – 10 %.
- UK Highways (1950-1960an) menggunakan nilai AV maksimum sebesar 10% untuk tubuh timbunan dan AV maksimum 5% untuk 0,6 m lapisan teratas dari timbunan.

Adapun pengaruh AV terhadap kinerja jangka panjang timbunan berdasarkan penelitian ARUP (2007) yang dilakukan terhadap timbunan tanah lempung (*clay fill*), dijelaskan sebagai berikut:

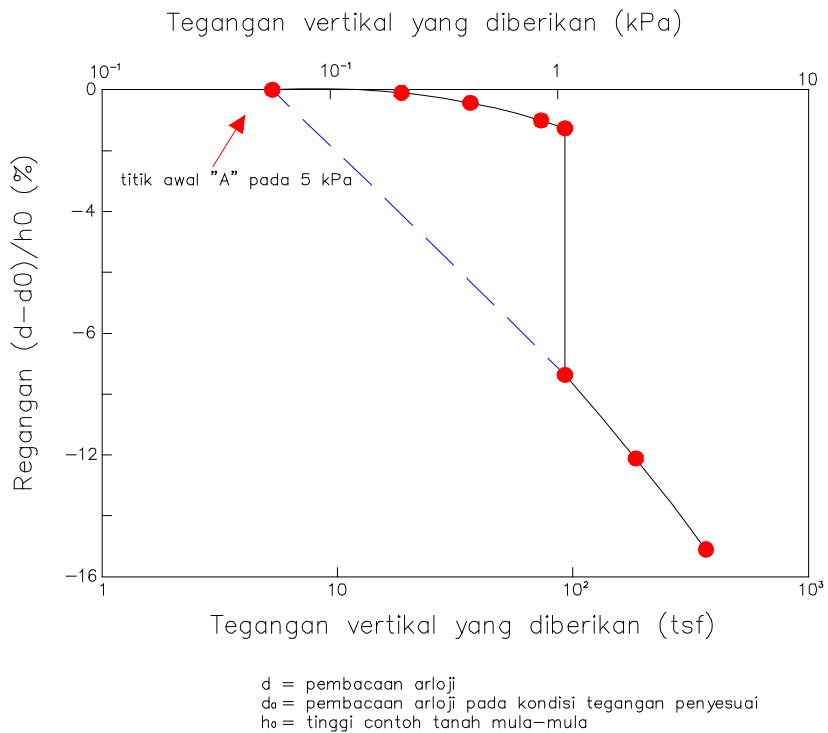
- Pada saat timbunan dipadatkan pada kadar air di atas kadar air optimum, potensi kolaps merupakan fungsi dari AV. Dengan demikian nilai AV yang kecil akan mengurangi potensi kolaps;
- Untuk material-material timbunan, spesifikasi yang hanya bergantung kepada syarat kepadatan relatif sebesar 95% tidak akan menghilangkan potensi kolaps, sehingga bukan merupakan spesifikasi pemadatan yang tepat;
- Potensi kolaps pada timbunan tanah lempung juga merupakan fungsi dari permeabilitas, dimana ketika AV dikurangi menjadi 5%, koefisien permeabilitasnya akan rendah (nilai tipikalnya 10^{-9} m/det – 10^{-10} m/det) dan tidak berpotensi mengalami kolaps.

3.3 Hubungan antara pemadatan dan Air Voids Content terhadap potensi kolaps

Penurunan kolaps dapat terjadi secara tak terduga pada timbunan dan bersifat lokal. Contoh penyebab terjadinya penurunan kolaps adalah kebocoran drainase pada timbunan atau kenaikan muka air sehingga timbunan menjadi jenuh. Keruntuhan lokal tersebut berbahaya bagi struktur timbunan jalan sehingga potensi kolaps perlu dipertimbangkan saat tahap perencanaan.

ASTM D 5333-92 mendefinisikan kolaps sebagai penurunan tinggi tanah terkekang akibat pembasahan tanah pada saat diberikan tegangan vertikal yang konstan. Potensi kolaps, pada prinsipnya bertujuan untuk mengetahui perbedaan regangan volumetrik (*volumetric strain*) antara contoh tanah yang dipadatkan dengan kadar air pemadatan (dalam kondisi contoh uji tak terendam) dan contoh uji yang direndam dengan alat uji konsolidasi satu dimensi.

Grafik pada Gambar 3-1 memperlihatkan hubungan antara regangan volumetrik dengan besaran tegangan vertikal yang diberikan kepada contoh uji. Penurunan seketika dari titik B ke C disebut sebagai penurunan kolaps.



Keterangan: $(d - d_0) / h_0$ dikalikan 100 agar satuannya menjadi persen

Gambar 3-1 Contoh kurva kompresi dari uji potensi kolaps (ASTM D 5333-92)

Jika merujuk ke metode ASTM D 5333-92, maka pengujian potensi kolaps pada akhirnya bertujuan untuk memprediksi potensi kolaps tanah-tanah yang dipadatkan. Dengan kata lain prediksi penurunan contoh uji akibat kolaps bisa diasumsikan sebagai prediksi penurunan timbunan sendiri di lapangan akibat pemberian beban dalam jangka waktu tertentu.

Penurunan tanah akibat tegangan vertikal diprediksi dengan mengalikan potensi kolaps (I_c) dengan $H/100$, dimana H adalah tebal lapisan tanah dan 100 adalah besar tegangan vertikal (dalam kPa).

Menurut Barden dalam Rorie (2006), kolaps terjadi karena tiga mekanisme berikut:

1. Struktur terbuka dan tidak stabil dari tanah tak jenuh.
2. Tegangan normal yang besar yang menyebabkan terjadinya instabilitas struktur tanah.
3. Hilangnya hisapan (*suction*) pelekak yang asalnya ada pada tanah tak jenuh akibat infiltrasi air.

Rorie (2006) lebih jauh menjelaskan bahwa kolaps dari tanah tak jenuh merupakan fungsi dari kadar air dan derajat pemadatan, kolaps semakin besar dengan semakin kecilnya persentase kadar air. Oleh karena itu, pengaturan kadar air timbunan sangat penting untuk menghindari kolaps.

Jika timbunan dipadatkan di sisi basah maka penurunan konsolidasi timbunan menjadi masalah. Akan tetapi jika timbunan dipadatkan pada sisi kering, maka masalah yang timbul adalah potensi kolaps atau kembang susut tanah.

Untuk mengetahui potensi kolaps, ARUP (2007) menyebutkan bahwa parameter AV dapat memberikan indikasi potensi perubahan volume pada jenis timbunan apapun. Dari penelitiannya disimpulkan bahwa timbunan dari bahan lempung dengan AV kurang dari 5% tidak berpotensi kolaps, sedangkan timbunan dengan AV lebih dari 10% berpotensi kolaps (lihat juga bab 3.2.3).

Apabila timbunan dipadatkan dengan kadar air pada sisi kering kadar air optimum, potensi kolaps hanya merupakan fungsi dari kepadatan relatif (C_r). Umumnya C_r sebesar 95% untuk timbunan berbutir kasar cukup untuk menghilangkan potensi kolaps, tetapi untuk timbunan lempung dibutuhkan C_r sebesar 105%.

Dari penelitian Lim dan Miller (2004) dalam Rorie (2006) dapat disimpulkan bahwa metode ASTM D 5333-92 seharusnya memasukkan pengaruh tinggi timbunan yang dipadatkan selain potensi kolaps, agar prediksi penurunan timbunannya tidak di bawah angka yang diperkirakan. Tinjauan terhadap penelitian-penelitian lain mengenai potensi kolaps dirangkum dan disimpulkan di dalam Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Rangkuman dari penelitian-penelitian mengenai potensi kolaps

Penelitian	Kesimpulan dari penelitian potensi kolaps
Barden et.al. (1973)	Terdapat tiga mekanisme yang mempengaruhi potensi kolaps, yaitu: 1. Struktur tanah yang terbuka, tidak stabil dan terjenuhi sebagian 2. Gaya normal yang besar sehingga mempengaruhi ketidakstabilan struktur 3. <i>Bonding agent</i> (hisapan) pada kondisi terjenuhi sebagian dan diatasi selama infiltrasi air
Lawton et.al. (1989)	Terdapat korelasi antara potensi kolaps dan kadar air pemadatan pada pemberian energi pemadatan Modified, dimana kolaps meningkat ketika kadar air pemadatan meningkat. Pemadatan pada kadar air yang lebih tinggi dari angka kritisnya akan menimbulkan pengembangan.
ASTM D 5333 (1992)	Pemberian tegangan vertikal yang besar tidak berpengaruh terhadap potensi kolaps. Tanah yang turun (runtuh) dapat menerima tegangan vertikal yang sangat besar namun penurunannya tetap kecil pada kadar air yang rendah, dan akan mengalami penurunan lebih besar setelah pembasahan meskipun tanpa kenaikan tegangan.
Lim dan Miller (2004)	Pengujian potensi kolaps pada material dengan cakupan tegangan <i>overburden</i> yang besar dapat menggunakan metode uji konsolidasi ganda (<i>double oedometer test</i>), dimana 2 contoh uji identik diuji dengan kondisi pengujian yang sama namun dalam kondisi terendam dan tidak terendam dan dibandingkan hasilnya.
Lim dan Miller (2004)	Terdapat korelasi antara indeks kolaps dengan parameter batas Atterberg yaitu PI dan LL, fraksi lempung (CL) serta nilai aktivitas (A). Nilai indeks kolaps dari hasil korelasi dapat dihubungkan dengan derajat pengembangan tanah.

Penelitian	Kesimpulan dari penelitian potensi kolaps
Rorie Dennis (2006)	Terdapat kecenderungan bahwa benda uji yang dipadatkan di bawah kadar air optimum memberikan kolaps yang lebih besar pada saat diberi tekanan overburden besar.
ARUP (2007)	Terdapat korelasi antara potensi kolaps, kepadatan relatif (C_R) dan Air Voids Content (AV), dimana kolaps tidak terjadi pada timbunan lempung jika $C_R > 105\%$ dan $AV < 5\%$ dan tidak terjadi pada timbunan granular jika $CR > 95\%$ dan $AV < 10\%$. Terdapat korelasi antara potensi kolaps dengan permeabilitas, dimana jika permeabilitasnya rendah (10^{-9} - 10^{-10} m/det) maka kolaps tidak akan terjadi.
Mansour, et.al (2008)	Uji potensi kolaps sebaiknya dilakukan pada contoh tanah tak terganggu agar dapat memperhitungkan efek struktur tanah. Uji potensi kolaps dengan alat konsolidasi satu dimensi hanya direkomendasikan jika tanahnya homogen.

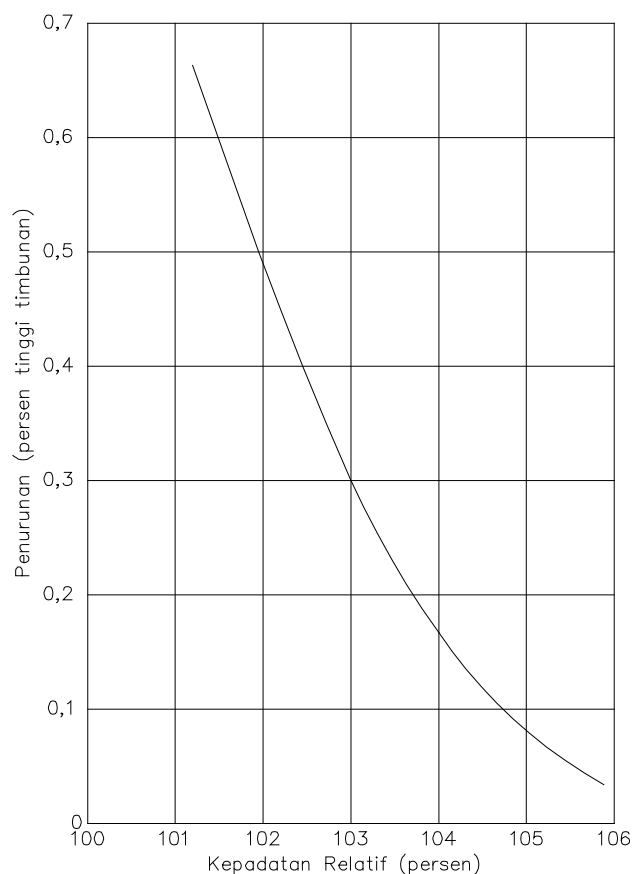
3.4 Hubungan antara pemadatan dan kompresi timbunan

Kompresi timbunan terdiri dari kompresi seketika, konsolidasi dan rangkakan (ARUP, 2007). Kompresi seketika terjadi selama konstruksi dan merupakan fungsi dari modulus sekant timbunan. Pada timbunan lempung, konsolidasi dapat terjadi setelah selesainya konstruksi timbunan akibat munculnya tekanan eksese air pori yang terdisipasi dalam jangka panjang (proses konsolidasi). Hampir pada seluruh timbunan, konsolidasi berlanjut bahkan ketika tekanan eksese air pori selesai terdisipasi. Konsolidasi sekunder (rangkakan) terjadi dengan tegangan efektif konstan.

Menurut DPU (2006), Fell.et.al. (1992), dan DPU (2002) besarnya kompresi timbunan tanah diperkirakan sekitar 0,5% - 1,5% dari tinggi timbunan dengan catatan bahwa pekerjaan pemadatan dilakukan dengan benar. Pada timbunan batuan, Fell, et.al. (1992) memperkirakan besarnya adalah 0,25% tinggi timbunan.

Fell, et al. 1992 memberikan perkiraan kompresi pada timbunan batuan adalah 0,25% tinggi timbunan dan perkiraan kompresi pada timbunan tanah adalah 0,5% tinggi timbunan. Untuk memprediksi kompresi timbunan saat konstruksi, TRRL (1952) di dalam DPU² (2006) memberikan kurva hubungan antara pemadatan relatif (R, dalam %) dengan kompresi timbunan yang merupakan % tinggi timbunan seperti terlihat pada Gambar 3-2.

Kajian tentang perilaku deformasi timbunan dengan kasus tanah merah dibahas lebih lanjut pada bab 5.

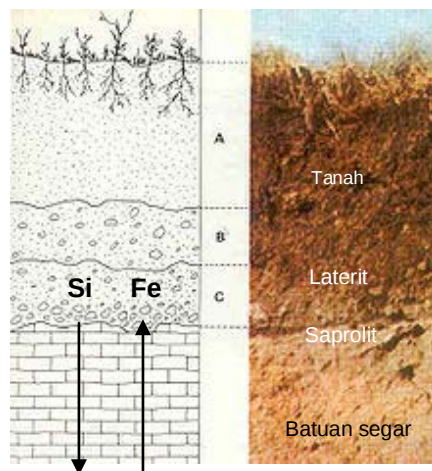


Gambar 3-2. Pengaruh pemadatan relatif (R,dalam (TRRL, 1952 di dalam DPU², 2006)

4 Sifat-sifat Tanah Merah sebagai Material Timbunan

4.1 Proses pembentukan tanah merah

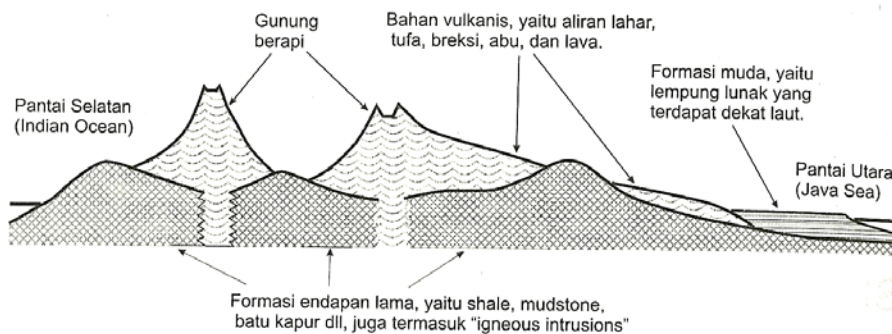
Tanah merah lazim disebut juga sebagai tanah laterit (*lateritic soils*). Laterit terbentuk dari proses pelapukan tanah residual atau disebut juga sebagai proses laterisasi. Tanah laterit ini mempunyai kandungan *ferro-alumino silicates* yang tinggi, atau *sesquioxides* (oksida sekunder dari besi/ Fe_2O_3 atau aluminium/ Al_2O_3 atau keduanya) dan mempunyai kandungan silikat dasar dan utama yang rendah, tetapi dapat mengandung jumlah kuarsa dan kaolin yang cukup banyak (Blight, 1997). Proses transformasi dari batuan menjadi laterit berjalan secara berangsur, yang dapat dilihat dari meningkatnya kandungan besi dan menurunnya kandungan silika pada profil laterit di atas batuan induk. Profil pembentukan tanah laterit secara umum dapat dilihat pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1 Penampang Vertikal Proses Pembentukan Laterit

Seperti telah diuraikan sebelumnya bahwa tanah laterit terbentuk dari proses pelapukan dari batuan induknya, yang dapat berupa batuan beku, batuan sedimen ataupun batuan metamorf. Oleh karena itu, pendekatan geologi dapat dilakukan untuk mengetahui keterdapatan dan penyebaran tanah laterit ini.

Dan hal ini telah dilakukan oleh Wesley (2012) dalam penelitiannya dengan mencoba untuk mengelompokkan sifat-sifat tanah di Pulau Jawa berdasarkan kondisi geologinya. Kondisi geologi Pulau Jawa secara sederhana digambarkan oleh Wesley seperti ditunjukkan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2 Gambaran Umum Geologi Pulau Jawa (Wesley, 2012)

Berdasarkan gambaran ini, jenis batuan dan tanah dibagi menjadi 3 golongan utama, yaitu:

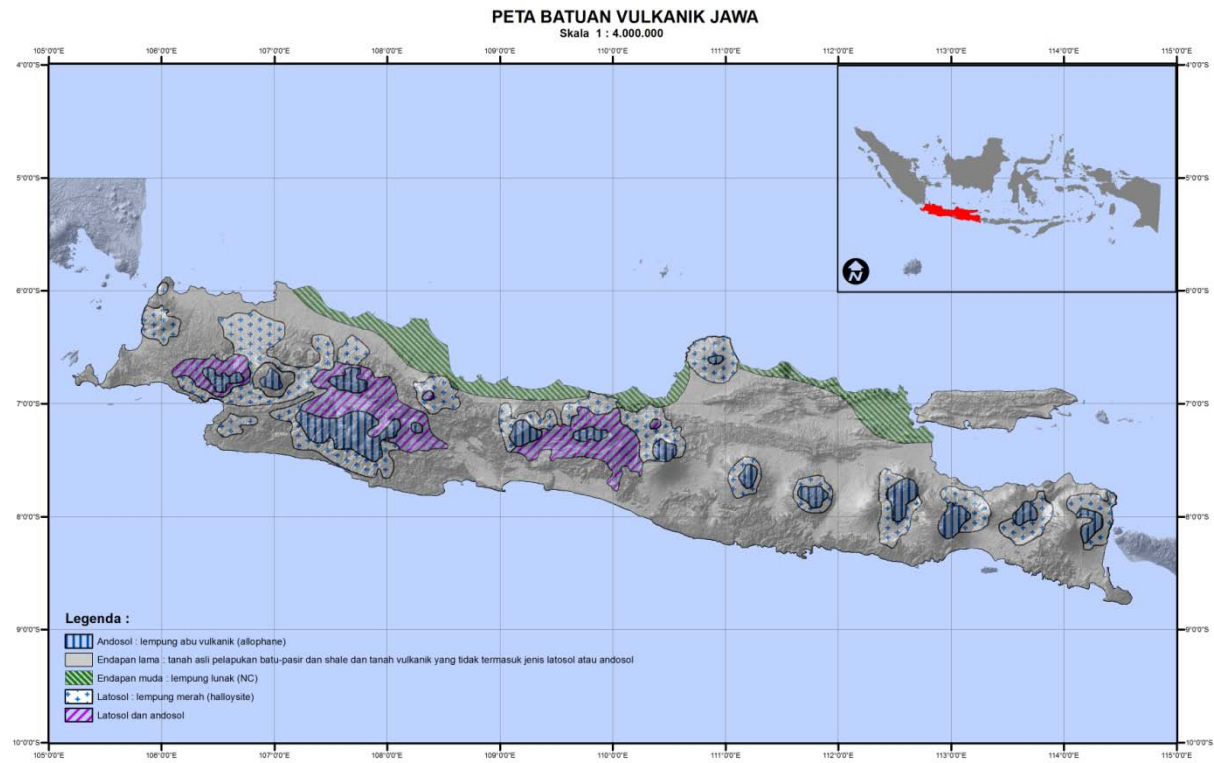
1. Formasi lama yang bukan bahan vulkanis. Formasi ini digambarkan terdiri atas lapisan endapan seperti serpih, batulempung, batupasir dan batukapur. Batuan beku seperti intrusi andesit (seperti di daerah Jatiluhur) juga mungkin terdapat pada formasi ini.
2. Formasi muda, yang tersusun atas tanah lempung (*normally consolidated marine clay*) yang terletak dekat pantai, khususnya pantai utara Pulau Jawa. Ketebalan lapisan ini bisa mencapai lebih dari 40 m.
3. Formasi vulkanis, yaitu endapan-endapan vulkanis (aliran lahar, abu vulkanis), yang membentuk tanah residual sebagai hasil dari pelapukan.

Dari penggolongan ini, laterit termasuk ke dalam kelompok ketiga yaitu formasi vulkanis. Jenis tanah dari formasi vulkanis umumnya mempunyai sifat teknik yang jauh lebih baik daripada tanah yang berasal dari formasi endapan lama dan endapan lunak yang muda.

Jenis tanah dari formasi vulkanis ini, kemudian dapat dikelompokkan lagi menjadi dua, berdasarkan pada kandungan mineral lempungnya, yaitu:

- a. *Lempung merah tropis (tropical red clay/lateritic clay)* atau biasa disebut dengan istilah *latosol*, yang sebagian besar terdiri atas mineral lempung halloysite. Kelompok tanah ini umumnya terbentuk pada lereng-lereng gunung api sampai ketinggian 1000 m.
- b. *Lempung abu vulkanis* atau disebut juga sebagai *andosol*, dimana mineral lempung yang dominannya adalah allophane. Kelompok tanah ini biasa terbentuk pada lereng-lereng gunung api yang tinggi di ketinggian lebih dari 1000 m.

Penyebaran laterit bersama dengan formasi-formasi tersebut di atas, juga telah dibuat oleh Wesley, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-3.



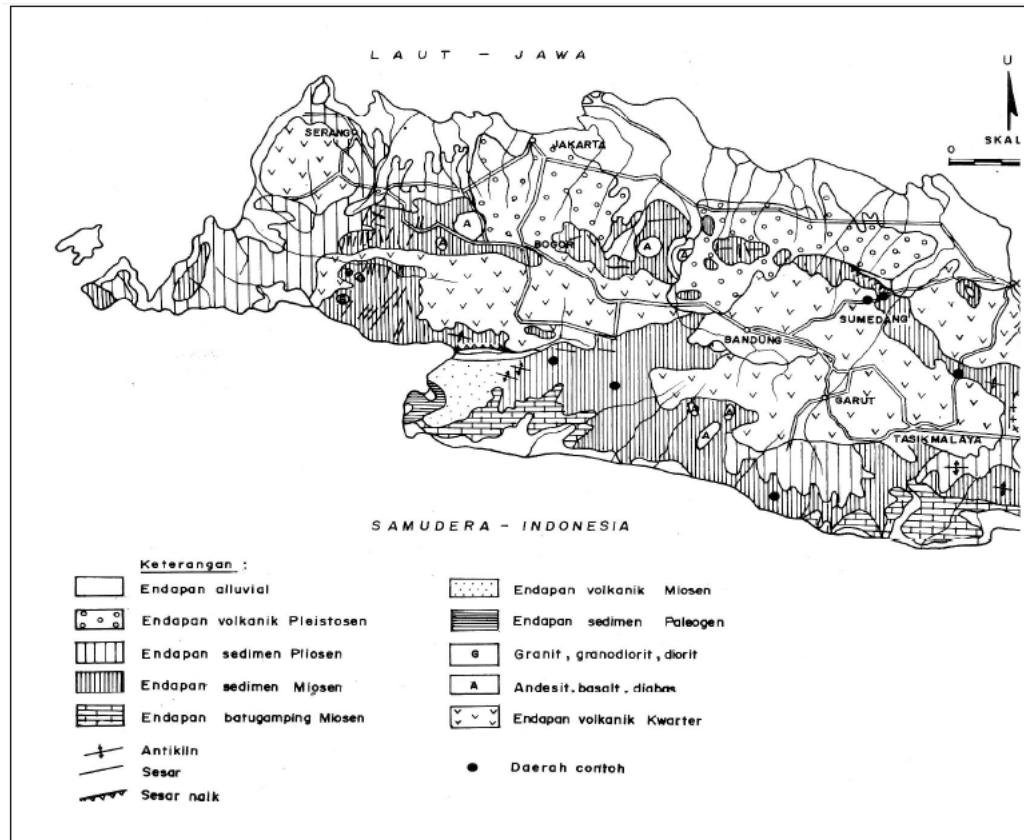
Gambar 4-3 Penyebaran Laterit di Pulau Jawa (Wesley, 2012)

Dari penjelasan Wesley (2012) mengenai tanah laterit, dapat diketahui bahwa tanah laterit atau disebut juga latosol di pulau Jawa, umumnya terbentuk sebagai hasil dari pelapukan endapan vulkanis dan terdapat pada daerah lereng-lereng pegunungan di bawah ketinggian 1000 m. Berdasarkan hal ini, maka untuk mencari contoh tanah laterit di pulau Jawa, dilakukan dua pendekatan yaitu, dengan:

- menelusuri lokasi kuari di daerah sesuai dengan peta penyebaran tanah laterit dari Wesley (2012);
- menelusuri lokasi kuari di daerah endapan-endapan vulkanis lainnya yang terletak pada ketinggian di bawah 1000 m, berdasarkan peta geologi.

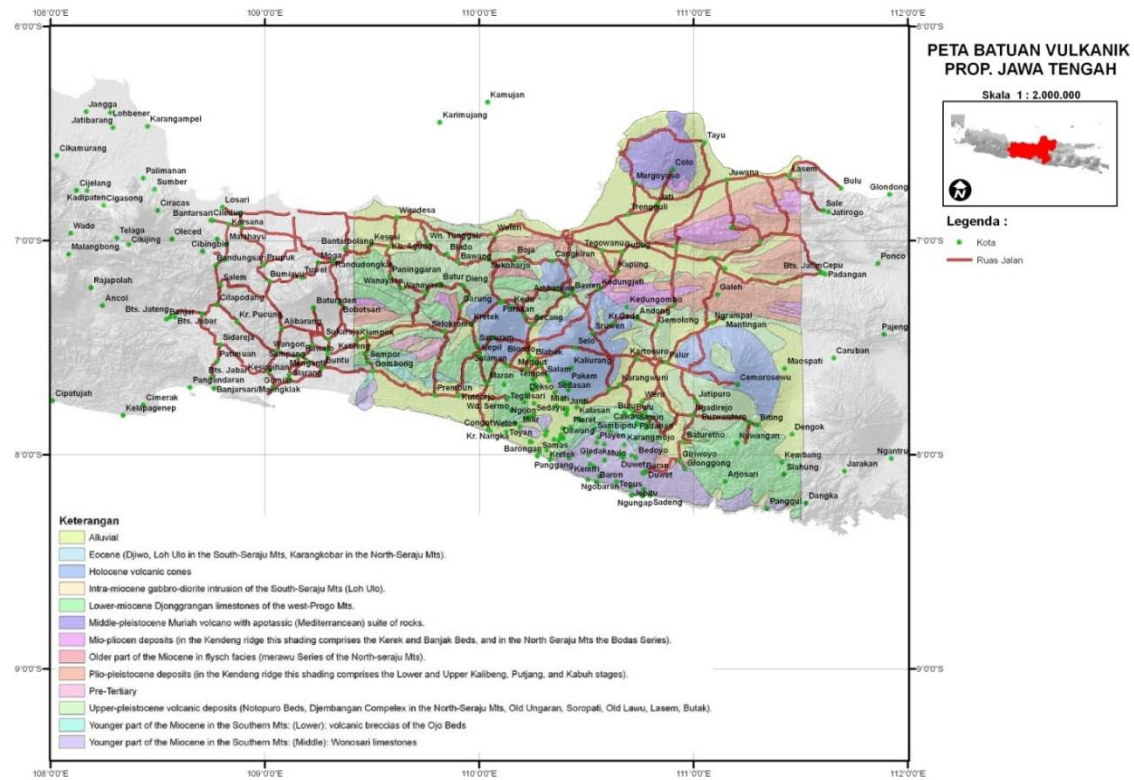
Beberapa sumber digunakan untuk mengetahui penyebaran endapan vulkanis di pulau Jawa ini selain dari Wesley (2012), di antaranya yaitu:

- Sampurno (1976), dalam penelitiannya, telah melakukan pemetaan kondisi geologi di wilayah Jawa Barat. Aktivitas vulkanik yang terjadi pada kala Miosen dan Kuarter, membentuk endapan-endapan vulkanis Miosen, Pleistosen dan Kuarter di Jawa Barat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-4.

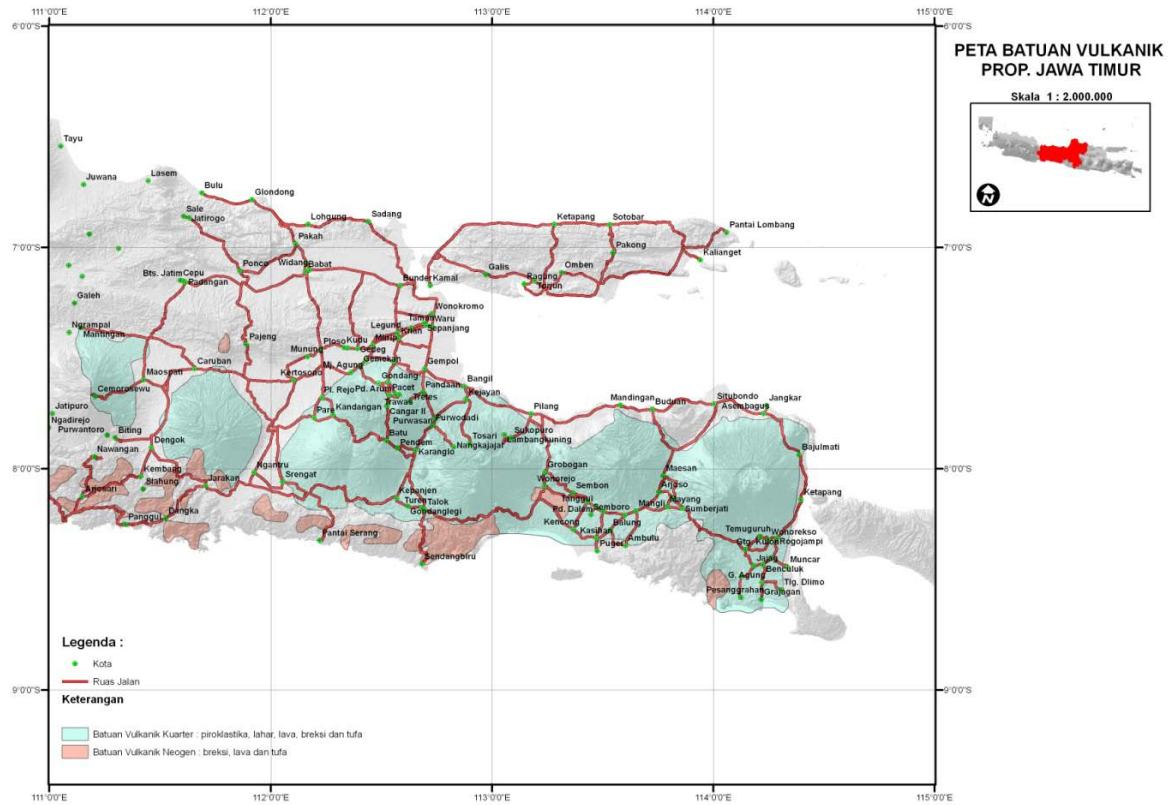


Gambar 4-4 Peta Geologi Regional Jawa Barat (Sampurno, 1976)

- Kemudian untuk mengetahui kondisi geologi dan penyebaran endapan vulkanis di Jawa Tengah, digunakan peta penyebaran batuan sedimen dan batuan vulkanik pada daerah transisi antara Jawa Tengah dan Jawa Timur dari Van Bemmelen (1948), seperti ditunjukkan pada Gambar 4-5. Berdasarkan umur pembentukannya, batuan vulkanik di daerah ini terdiri atas, yaitu:
 - o Kerucut vulkanik Holosen;
 - o Endapan vulkanik Pleistosen Atas;
- Dan untuk penyebaran endapan vulkanis di Jawa Timur, digunakan peta penyebaran batuan vulkanis dari Badan Geologi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-6.



Gambar 4-5 Peta Geologi Daerah Transisi antara Jawa Tengah dan Jawa Timur (Van Bemmelen, 1948)



Gambar 4-6 Peta Batuan Vulkanis Jawa Timur (Badan Geologi)

4.2 Program pengujian sifat-sifat tanah merah

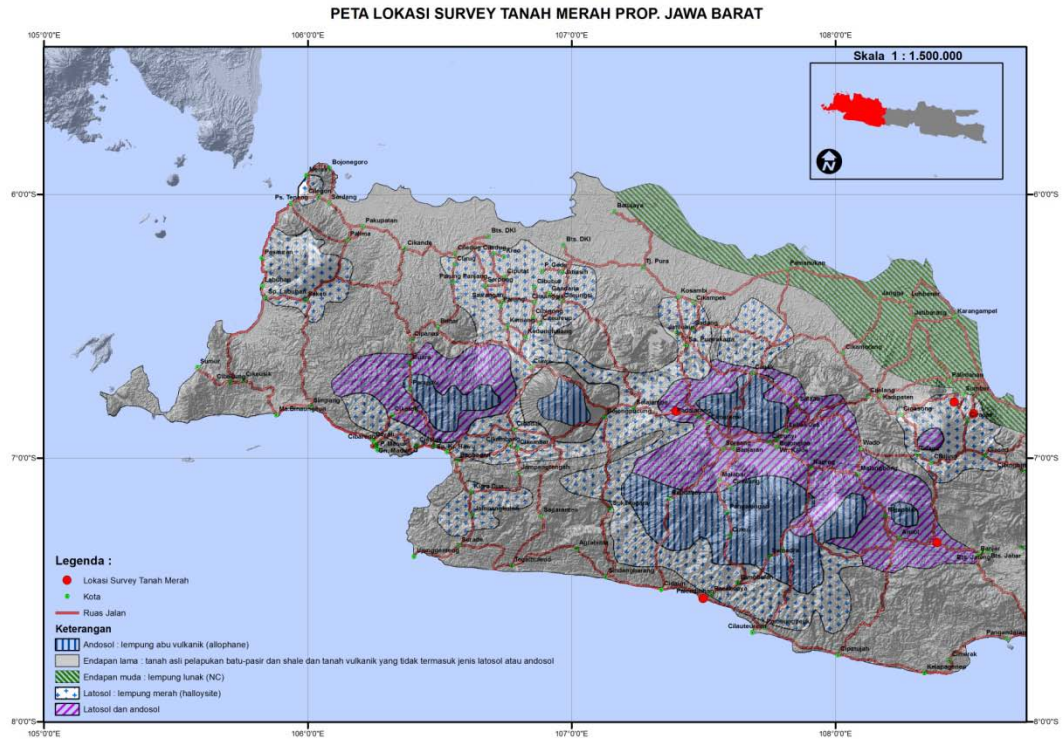
4.2.1 Pengambilan contoh tanah merah

Dengan mengacu kepada beberapa sumber peta seperti diuraikan sebelumnya, kemudian dilakukan survei pada lokasi-lokasi kuari di Jawa Barat, Jawa Tengah dan Jawa Timur. Dari hasil survei, telah diambil beberapa contoh tanah laterit di beberapa lokasi kuari yang diperkirakan sebagai kuari tanah laterit, di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur seperti ditunjukkan pada Tabel 4-1 dan Gambar 4-7 hingga Gambar 4-9.

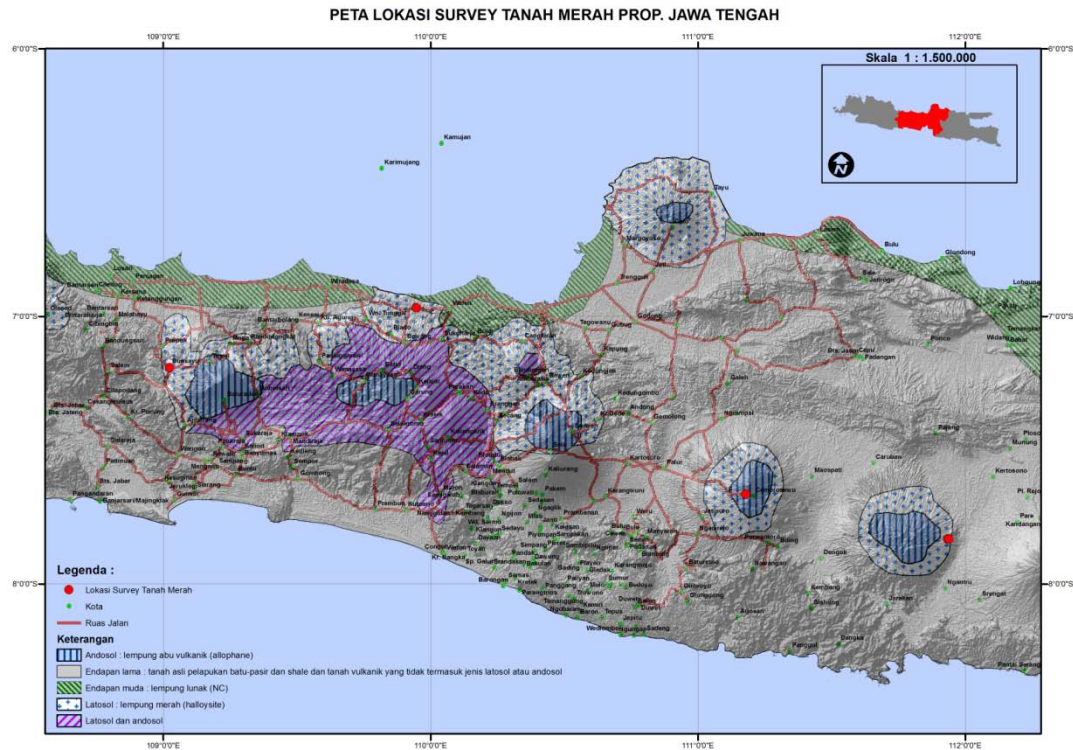
Pada umumnya batuan induk dari lokasi-lokasi kuari adalah berupa endapan/batuan hasil proses vulkanisme, yang terdiri dari material hasil gunung api tua, produk erupsi muda, endapan piroklastika, lava, batupasir tufan, breksi vulkanik, endapan lahar, dan tuf.

Tabel 4-1 Lokasi Pengambilan Contoh Tanah Laterit

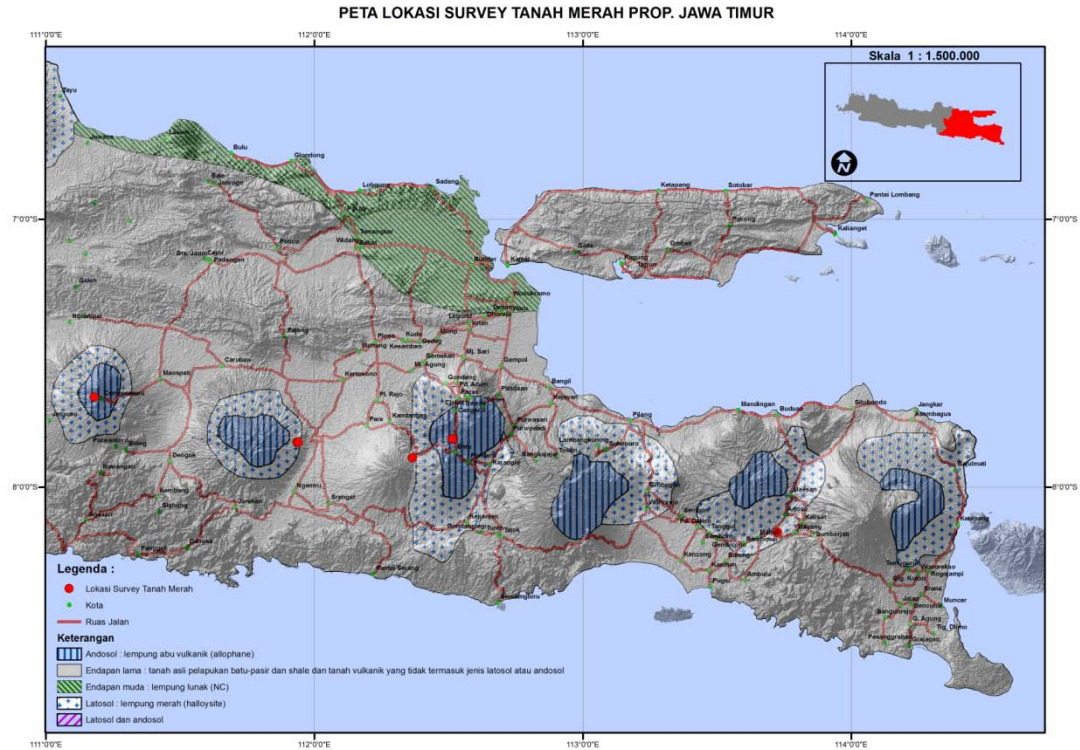
No	Propinsi	Jumlah Lokasi	Lokasi Kuari	Koordinat	Peta Wesley (2012)	Peta Geologi
1	Jawa Barat	6	Jl. Raya Tanjung Sari – Sumedang			
			Jl. Raya Ciamis – Banjar KM4	S: 06.05612 E: 106.08411	Latosol & andosol	Hasil gunung api tua
			Halimpu, Kab. Cirebon, Kec. Beber	S: 06.83254 E: 108.52447	Latosol	Produk erupsi muda Ciremai
			Cimara, Kab. Kuningan, Kec. Pasawahan	S: 06.78773 E: 108.45126	Latosol	Produk erupsi muda Ciremai
			Bumi Indah Parahyangan, Kab. Bandung Barat, Kec. Citatah	S: 06.82256 E: 107.39655	Latosol & andosol	Produk gunung api tua
			Puncak Goa Kab. Garut Kec. Caringin	S: 07.53332 E: 107.49844	Endapan lama	Endapan piroklastika
2	Jawa Tengah	3	Tawangmangu, Cemorosewo Kab. Magetan Kec. Tawangmangu	S: 07.66442 E: 111.17937	Andosol	Lava Candradimuka
			Batang, Sembung Kab. Batang Kec. Banyuputih	S: 06.96778 E: 109.94727	Latosol	Formasi Damar: batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik
			Bumiayu, Linggapura Kab. Brebes Kec. Tonjong	S: 07.19225 E: 109.02399	Latosol	Endapan lahar G. Slamet
3	Jawa Timur	5	Poh Sarang Kab. Kediri Kec. Semen	S: 07.83267 E: 111.93493	Latosol	Aluvial
			Selo Panggung Kab. Kediri Kec. Semen	S: 07.83267 E: 111.93976	Latosol	Aluvial
			Jombo Kab. Malang Kec. Ngantang	S: 7.82067 E: 112.51427	Endapan lama berbatasan dengan latosol	Batu gunung api tua Anjasmoro
			Vandermann, Kab. Batu, Kec. Batu	S: 7.89123 E: 112.36641	Andosol	Batu gunung api tua Anjasmoro
			Plendu Kab. Jember Kec. Sumber Sari	S: 113.72653 E: 8.16900	Latosol	Tuf Argopuro



Gambar 4-7 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Barat



Gambar 4-8 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Tengah



Gambar 4-9 Peta Lokasi Kuari Tanah Laterit di Jawa Timur

4.2.2 Kadar air lapangan dan batas Atterberg tanah merah

Pengujian kadar air lapangan dan pengambilan contoh untuk uji batas Atterberg dilakukan pada setiap lokasi tanah merah di dalam Tabel 4-1. Di setiap lokasi dilakukan pengambilan contoh tanah di dalam krus kadar air yang langsung ditimbang di tempat untuk dihitung kadar air lapangannya (Gambar 4-10).



Gambar 4-10 Penimbangan Berat Contoh Tanah dalam Krus (Dok. Pusjatan, 2012)

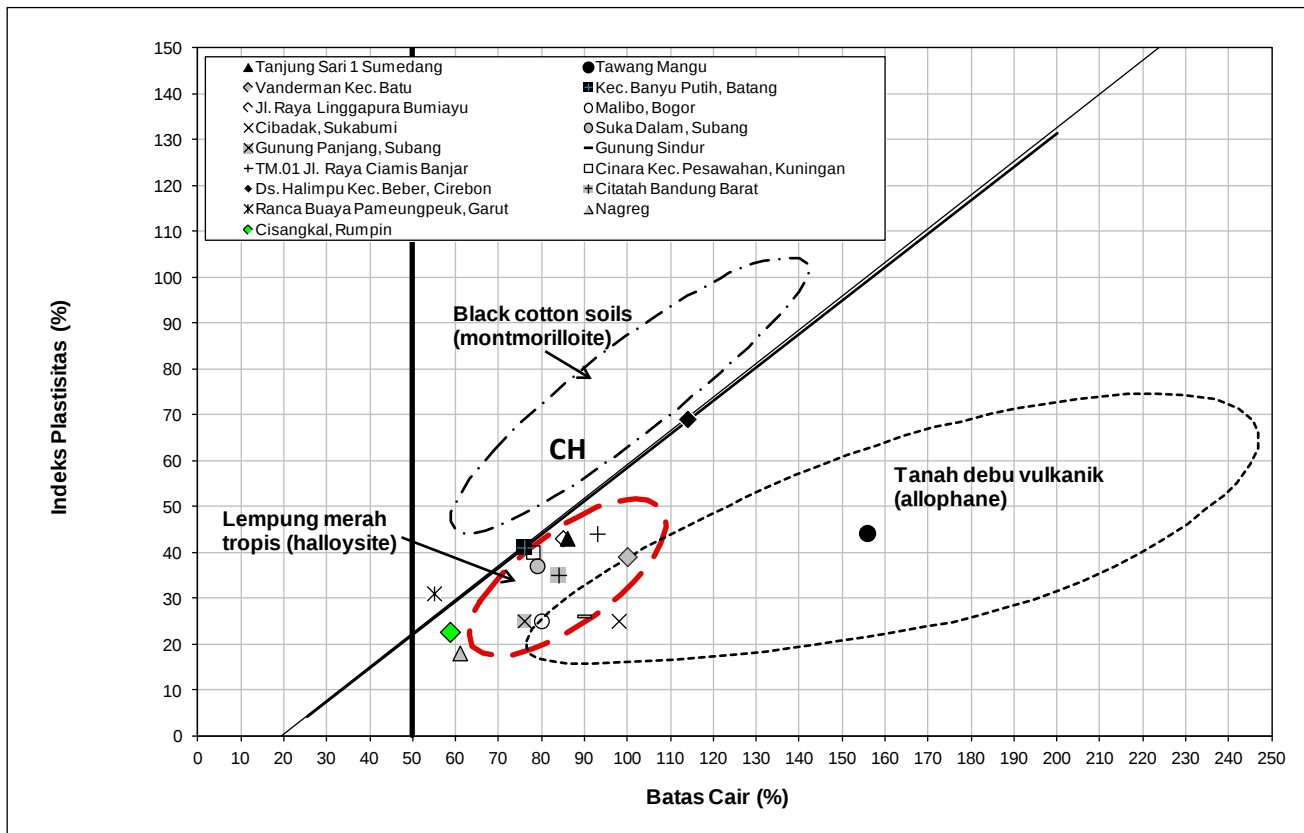
Dari hasil pengujian kadar air lapangan, contoh tanah merah pada Tabel 4-1 mempunyai kadar air alami dengan rentang 12,0% - 53,1 % dengan rata-rata 31,4%. Jika merujuk ke spesifikasi Timbunan Biasa menurut DPU (2010) pada Tabel 2-8 maka tanah merah ideal untuk digunakan karena mempunyai kadar air alamiah $< OMC+1$. Kadar air optimum (OMC) berkisar antara 33,5% - 39,5% dengan rata-rata 36,9%.

Hasil pengujian kadar air lapangan selengkapnya diperlihatkan di dalam Tabel 4-2. Sebagai catatan, contoh tanah yang diambil pada saat musim kering rata-rata kadar air lapangannya rendah, sebaliknya contoh tanah yang diambil saat telah memasuki musim hujan rata-rata kadar air lapangannya lebih tinggi.

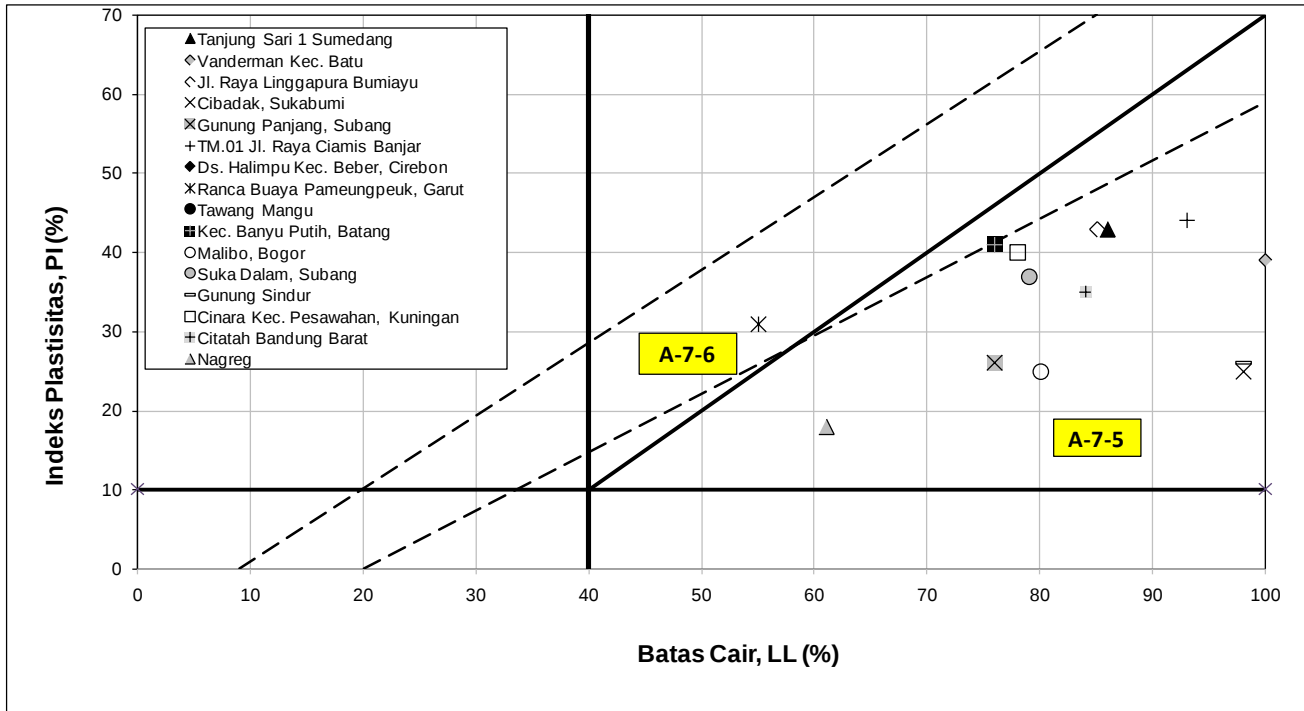
Tabel 4-2 Kadar air lapangan contoh tanah merah

No.	Lokasi Pengambilan Contoh Tanah	Propinsi	Kadar Air Lapangan Rata-rata (%)
1	Banjar -Ciamis KM4	Jawa Barat	34.2
2	Tawangmangu*	Jawa Timur	-
3	Vanderman Kota Baru	Jawa Tengah	35.9
4	Batang, Kec. Banyuputih	Jawa Tengah	25.9
5	Jalan Raya Linggapura Talang Prupuk	Jawa Tengah	17.5
6	Halimpu, Kec. Beter	Jawa Barat	43.6
7	Cimara, kec. Pasawahan	Jawa Barat	16.2
8	Citatah, Kab. Bandung Barat	Jawa Barat	12.0
9	Puncak Goa, Kec. Caringin - Garut *	Jawa Barat	-
10	Ds. Suka Dalam Kec. Heurin Kurung Serang	Jawa Barat	34.1
11	Ds. Malibu Bogor	Jawa Barat	40.5
12	Ds. Gunung Sindur, Bogor	Jawa Barat	53.1
13	Gunung Panjang Subang	Jawa Barat	32
	*) bukan mengandung Halloysite		

Program pengujian laboratorium yang dilakukan di dalam penelitian ini meliputi uji indeks, uji kepadatan, uji CBR, uji potensi kolaps dan uji Triaxial CU. Pada tahap awal dilakukan uji batas Atterberg untuk memplotkan nilai LL dan PI contoh-contoh tanah merah ke dalam kurva kasifikasi Wesley (2010) serta memilih tiga lokasi yang mewakili sebaran klasifikasi tanah merah dengan mineral utama Halloysite. Ketiga lokasi tersebut diuji lebih detail di laboratorium. Lokasi-lokasi terpilih berada di batas bawah ($LL \pm 70$), batas tengah ($LL \pm 90$) dan batas atas ($LL \pm 110$) di dalam kurva klasifikasi Wesley. Hasil pengeplotan ke dalam kurva klasifikasi Wesley dan kurva klasifikasi AASHTO diperlihatkan pada Gambar 4-11 dan Gambar 4-12.



Gambar 4-11. Plot Data LL dan PI Tanah Merah pada Kurva Plastisitas Wesley (2010)



Gambar 4-12. Plot data hasil pengujian tanah merah pada kurva AASHTO

Tiga lokasi terpilih yang masuk ke dalam kelompok Halloysite dan akan diuji detail di laboratorium adalah tanah merah dari Tanjung Sari (Jawa Barat), Subang (Jawa Barat), Linggapura, Bumiayu (Jawa Tengah). Pada naskah ilmiah ini hanya akan dibahas hasil pengujian laboratorium untuk contoh tanah merah dari Tanjung Sari (Jawa Barat).

4.2.1 Klasifikasi tanah merah

Berbagai usaha telah dibuat selama bertahun-tahun untuk mengembangkan sistem klasifikasi khusus untuk tanah residual. Usaha ini timbul karena sifat khusus pada tanah residual. Namun tidak satupun dari sistem ini yang dapat diterima ataupun dapat digunakan secara umum. Hal ini tidak mengherankan karena jenis dan sifat tanah residual yang sangat berbeda-beda, sehingga tidak mungkin ada satu sistem yang dapat mencakup semua tanah residual.

Kegunaan sistem yang telah ada, seperti sistem klasifikasi USCS dinilai cukup sesuai untuk klasifikasi tanah residual. Batas-batas Atterberg dalam hal ini digunakan untuk mengevaluasi dan mengkarakterisasi tanah residual. Akan tetapi, batas plastis, batas cair atau indeks plastisitas sebagai parameternya tidak bisa digunakan secara terpisah. Indikator yang berguna adalah posisinya pada kurva plastisitas.

Wesley (2010) menyatakan bahwa tanah yang berada di bawah garis A umumnya mempunyai sifat teknis yang baik, sedangkan sebaliknya tanah yang berada di atas garis A mempunyai sifat tanah yang buruk.

Gambar 4-11 menunjukkan tempat ketiga kelompok tanah residual pada grafik plastisitas. Yang pertama adalah kelompok tanah yang terkenal dengan nama "*black cotton*" namun juga disebut sebagai "lempung hitam" atau "vertisol". Tanah lempung ini kaya akan mineral monmorillonite dan merupakan sumber dari masalah kembang-susut di timbunan.

Kelompok kedua adalah lempung tropis merah (*tropical red clays*) atau lazim dikenal sebagai tanah merah, umumnya terbentuk dari mineral halloysite. Jenis tanah ini memiliki kekuatan tinggi, kompresibilitas rendah dan potensi

kembang susut rendah, yang akan dibuktikan dari hasil pengujian. Kadar air aslinya cenderung akan dekat dengan batas plastisnya (walaupun hal ini tidak dapat disimpulkan dari posisinya pada grafik plastisitas). Batas plastis umumnya dekat dengan kadar air optimum.

Kelompok ketiga adalah tanah dari debu vulkanik, yang umumnya mengandung banyak mineral allophane (bersama dengan imogollite). Sifat teknisnya umumnya baik dengan batas Atterberg yang sangat tinggi, dan meskipun berada di bawah garis A tidak menunjukkan sifat lanau.

Semua contoh tanah yang diambil di dalam penelitian ini termasuk ke dalam *lempung merah tropis (tropical red clay/lateritic clay)* atau *latosol*, yang sebagian besar terdiri atas mineral lempung Halloysite. Kecuali contoh tanah dari Tawangmangu (Jawa Timur) yang masuk ke dalam kategori tanah abu vulkanik (*allophane*). Semua contoh tanah termasuk ke dalam klasifikasi lempung kelanauan, OH, pada klasifikasi USCS. Menurut AASHTO, tanah merah termasuk kelas A-7-5 (Gambar 4-12).

4.2.2 Nilai kepadatan dan CBR

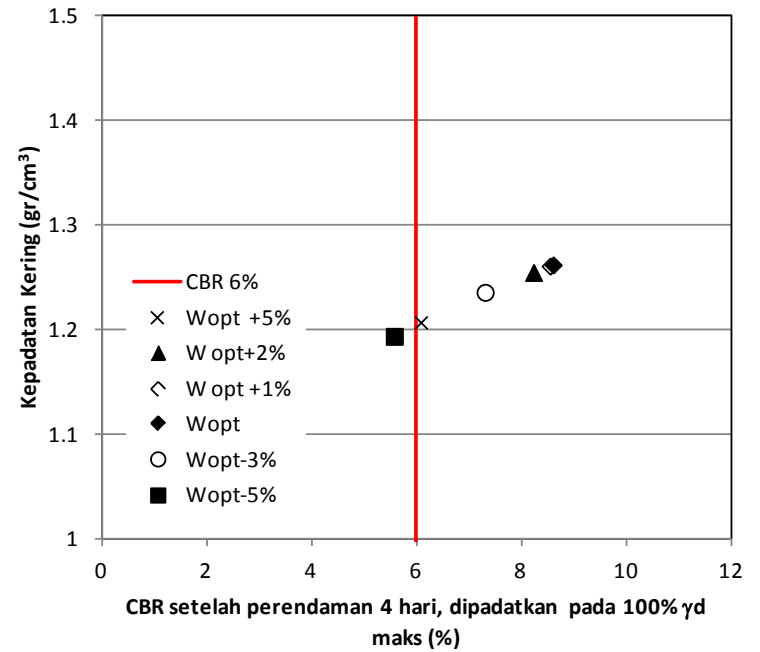
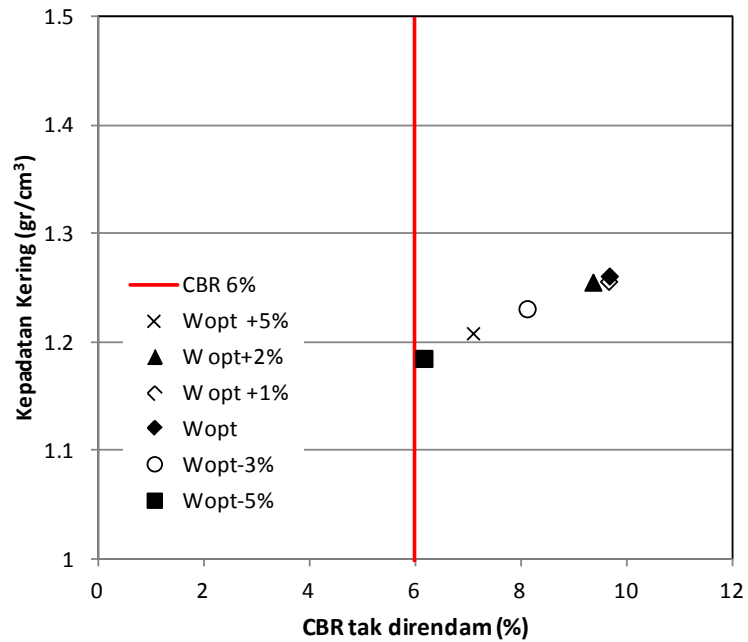
Pengujian pemadatan untuk tanah merah dilakukan dengan menggunakan variasi kadar air pemadatan yang mengacu kepada Spesifikasi Umum Bina Marga (DPU, 2010), yaitu pada rentang Kadar Air Optimum (W_{opt}), $W_{opt} + 1\%$, dan $W_{opt} - 3\%$. Akan tetapi di samping nilai yang tertera di dalam spesifikasi, dilakukan pula pengujian untuk $W_{opt} - 5\%$, $W_{opt} + 2\%$ dan $W_{opt} + 5\%$ untuk mengetahui bagaimana jika spesifikasi umum tidak dilaksanakan dari segi stabilitas dan deformasi (kadar air kurang dari -3% dan lebih dari $+1\%$).

Spesifikasi Umum Bina Marga (DPU, 2010) menyebutkan bahwa timbunan biasa bila diuji dengan SNI 03-1744-1989 harus memiliki nilai CBR tidak kurang dari karakteristik daya dukung tanah dasar yang diambil untuk rancangan dan ditunjukkan dalam gambar atau tidak kurang dari 6% jika tidak disebutkan lain. Nilai tersebut adalah nilai CBR setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100% kepadatan kering maksimum (MDD) seperti yang ditentukan oleh SNI 03-1742-1989.

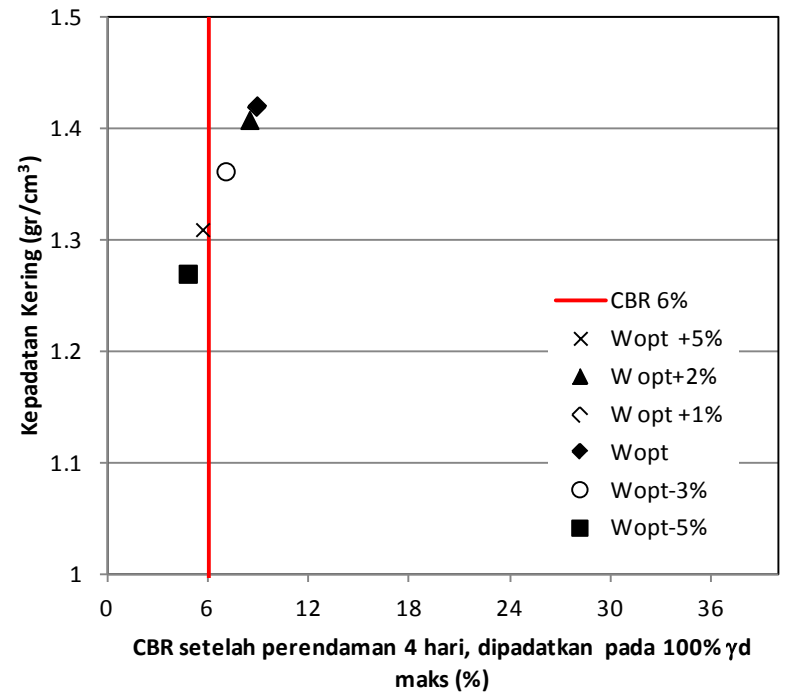
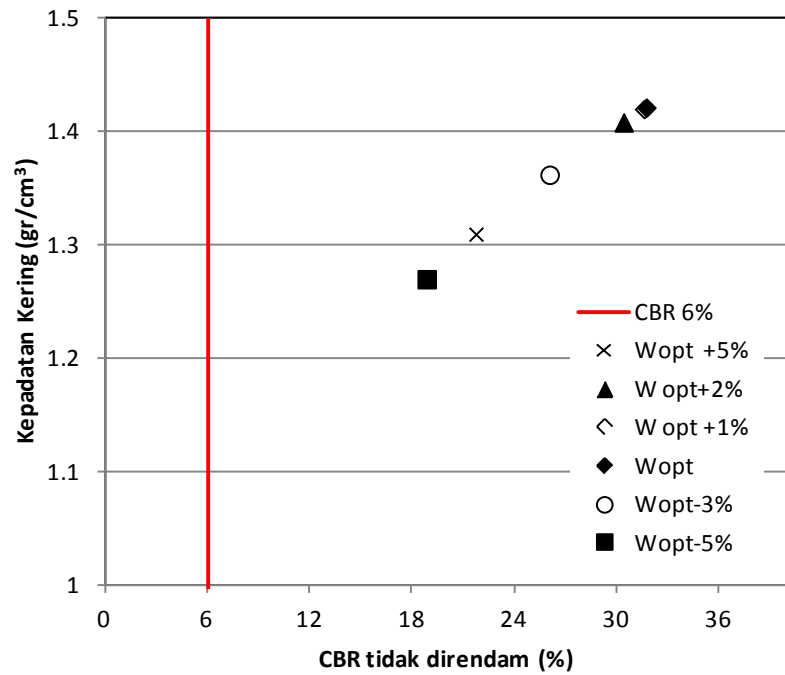
Pemadatan timbunan tanah harus dilaksanakan hanya bilamana kadar air bahan berada dalam rentang 3 % di bawah kadar air optimum (W_{opt}) sampai 1% di atas kadar air optimum. Dari hasil pengujian diperoleh W_{opt} sebesar 38.5% yang selanjutnya divariasikan hingga berada di bawah dan atas kondisi optimumnya sebesar +5%, +3%, +1%, -1%, -3%, -5% juga digunakan dalam pengujian lainnya.

Hasil uji pemadatan ringan yang dibandingkan dengan uji CBR kondisi direndam dan tidak direndam dengan kepadatan ringan (standar) dan kepadatan berat (modified) diperlihatkan pada Gambar 4-13 dan Gambar 4-14. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan:

- Tanah merah memenuhi syarat timbunan biasa menurut spesifikasi umum Bina Marga (DPU, 2010). Contoh tanah yang dipadatkan dengan pemadatan ringan pada 100% kepadatan kering maksimum (pada kondisi W_{opt}) mempunyai nilai CBR terendam sebesar 8.6%.
- Penurunan nilai CBR dari kondisi tak terendam terhadap kondisi terendam yang dipadatkan dengan kepadatan ringan adalah sekitar 9% - 14%.
- Penurunan nilai CBR dari kondisi tak terendam terhadap kondisi terendam yang dipadatkan dengan kepadatan modified lebih tinggi dibandingkan dengan kepadatan standar, yaitu sekitar 72% - 74%.



Gambar 4-13 Uji pemadatan standar dan CBR



Gambar 4-14 Uji pemadatan modified dan CBR

4.2.3 Nilai kuat geser

Tanah residual yang dihasilkan dari proses pelapukan batuan beku dan vulkanik umumnya memiliki sifat teknis yang baik dan memiliki kuat geser tak terdrainase maupun parameter kekuatan efektif yang cukup tinggi. Ini dibuktikan berdasarkan penelitian terhadap lereng bukit residual yang tetap stabil pada kemiringan yang curam dibandingkan dengan lereng-lereng pada batuan sedimen.

Kuat geser efektif pada tanah residual (kecuali tanah residual dari pelapukan batuan sedimen) disebabkan oleh: (a) tanah residual mempunyai mineral lempung yang cenderung mempunyai sifat friksi yang bagus, (b) sebagian besar tanah residual mempunyai efek mikrostruktur yang signifikan, sehingga berkontribusi pada tingginya kuat geser dan (c) mikrostruktur umumnya juga berkontribusi pada tingginya komponen kohesi pada kuat geser tanah residual.

Wesley (2010) menyimpulkan bahwa kuat geser efektif pada tanah residual (kecuali tanah residual dari pelapukan batuan sedimen) disebabkan oleh:

1. Tanah residual mempunyai mineral lempung yang cenderung mempunyai sifat friksi yang bagus.
2. Sebagian besar tanah residual mempunyai efek mikrostruktur yang signifikan, sehingga berkontribusi pada tingginya kuat geser.
3. Mikrostruktur umumnya juga berkontribusi pada tingginya komponen kohesi pada kuat geser tanah residual. Sudut geser dalam umumnya pada rentang 25° - 35° , walaupun pada lempung allophane dan halloysite bisa mencapai 40° .

Pada kegiatan ini dilakukan pengujian Triaxial CU (dengan penjenjuran) pada contoh tanah yang dipadatkan dengan variasi nilai kadar air pemadatan. Pada pengujian triaxial digunakan variasi tegangan pengekan (σ_3) dari 50 kPa sampai 800 kPa untuk mensimulasikan konstruksi timbunan tinggi. Contoh tanah yang digunakan dijenuhkan terlebih dahulu sebelum dicetak dan dilakukan pengujian.

Contoh tanah yang digunakan berdiameter 3,80 cm dan tinggi 7,60 cm dipadatkan dalam beberapa lapisan dengan menggunakan metode *moist tamping* yang dilakukan di dalam cetakan triaksial tersebut. Energi pemadatan yang diberikan adalah sama, namun target kadar air pemadatan berbeda, disesuaikan dengan rentang yang ada di dalam spesifikasi umum dan di luar rentang, sebagai perbandingan. Kuat geser hasil pengujian Triaxial CU contoh tanah merah Tanjung Sari ditunjukkan pada Tabel 4-3.

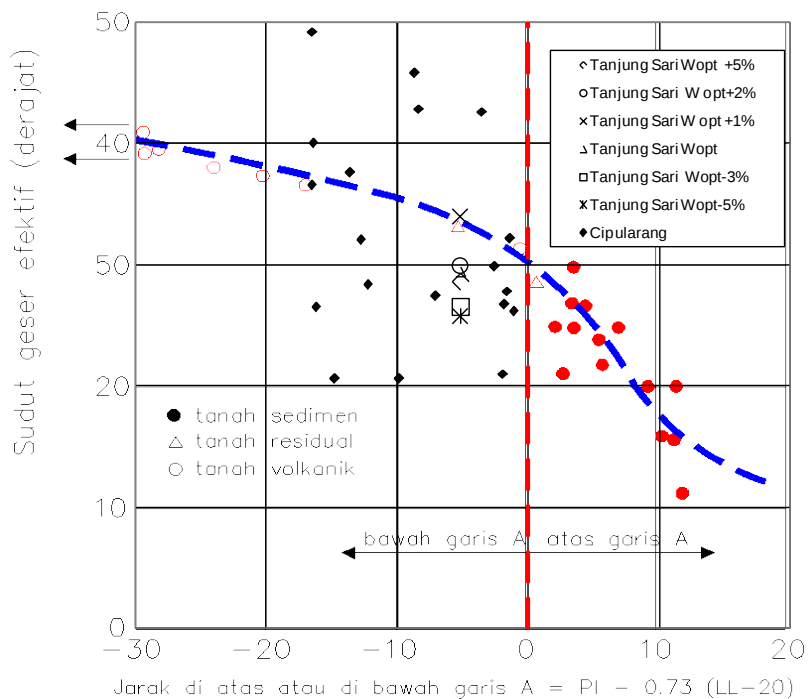
Tabel 4-3. Kuat geser hasil pengujian Triaxial CU

Kadar air	c total (kPa)	ϕ total (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Wopt + 5%	37.9	13.2	23.6	28.6
Wopt + 2%	22	24.2	17	29.8
Wopt+ 1%	35	24.2	13	33.9
Wopt	54	13.2	26	29.4
Wopt- 3%	44	13.5	19	26.5
Wopt- 5%	25.9	17.3	19.1	25.7

4.2.3.1 Hubungan kuat geser dengan jarak grafik plastisitas Wesley

Untuk material-material *intact* yang tidak dipengaruhi oleh adanya diskontinuitas, posisi tanah pada grafik plastisitas menjadi panduan yang benar untuk memprediksi sudut geser efektif (ϕ'), setidaknya untuk tanah berbutir halus plastisitas sedang hingga tinggi. Posisi contoh uji terhadap garis A di dalam grafik dapat mengindikasikan baik tidaknya sifat-sifat teknis material tersebut.

Korelasi ϕ' tanah merah Tanjung Sari terhadap posisinya di dalam grafik plastisitas diperlihatkan pada Gambar 4-15. Pada gambar tersebut terlihat bahwa tanah merah yang diuji sesuai dengan korelasi Wesley (2010).



Gambar 4-15 Sudut geser efektif dan posisinya pada grafik plastisitas (Wesley, 2010)

Grafik pada Gambar 4-15 dapat mempertajam klasifikasi dengan grafik plastisitas Wesley. Semakin jauh dari garis A, maka diprediksi semakin baik pula sifat teknisnya karena sudut geser yang lebih tinggi.

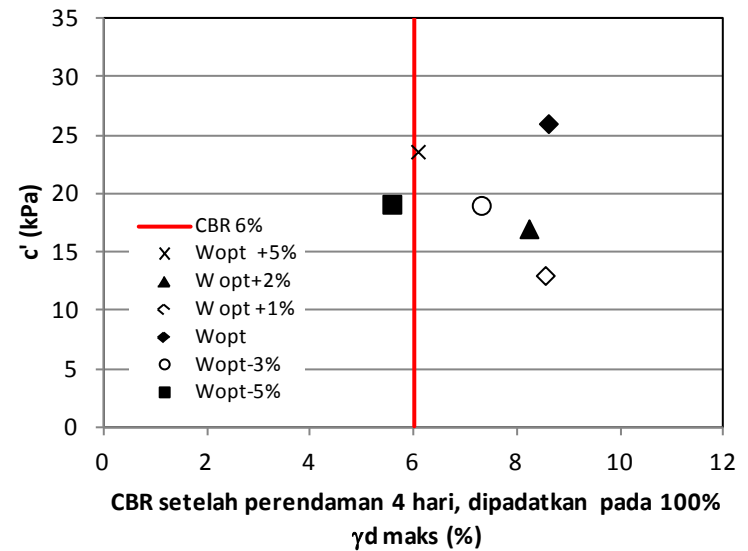
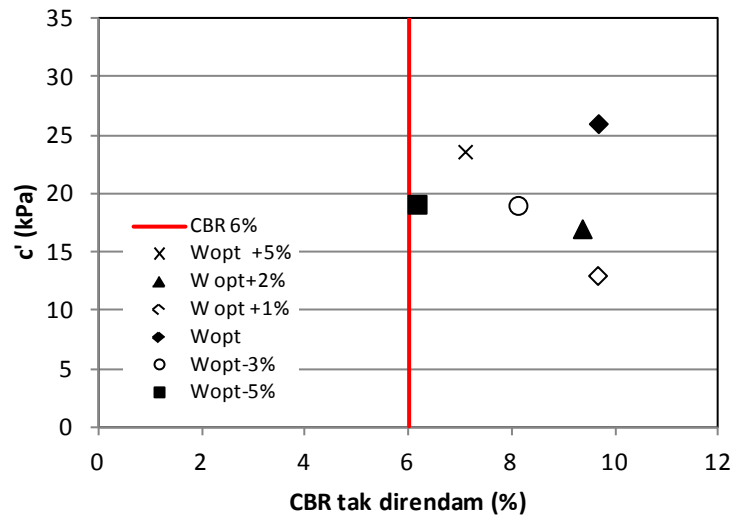
Tanah merah Tanjung Sari memiliki jarak -12,6 dari garis A. Tabel 4-4 memperlihatkan hasil perhitungan jarak terhadap garis A untuk tanah merah pada lokasi-lokasi pengambilan contoh lainnya. Dari Gambar 4-15 diperoleh bahwa semakin jauh jarak Dari Tabel 4-4 terlihat bahwa contoh tanah merah dari kuari Gunung Sindur memiliki jarak terjauh dari garis A, sehingga memiliki sifat-sifat teknis paling baik dibandingkan dengan contoh tanah merah lainnya.

Tabel 4-4 Plot jarak PI-0.73 (LL-20) terhadap garis A di dalam grafik plastisitas Wesley

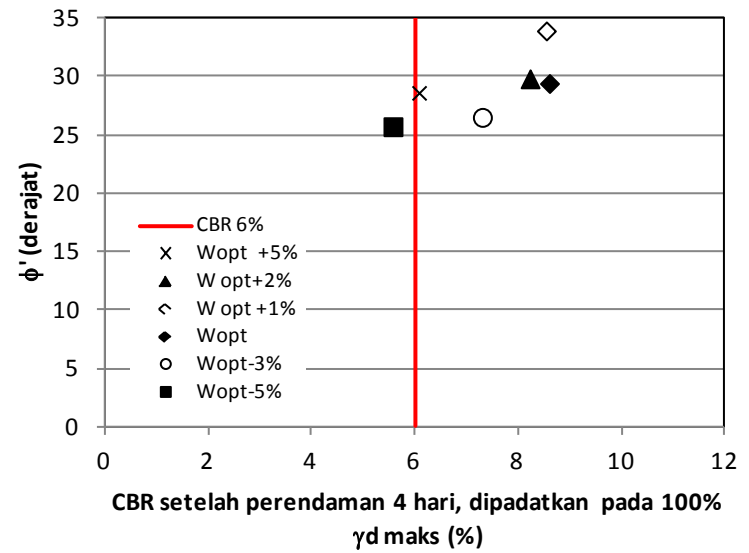
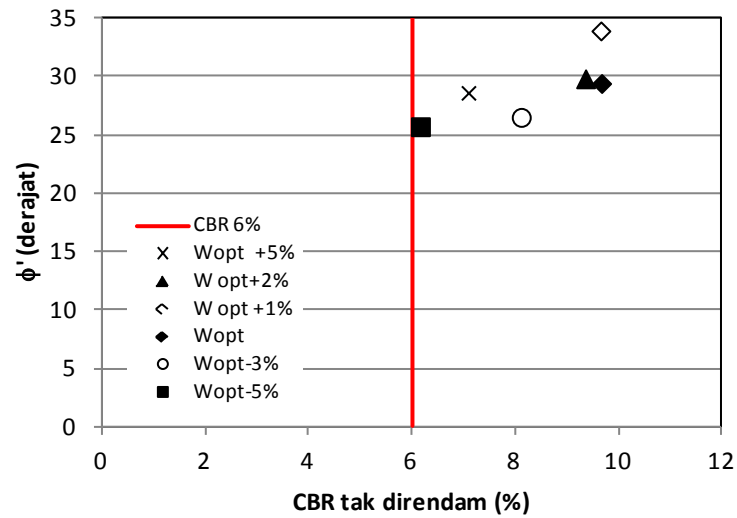
Lokasi pengambilan contoh tanah merah	PI - 0.73(LL-20)
Tanjung Sari, Sumedang (1)	-5.18
Tanjung Sari, Sumedang (2)	-12.66
Gunung Sindur, Bogor	-25.1
Gunung Panjang, Subang	-15.88
Suka Dalam, Subang	-6.07
Cibadak, Sukabumi	-31.94
Malibo, Bogor	-18.8
Tawang Mangu	-55.28
Vanderman Kec. Batu	-19.4
Kec. Banyu Putih, Batang	0.12
Jl. Raya Linggapura Bumiayu	-4.45
TM.01 Jl. Raya Ciamis Banjar	-9.29
Cinara Kec. Pesawahan, Kuningan	-2.34
Ds. Halimpu Kec. Beber, Cirebon	0.38
Citatah Bandung Barat	-11.72
Ranca Buaya Pameungpeuk, Garut	5.45
Nagreg	-11.93
Cisangkal, Rumpin	-5.651

4.2.3.2 Hubungan antara kuat geser dengan nilai CBR

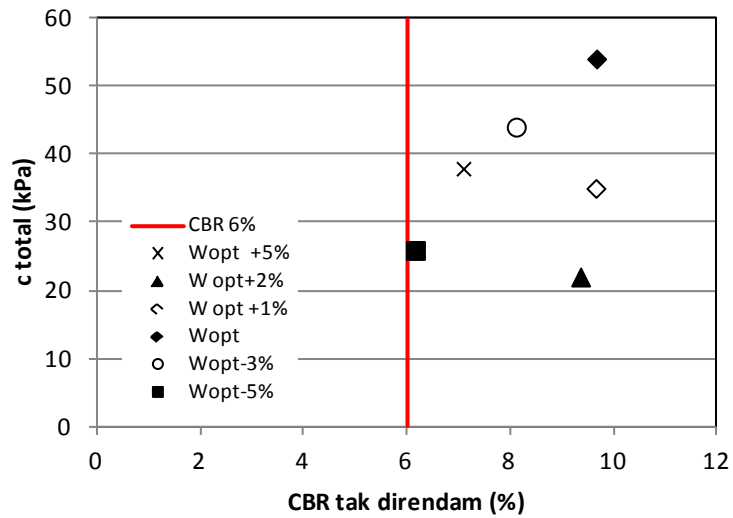
Plot antara kohesi dan sudut geser efektif (c' dan ϕ') dalam terhadap nilai CBR memperlihatkan bahwa nilai sudut geser dalam berkorelasi positif terhadap nilai CBR, sedangkan nilai kohesi tidak menggambarkan adanya hubungan dengan nilai CBR. Grafik tersebut tersebut diperlihatkan pada Gambar 4-16 dan Gambar 4-17. Akan tetapi, nilai kohesi dalam kondisi total yang diperoleh dari pengujian triaksial CU (tanpa mengurangi nilai kuat geser dengan tekanan air pori eksese) meningkat seiring dengan kenaikan nilai CBR, lihat Gambar 4-18.



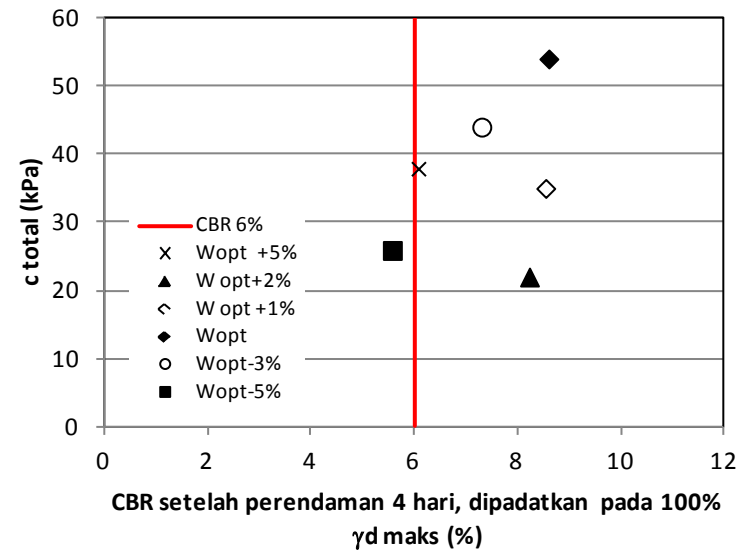
Gambar 4-16. Hubungan c' dan nilai CBR dengan kepadatan standar



Gambar 4-17. Hubungan ϕ' dan nilai CBR



(a) c_{total} dan nilai CBR standar yang tak direndam



(b) c_{total} dan nilai CBR standar yang direndam

Gambar 4-18. Hubungan c dalam kondisi tegangan total dan nilai CBR Standar

4.2.4 Sifat pemampatan dari uji konsolidasi

Uji konsolidasi dilakukan untuk contoh tanah Wopt, Wopt-3% dan Wopt+1%, juga untuk Wopt+5%, Wopt+2% dan Wopt-5%. Nilai Cc dari hasil pengujian adalah 0,07 – 0,10. Nilai Cv berada di rentang 0,007 – 0,0089 cm²/det, sedangkan perhitungan permeabilitas memberikan nilai k sebesar $9,91 \times 10^{-8}$ – $1,36 \times 10^{-7}$ cm/det.

Nilai-nilai tegangan vertikal dan pembacaan arloji setelah 24 jam diplotkan ke dalam grafik regangan terhadap σ_1 untuk memprediksi parameter E_{oed} yang digunakan di dalam analisis stabilitas dan deformasi dengan model material Hardening Soil. Metode yang diacu untuk penentuan parameter E_{oed} ini adalah Surarak (2010).

4.2.5 Penghitungan Air Void Content

Penghitungan Air Void Content memberikan Nilai AV material timbunan untuk rentang Wopt-3% s.d Wopt+1% adalah < 10% yang sesuai dengan kriteria yang disyaratkan sebagai bahan timbunan kohesif. Tabel 4-5 merangkum hasil uji laboratorium dan penghitungan Air Void Content contoh tanah merah Tanjung Sari secara lengkap.

4.3 Rangkuman sifat-sifat tanah merah

Tabel 4-5 berikut merangkum seluruh hasil pengujian laboratorium dan penghitungan nilai Air Voids untuk contoh tanah Tanjung Sari.

Tabel 4-5 Rangkuman hasil uji laboratorium dan penghitungan AV contoh
Tanjung Sari

Variasi kadar air	1	2	3	4	5	6	7
	Wopt+5%	Wopt+2%	Wopt+1%	Wopt	Wopt-1%	Wopt-3%	Wopt-5%
Klasifikasi USCS	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH
Klasifikasi Wesley	Halloysite	Halloysite	Halloysite	Halloysite	Halloysite	Halloysite	Halloysite
LL (%)	89	89	89	89	89	89	89
PL (%)	42	42	42	42	42	42	42
Gs	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
Kadar air, w (%) *	43.5	40.5	39.5	38.5	37.5	35.5	33.5
w/PL	1.04	0.96	0.94	0.92	0.89	0.85	0.80
CBR standar, kondisi terendam (%)	6.07	8.22	8.54	8.60	8.40	7.30	5.57
CBR modified, kondisi terendam (%)	5.65	8.44	8.84	8.89	8.57	7.02	4.77
Air Voids, AV (%)	2.52	2.21	2.30	3.18	4.45	9.92	15.23
c efektif (kPa)	23.6	17	13	26	Tidak dikerjakan	19	19.1
Trx CU							
ϕ efektif (kPa)	28.6	29.8	33.9	29.4	Tidak dikerjakan	26.5	25.7
Trx CU							

Dari Tabel 4-5 dapat disimpulkan hasil sebagai berikut:

- Nilai CBR standar (kondisi terendam) untuk rentang Wopt-3% s.d Wopt+1% adalah 7.30% - 8.54% yang artinya memenuhi persyaratan di dalam spesifikasi umum yaitu $> 6\%$.
- Nilai AV material timbunan untuk rentang Wopt-3% s.d Wopt+1% adalah $< 10\%$ yang sesuai dengan kriteria yang disyaratkan sebagai bahan timbunan kohesif.

5 Stabilitas dan deformasi timbunan

5.1 Penampang melintang timbunan standar

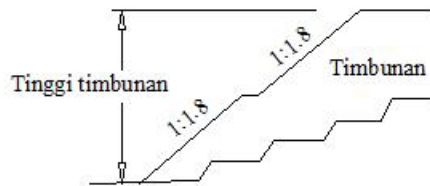
Timbunan harus didesain secara rasional, dengan mempertimbangkan kondisi lapangan (kondisi tanah, material timbunan dan kondisi cuaca, dll.), kestabilan timbunan serta kondisi konstruksi dan setidaknya lereng-lereng di antara bahu yang saling bersebelahan harus memiliki kemiringan yang sama.

DPU (2006) dan sejumlah referensi dari proyek pembangunan timbunan memberikan nilai-nilai standar yang ditentukan secara empiris ditunjukkan dalam Tabel 5-1 dan Gambar 5-1. Nilai-nilai tersebut dapat dijadikan acuan untuk kemiringan lereng standar timbunan berkenaan dengan material timbunan dan tinggi timbunan tertentu.

Tabel 5-1 Kemiringan standar lereng berdasarkan material timbunan dan tinggi timbunan

Acuan	Material Timbunan	Tinggi Timbunan (m)	Kemiringan Standar	Jumlah trap	Lebar trap/berm (m)	Keterangan
Panduan Manajemen Pekerjaan Tanah, DPU (2006)	Tanah kohesif vulkanik (V)	< 5 m	1:1,8 – 1:2,0	-	1,5 – 2,0	Untuk digunakan pada timbunan dengan kapasitas daya dukung yang memadai pada tanah fondasi, yang tidak terpengaruh oleh penggenangan. Klasifikasi tanah <i>unified</i> tipikal ditunjukkan sebagai acuan. Bila terdapat suatu pengecualian, maka harus dilakukan perhitungan stabilitas.
Kriteria perencanaan rencana jalan tol Cisumdawu (2012)	Tanah residual eks galian	Tidak disebutkan	1 : 2,0	2 - 3	4	Jumlah trap yang lebih dari 2-3 m dilakukan kajian terhadap perencanaan dan diputuskan menggunakan konstruksi jembatan karena terlalu tinggi dan ada masalah stabilitas
Kriteria perencanaan jalan tol Cipularang (2005)	Tanah merah dan sirtu	Bervariasi s.d 40 m	1:1,5 - 1: 2,0	2 - 4	4	-
Pekerjaan Tanah Dasar Buku 2 Pedoman Pekerjaan tanah dasar untuk pekerjaan jalan (2006)	Lempung	Tidak disebutkan	1:1,5 – 1:2,5	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	-

Catatan: Tinggi timbunan diukur dari kaki hingga puncak lereng, kriteria ini hanya sebagai pedoman dan bukan desain akhir



Gambar 5-1 Tinggi timbunan menurut DPU (2006)

Kemiringan lereng standar yang ditunjukkan dalam Tabel 5-1 merupakan kemiringan maksimum yang dibutuhkan untuk menjamin kestabilan lereng timbunan yang mendapat kapasitas daya dukung yang memadai dari tanah dasar. Timbunan juga tidak memiliki resiko infiltrasi atau penggenangan air tanah dari tanah dasar, telah mengalami proses pemadatan dalam tiap lapisan tipis dengan pemadatan horisontal serta telah mendapat penanganan kontrol erosi, bila diperlukan.

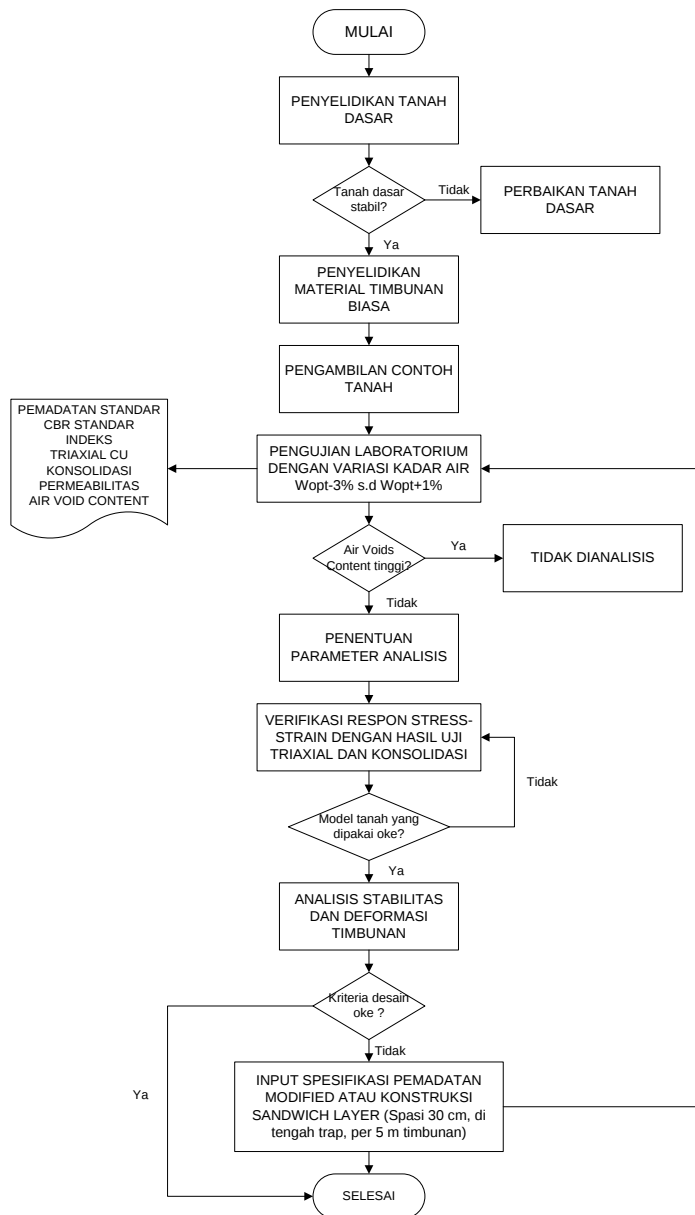
5.2 Tahapan analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi

Gambar 5-2 adalah bagan alir tahapan analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi. Pengumpulan dan pengkajian data sekunder dari lokasi-lokasi kajian penerapan timbunan tinggi dilakukan untuk mengetahui kriteria desain, metode desain, metode konstruksi dan monitoring instrumentasi timbunan tinggi.

Pengumpulan data primer dilakukan melalui pengujian laboratorium dan lapangan, yang selanjutnya digunakan dalam mengembangkan korelasi-korelasi parameter perencanaan melalui studi parametrik, simulasi numerik, verifikasi maupun validasi.

Perhitungan AV juga menjadi dasar analisis dan deformasi timbunan, dimana jika nilai AV tinggi maka material tanah merah tersebut dianggap tidak layak sebagai material timbunan. Analisis dan deformasi timbunan dilakukan

dengan metode elemen hingga dan bantuan piranti lunak Plaxis 2D versi 9.0 (Plaxis b.v, 2008).



Gambar 5-2 Tahapan analisis stabilitas dan deformasi

5.3 Analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi dengan metode elemen hingga

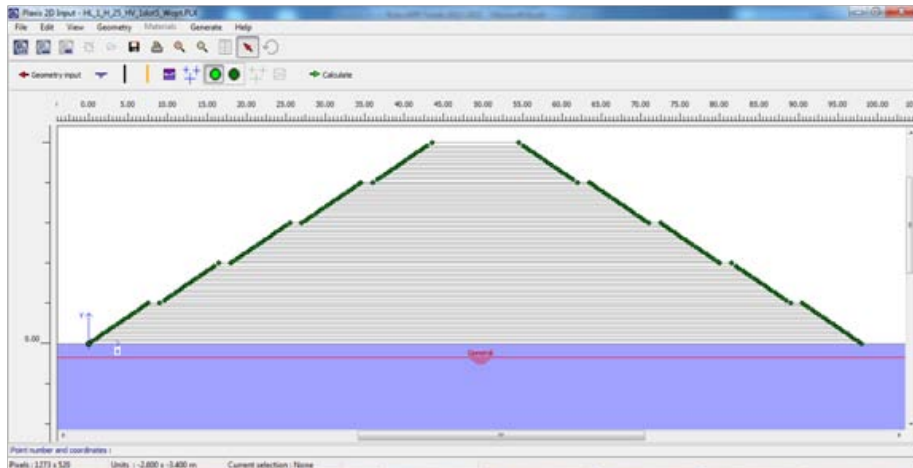
Dengan memperhatikan kemiringan standar lereng berdasarkan material timbunan dan tingginya, dibuat sebuah eksperimen desain untuk pemodelan timbunan tinggi. Eksperimen desain tersebut dilakukan dengan bantuan piranti lunak Plaxis 2D versi 9.0 (Plaxis b.v, 2008).

Response variable dalam analisis stabilitas dan deformasi adalah faktor keamanan (FK) dan deformasi. Secara garis besar, bagan alir pemodelan numerik timbunan tinggi dengan metode elemen hingga diperlihatkan pada Gambar 5-2.

5.3.1 Model geometri dan pembebanan timbunan tinggi

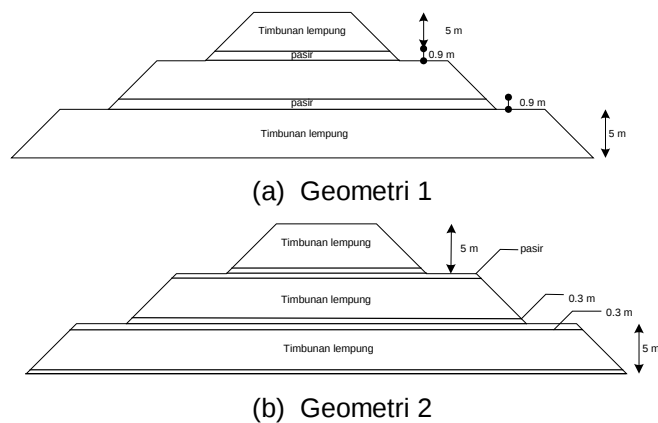
Tinggi timbunan yang dimodelkan bervariasi yaitu 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m s.d 40 m. Kemiringan timbunan mengacu kepada DPU (2006) yaitu kemiringan standar 1V:1H dan 1V:1,5H. Lebar jalan yang dimodelkan merujuk ke PP No. 34 (2006), yaitu paling sedikit 11 meter untuk jalan arteri primer. Model timbunan menggunakan asumsi lebar jalan terbesar, yaitu 11 meter.

Model konstitutif tanah yang digunakan adalah model *hardening-soil* yang akan dibahas detail di dalam bab ini. Model geometri timbunan diperlihatkan pada Gambar 5-3.



Gambar 5-3 Model geometri timbunan tinggi

Selain geometri model timbunan tanah yang dipadatkan per 30 cm sampai mencapai tinggi maksimumnya, dimodelkan pula geometri timbunan dengan *sandwich layer* di lapisan tengah dan bawah timbunan. Geometri *sandwich layer* diperlihatkan pada Gambar 5-4 berikut. Pada kedua geometri tersebut diaplikasikan beban alat pemadatan sebesar 8 kPa.



Gambar 5-4 Geometri sandwich layer

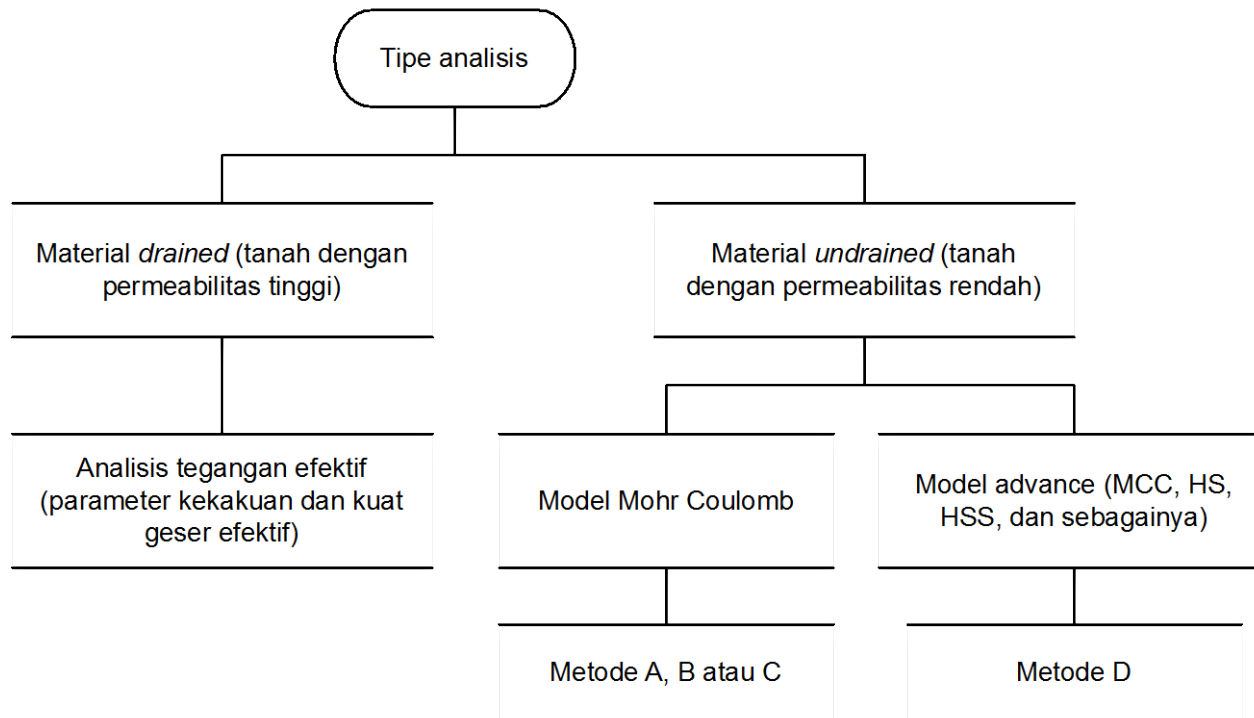
Karena simulasi elemen hingga ditujukan untuk memodelkan tahap-tahap konstruksi dan pemadatan timbunan sesuai Spesifikasi Umum (DPU, 2010) yaitu 30 cm per lapisan, maka beban yang diberikan di dalam pemodelan sebesar 8 kPa untuk memperhitungkan pengaruh beban alat pemadatan di lapangan. Adapun pengaruh jenis alat pemadatan sudah disimulasikan oleh Bathrust, 2009 terhadap dinding uji RMC, dan hasilnya pemberian beban yang paling sesuai adalah sebesar 8 kPa (Huang, 2009). Beban lalu lintas dimodelkan sebesar 15 kPa merujuk kepada kriteria dari Panduan Geoteknik 4 (DPU, 2001) untuk jalan kelas I.

5.3.2 Model numerik timbunan tinggi

5.3.2.1 Tipe analisis dengan Metode Elemen Hingga

Dalam Plaxis 9.02 tersedia pilihan tipe model material dengan perilaku *drained* (tanah permeabilitas tinggi seperti pasir) dan material *undrained* (tanah permeabilitas rendah seperti lempung). Akan tetapi, pemodelan perilaku tanah *undrained* lebih rumit dibandingkan dengan tanah *drained* dan Plaxis bv (2008) menyarankan agar berhati-hati ketika memodelkan tanah *undrained*.

Tipe analisis untuk material *undrained* adalah *undrained effective stress analysis* dan *undrained total stress analysis*. Jenis analisis dalam Plaxis dirangkum dalam Tabel 5-2. Surarak (2010) membagi tipe analisis *undrained* dalam Plaxis menjadi 4 metode (A, B, C dan D) seperti diperlihatkan pada Gambar 5-5 dan dijelaskan secara detail pada Tabel 5-3.



Gambar 5-5 Tipe Analisis dalam Metode Elemen Hingga (Surarak, 2010)

Tabel 5-2 Jenis Analisis dalam Plaxis (Plaxis bv, 2008)

NO	Jenis analisis	Parameter	Tipe perilaku material	Model Tanah	Keterangan
1	<i>Undrained effective stress analysis with effective stiffness parameters</i>	<i>Effective stiffness parameter</i>	<i>Undrained</i>	Semua model	PLAXIS akan secara otomatis menambahkan bulk modulus air ke dalam bulk modulus tanah, dan mentransformasikan parameter kekakuan efektif E dan ν menjadi parameter <i>undrained</i> E_u dan ν_u
2	<i>Undrained effective stress analysis with effective strength parameters</i>	ϕ' dan c'	<i>Undrained</i>	Semua model	- Dapat memodelkan kenaikan kuat geser akibat konsolidasi - Dapat membedakan tegangan efektif dan tegangan eksese air pori
3	<i>Undrained effective stress analysis with undrained strength parameters</i>	$\phi = \phi_u = 0$ $c_u = c_u$ Effective stiffness parameter	<i>Undrained</i>	MC, HS, HSS Tidak berlaku untuk SS(C) model	Jika digunakan Hardening Soil atau HS model dengan $\phi = 0$, modulus kekakuan tidak lagi berperilaku <i>stress-dependent</i>
4	<i>Undrained total stress analysis with all parameters undrained</i>	E_u ν_u (typically 0.495-0.499), c_u (s_u), $\phi = \phi_u = 0^\circ$.	Non-porous atau <i>drained</i>	MC, HS, HSS Tidak berlaku untuk SS(C) model	Tidak ada perbedaan antara tegangan efektif dan tegangan air pori. Oleh karena itu seluruh output terkait tegangan efektif harus dianggap sebagai tegangan total dan tekanan pori nol. Jika menginginkan output grafik tegangan, dapat dipilih jenis material <i>drained</i>

Keterangan: MC = Mohr-Coulomb, HS = Hardening Soil, HSS = Hardening Soil with Small Strain, SS(C) = Soft Soil (Creep)

Tabel 5-3. Analisis untuk Material *Undrained* (Surarak, 2010)

Metode	Tipe Material	Model Material	Tegangan yang Dihitung	Parameter	
				Kekakuan	Kekuatan
A	<i>Undrained</i>	MC	Tegangan efektif dan tekanan pori	Efektif (E' , ν')	Efektif (c' , ϕ')
B	<i>Undrained</i>	MC	Tegangan efektif dan tekanan pori	Efektif (E' , ν')	Total (c_u , ϕ_u)
C1	<i>Non-porous</i>	MC	Tegangan total	Total (E_u , ν_u)	Total (c_u , ϕ_u)
C2	<i>Drained</i>	MC	Tegangan total	Total (E_u , ν_u)	Total (c_u , ϕ_u)
D	<i>Undrained</i>	MCC, SS(C), HS, HSS, MCC	Tegangan efektif dan tekanan pori	Parameter efektif, tergantung model tanah yang dipilih	

Keterangan: MC = Mohr-Coulomb, HS = Hardening Soil, HSS = Hardening Soil with Small Strain, SS(C) = Soft Soil (Creep), MCC=Modified Cam Clay

Lebih lanjut Surarak menyimpulkan bahwa Metode A yang menggunakan model konstitutif Mohr-Coulomb tidak direkomendasikan karena hasil perhitungan kuat geser tanah dan tekanan air pori yang tidak akurat.

Metode B yang identik dengan Metode A dan menggunakan parameter kekakuan efektif serta model Mohr-Coulomb juga sebaiknya tidak dilanjutkan dengan analisis konsolidasi. Jika digunakan model Hardening Soil, modulus kekakuan tidak lagi bersifat *stress-dependent* dan tidak dapat memodelkan *compression hardening*. Sebaliknya, model tersebut tetap dapat memisahkan modulus pembebanan dan *unloading-reloading* serta *shear hardening*.

Metode C1 adalah pendekatan tegangan total. Metode ini menggunakan parameter kuat geser *undrained* dan parameter kekakuan *undrained*. Tipe material dalam Metode C1 adalah "Non-porous" yang berarti tekanan pori awal maupun eksese tidak diperhitungkan. Kerugian metode ini adalah tidak adanya perbedaan antara tegangan efektif dan tekanan air pori. Oleh karena itu, seluruh tegangan yang dihitung adalah tegangan total dan tekanan air pori adalah nol.

Metode C2 identik dengan Metode C1 kecuali tipe materialnya adalah "Drained". Perbedaan utama antara Metode C1 dan C2 adalah Metode C2 membawa tekanan air pori awal ke dalam analisis. Walaupun demikian, tidak terjadi perubahan tekanan air pori yang dihitung selanjutnya.

Parameter input Metode D untuk kekakuan dan kuat geser sama dengan Metode A (parameter efektif). Salah satu perbedaannya, Metode D menggunakan model yang lebih kompleks (misalnya *Hardening Soil* atau *Soft Soil*).

5.3.2.2 Model Hardening Soil

Model konstitutif yang digunakan di dalam analisis adalah model *Hardening Soil*. Model *Hardening Soil* merupakan model advance yang dapat memodelkan hubungan regangan aksial dan tegangan deviator secara hiperbolik. Model ini pertama-tama dikembangkan oleh Kondner yang kemudian diformalkan oleh Duncan dan Chang menjadi model hiperbolik

(Plaxis bv, 2008). Model *Hardening Soil* kemudian dianggap menggantikan model hiperbolik karena menggunakan teori plastisitas (bukan elastisitas), mengandung parameter dilatasi tanah dan mempunyai *yield cap*.

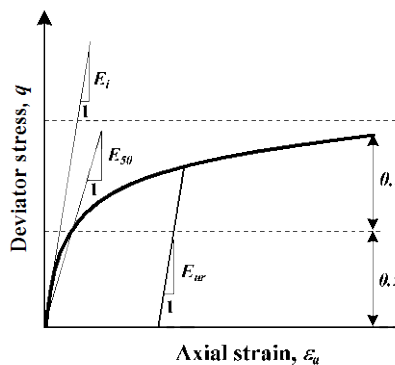
Salah satu perbedaan *Hardening Soil* dengan Mohr-Coulomb adalah kemampuan memodelkan kekakuan yang tergantung tegangan (*stress-dependent stiffness*). Kemampuan ini dibutuhkan karena modulus *unloading*, E_{ur} , dan modulus pembebanan pertama, E_{50} , cenderung meningkat dengan meningkatnya tekanan pengekan (*confining pressure*). Oleh karena itu, lapisan anah yang lebih dalam mempunyai kekakuan yang lebih besar dibandingkan lapisan tanah yang berada di dekat permukaan.

Kekakuan juga lebih tinggi untuk kasus *unloading-reloading* dibandingkan kasus pembebanan utama. Oleh karena itu, Plaxis BV (2010) menyebutkan bahwa pemilihan modulus Young yang konstan dalam model Mohr-Coulomb harus memilih suatu nilai yang konsisten dengan tingkat tegangan dan perkembangan *stress path*. Untuk mengatasi masalah ini, Plaxis menyediakan pilihan peningkatan kekakuan dengan bertambahnya kedalaman tanah dalam model Mohr-Coulomb.

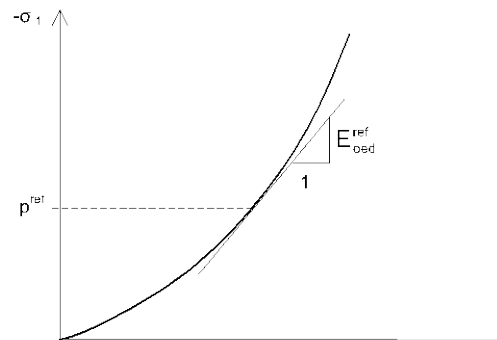
Input yang dibutuhkan untuk model *Hardening Soil* terdiri dari 10 parameter seperti dirangkum pada Tabel 5-4. Penentuan parameter E_{50} dari pengujian triaksial *consolidated drained* (CD) dan parameter E_{oed} dari uji konsolidasi diperlihatkan pada Gambar 5-6.

Tabel 5-4. Input Parameter *Hardening Soil* (Surarak, 2010)

ϕ'	Sudut geser dalam	Kemiringan garis keruntuhan dari kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb
c'	Kohesi	perpotongan-y garis keruntuhan dari kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb
R_f	Rasio keruntuhan	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$
φ	Sudut dilatansi	Fungsi dari ε_a dan ε_v
E_{50}^{ref}	Referensi kekakuan sekan dari uji triaxial drained	Perpotongan-y dalam ruang $\log(\sigma_3/p^{ref}) - \log(E_{50})$
E_{oed}^{ref}	Referensi kekakuan tangen untuk pembebanan primer oedometer	Perpotongan-y dalam ruang $\log(\sigma_1/p^{ref}) - \log(E_{oed})$
E_{ur}^{ref}	Referensi kekakuan unloading/reloading	Perpotongan-y dalam ruang $\log(\sigma_3/p^{ref}) - \log(E_{ur})$
m	Pangkat eksponensial	Kemiringan dari garis trend dalam ruang $\log(\sigma_3/p^{ref}) - \log(E_{50})$
ν_{ur}	Rasio Poisson unloading/reloading	0.2 (pengaturan baku)
K_0^{nc}	Koefisien tekanan tanah at-rest	$1 - \sin \phi'$ (pengaturan baku)



a. Penentuan E_{50} dari Uji Triaksial CD



b. Penentuan E_{oed} dari Uji Konsolidasi

Gambar 5-6. Penentuan Parameter Hardening Soil (Plaxis bv, 2008)

Jenis pengujian triaksial yang dibutuhkan dalam menentukan parameter *Hardening Soil* adalah triaksial *consolidated drained* (CD). Akan tetapi dalam praktek rekayasa geoteknik, pengujian triaksial CD jarang dilakukan untuk tanah kohesif karena permeabilitasnya yang rendah. Surarak (2010) memberikan prosedur untuk menentukan parameter hiperbolik tegangan-regangan efektif. Kuat geser yang digunakan dapat berasal dari uji triaksial *consolidated undrained* (CU), sedangkan hubungan tegangan-regangan untuk pembebanan utama diperoleh dari uji konsolidasi. Prosedur penentuan parameternya adalah:

1. Tentukan parameter kuat geser tanah efektif (c' , ϕ') dan rasio keruntuhan (R_f) dari uji triaksial CU.
2. Tentukan modulus E_{oed} pada beberapa tingkat tegangan vertikal efektif dari uji konsolidasi (lihat Gambar 5-6).
3. Tentukan E_t dari persamaan 5.1, kemudian tentukan E_i dengan persamaan 5.2:

$$E_t = \frac{1+s_0}{a_v} \left(1 - \frac{K_0^2}{1+K_0} \right) \dots \dots \dots [5.1]$$

$$E_i = \frac{E_t}{\left(1 - \frac{R_f(1-K_0)}{K_0(\tan^2(45+\phi'/2)-1)} \right)^2} \dots \dots \dots [5.2]$$

dimana:

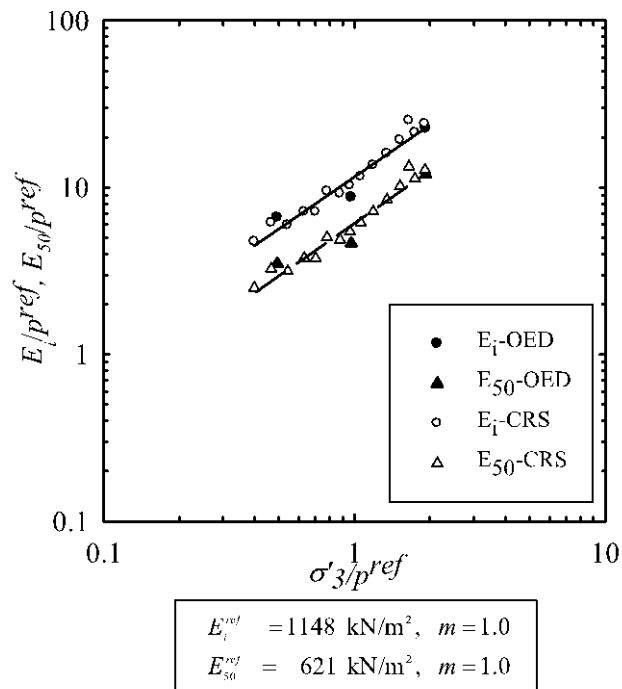
$$K_0 = 1 - \sin \phi \dots \dots \dots [5.3]$$

$$\frac{1+s_0}{a_v} = E_{oed} \dots \dots \dots [5.4]$$

Tentukan E_{50} untuk setiap nilai E_i dengan persamaan 5.5:

$$E_{50} = E_i \left(1 - \frac{R_f}{2} \right) \dots \dots \dots [5.5]$$

Plot variasi E_i dan E_{50} terhadap tekanan pengegang σ_3 yang dinormalisasi dengan tekanan referensi, $p^{ref} \cdot p^{ref}$ secara default dalam Plaxis adalah 100 kPa. Nilai rata-rata σ_3 dari setiap pembebanan ditentukan dengan mengkalikan nilai tegangan efektif vertikal dari uji konsolidasi dengan K_0 . Seperti dicontohkan pada Gambar 5-7, E_{50}^{ref} diperoleh dengan menarik garis vertikal sumbu x dari nilai $\frac{\sigma_3'}{p^{ref}}=1$, kemudian menarik garis horizontal ke arah sumbu y. Nilai pangkat eksponensial modulus, m , merupakan kemiringan dari trendline linier dalam skala log-log dalam gambar tersebut.



Gambar 5-7. Contoh Plot E_{50} dan σ_3'

5.3.1 Parameter analisis stabilitas dan deformasi

Parameter analisis diperoleh dari pengujian Indeks, Triaxial CU, Pemadatan (γ_d dan OMC) dan CBR. Di samping itu dilakukan juga perhitungan Air Void

(AV) dan potensi kolaps, namun kedua parameter tersebut tidak menjadi parameter analisis stabilitas dan deformasi.

Tanah merah yang dianalisis dipadatkan dengan kadar air pemadatan yang sesuai dengan spesifikasi umum, yaitu Wopt-3%, Wopt dan Wopt +1% dan di luar rentang spesifikasi umum, yaitu Wopt -5%, Wopt +2% dan Wopt +5%. Parameter desain timbunan tanah merah dan tanah dasar diperlihatkan pada Tabel 5-5 dan Tabel 5-6.

Tabel 5-5 Parameter analisis material timbunan sesuai spesifikasi

Nama	Timbunan Wopt	Timbunan Wopt+1%	Timbunan Wopt-3%	Tanah Dasar
Tipe Model Tanah	Undrained Hardening-Soil	Undrained Hardening-Soil	Undrained Hardening-Soil	Linier Elastic Non-porous
γ_{unsat}	17.03	16.38	17.040	-
γ_{sat}	17.46	17.89	17.450	100
k_x (m/hari)	2.590E-05	2.590E-05	2.590E-05	-
k_y (m/hari)	2.590E-05	2.590E-05	2.590E-05	-
ν (-)	0.20	0.20	0.20	0.20
c (kPa)	26.000	19.000		
ϕ (°)	29.400	26.500		
ψ (°)	0	0	0	0
R_{inter}	1	1	1	1
ν_{ur} (-)	-	-	-	-
p_{ref} (kN/m ²)	-	-	-	-
$E_{50 \text{ ref}}$ (kN/m ²)	5.904E+04	4.534E+04	4.992E+04	100,000,000
$E_{\text{oed ref}}$ (kN/m ²)	4.797E+04	2.422E+04	3.438E+04	
$E_{\text{ur ref}}$ (kN/m ²)	1.771E+05	1.360E+05	1.497E+05	

Tabel 5-6 Parameter analisis material timbunan yang tidak sesuai spesifikasi

Nama	Timbunan Wopt-5%	Timbunan Wopt+2%	Timbunan Wopt+5%	Tanah Dasar
Tipe Model Tanah	Undrained Hardening-Soil	Undrained Hardening-Soil	Undrained Hardening-Soil	Linier Elastic Non-porous
γ_{unsat}	15.79	17.11	16.72	-
γ_{sat}	17.18	17.67	17.15	100
k_x (m/hari)	2.590E-05	2.590E-05	2.590E-05	-

Nama	Timbunan Wopt-5%	Timbunan Wopt+2%	Timbunan Wopt+5%	Tanah Dasar
ky (m/hari)	2.590E-05	2.590E-05	2.590E-05	-
v (-)	0.20	0.20	0.20	0.20
c (kPa)	19.1	17	23.6	
ϕ (°)	25.7	29.8	28.6	
ψ (°)	0	0	0	0
R_inter	1	1	1	1
v_{ur} (-)	-	-	-	-
p_{ref} (kN/m2)	-	-	-	-
E 50 ref (kN/m2)	49916	15410	27510	100,000,000
E oed ref (kN/m2)	31628.4	22681.3	16593.2	
E ur ref (kN/m2)	149748	46230	82530	

Tabel 5-7 memperlihatkan parameter analisis *sandwich layer*. Model material *sandwich layer* adalah Mohr-Coulomb karena tidak memiliki data pengujian triaxial CU maupun konsolidasi untuk penentuan parameter E, c dan ϕ . Model material timbunan adalah Hardening Soil.

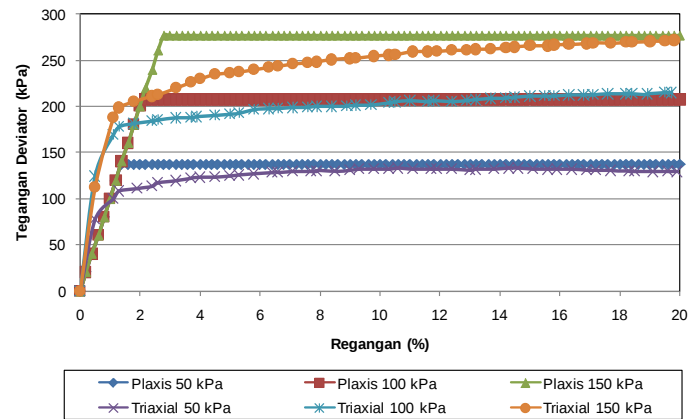
Tabel 5-7 Parameter dan model material untuk analisis stabilitas dan deformasi timbunan dengan sandwich layer

Nama	Dasar lapisan	Medium sand	Timbunan Wopt
Tipe Model Tanah	Non -porous	Drained Mohr- Coulomb	Undrained Hardening- Soil
γ_{unsat}	100	18.00	17.03
γ_{sat}	100	20.00	17.46
kx (m/hari)	0	1	2.590E-05
ky (m/hari)	0	1	2.590E-05
v (-)	0.20	0.00	0.20
c (kPa)	100,000,000	1	26.000
ϕ (°)	-	32,5	29.400
ψ (°)	-	0	0
R_inter	-	1	1
v_{ur} (-)	-	-	-
p_{ref} (kN/m2)	-	-	-
E 50 ref (kN/m2)	-	75,000	5.904E+04
E oed ref (kN/m2)	-		4.797E+04
E ur ref (kN/m2)	-		1.771E+05

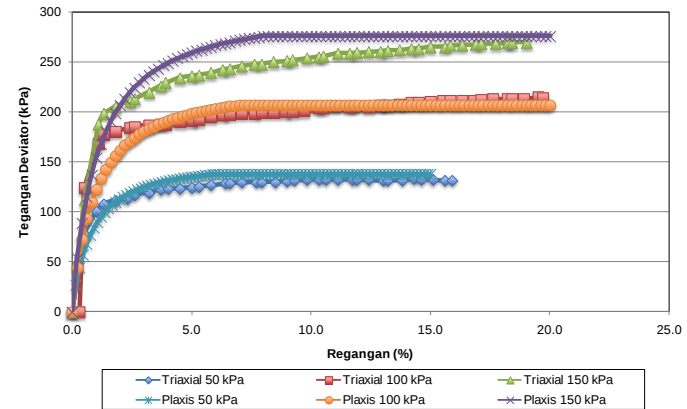
5.3.2 Validasi respon tegangan-regangan di dalam program elemen hingga

Validasi model tanah yang digunakan dalam analisis dilakukan dengan membandingkan perilaku tegangan - regangan dari pengujian triaksial terkonsolidasi tak terdrainase (*consolidated undrained*, CU) dengan model *Hardening Soil*. Perilaku tegangan-regangan dari model tersebut dibuat dengan menggunakan fasilitas *Soil Test* dalam Plaxis 9.02.

Hasil perbandingan perilaku tegangan-regangan tersebut diperlihatkan pada Gambar 5-8 untuk hasil pengujian Triaksial CU dengan kadar air $w_{opt}+2$. Terlihat bahwa perilaku tegangan - regangan dari pemodelan *Hardening-Soil* dinilai cukup mendekati perilaku dari pengujian Triaksial CU.



(a) Mohr-Coulomb



(b) Hardening-Soil

Gambar 5-8 Kurva tegangan-regangan untuk variasi tegangan 50 kPa, 100 kPa dan 150 kPa di Triaxial CU berbanding dengan tegangan-regangan model Mohr-Coulomb dan Hardening-Soil

5.4 Pembahasan hasil analisis

Pembahasan hasil analisis stabilitas dan deformasi timbunan tinggi disajikan dalam tiga kondisi, yaitu:

- 1) Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 1 (kepadatan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)
- 2) Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)
- 3) Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 3 dengan *sandwich layer*

Analisis variasi tinggi timbunan dengan pemadatan standar bertujuan untuk mengetahui pada batasan berapa meter, pemadatan standar masih memenuhi syarat stabilitas dan deformasi. Parameter timbunan dimodelkan bervariasi sesuai dengan variasi kadar air pemadatan yang disyaratkan di dalam spesifikasi timbunan di dalam DPU (2010), yaitu W_{opt} , $W_{opt+1\%}$ dan $W_{opt-3\%}$.

Sebagai pembandingan dilakukan pula analisis stabilitas untuk timbunan dengan variasi kadar air timbunan yang tidak mengikuti spesifikasi umum., yaitu $W_{opt-5\%}$, $W_{opt+2\%}$ dan $W_{opt+5\%}$.

5.4.1 Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 1 (kepadatan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)

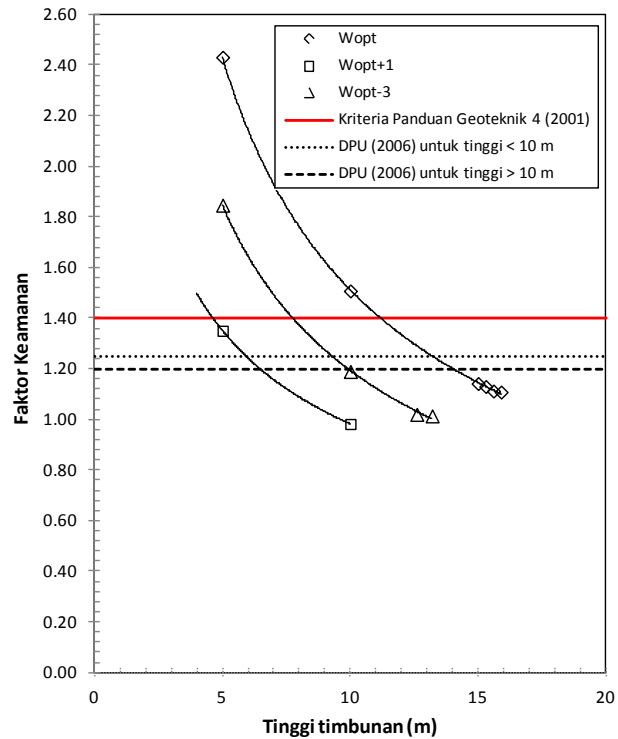
Hasil analisis stabilitas timbunan untuk Kondisi 1 diperlihatkan pada Gambar 5-9. Dalam Gambar 5-9 tersebut juga diplot kriteria stabilitas dari Panduan Geoteknik 4 (Kimpraswil, 2001) dan dari DPU (2006). Dapat disimpulkan pada gambar tersebut:

- Timbunan yang dipadatkan pada kondisi kadar air optimum memberikan faktor keamanan paling tinggi baik untuk kemiringan 1:1.5 maupun 1:1.

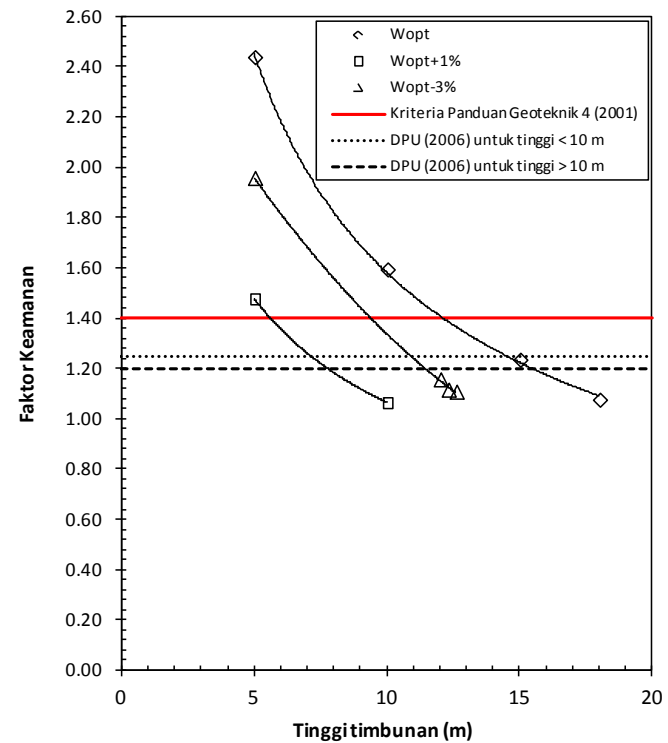
- Kemiringan timbunan berpengaruh terhadap stabilitas timbunan, terutama setelah ketinggian timbunan ≥ 10 m. Faktor keamanan meningkat dari timbunan dengan kemiringan 1:1 terhadap kemiringan 1:1.5.
- Hasil analisis memberikan indikasi bahwa tinggi maksimum timbunan (yang dipadatkan dengan kadar air optimum dan kemiringan 1:1.5) yang masih memenuhi kriteria stabilitas timbunan adalah 15 m. dengan demikian maka batasan tinggi timbunan 15 m yang dinyatakan oleh lima pedoman dan spesifikasi dapat diterima.

Hasil analisis prediksi deformasi timbunan untuk Kondisi 1 diperlihatkan pada Gambar 5-10 dan Gambar 5-11. Dari gambar tersebut disimpulkan:

- Deformasi vertikal timbunan yang paling kecil adalah pada timbunan dengan kadar air optimum (W_{opt}), diikuti dengan $W_{opt}-3\%$ dan $W_{opt}+1\%$.
- Jika dihubungkan dengan kriteria deformasi timbunan akibat penurunan elastik dan konsolidasi primer selama umur rencana maka deformasi vertikal maksimum pada arah melintang timbunan dengan kemiringan 1V:1,5H dan 1V:1H masih memenuhi kriteria karena lebih kecil dari persyaratan deformasi SCDOT (2008) sebesar 203.2 mm.
- Jika dihubungkan dengan kriteria deformasi timbunan pada kondisi kestabilan paling ekstrim untuk menjamin keselamatan pengguna jalan dari SCDOT (2008), maka deformasi vertikal maksimum pada arah melintang timbunan masih memenuhi kriteria karena kurang dari 50,8 mm.

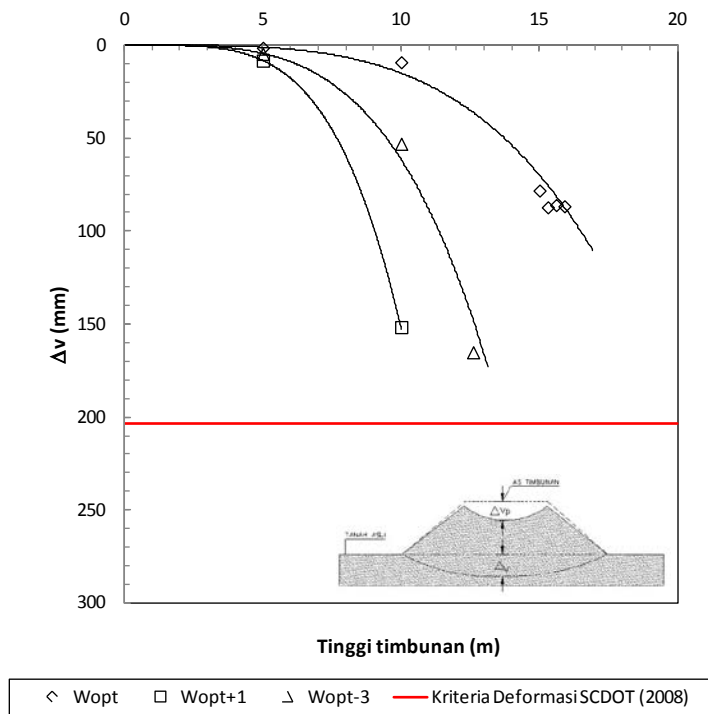


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

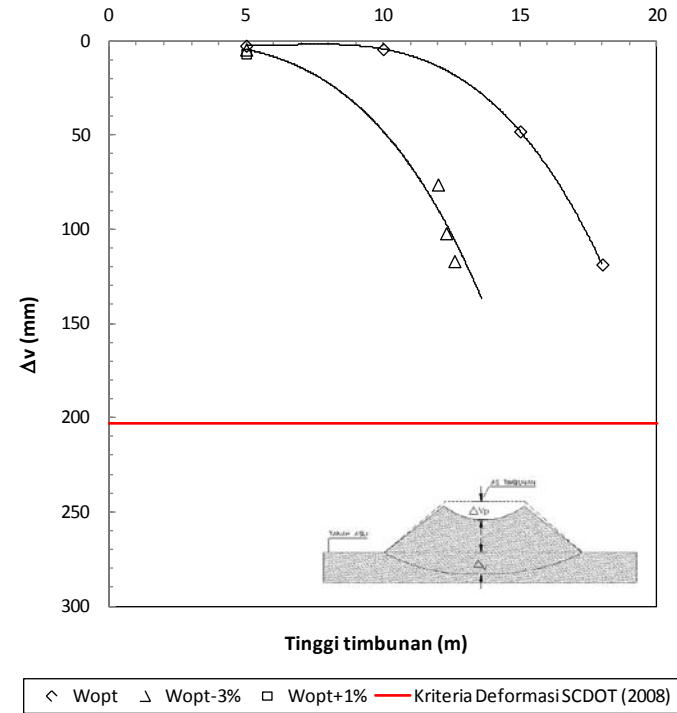


(b) Kemiringan timbunan 1V:1.5H

Gambar 5-9 Stabilitas timbunan Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)

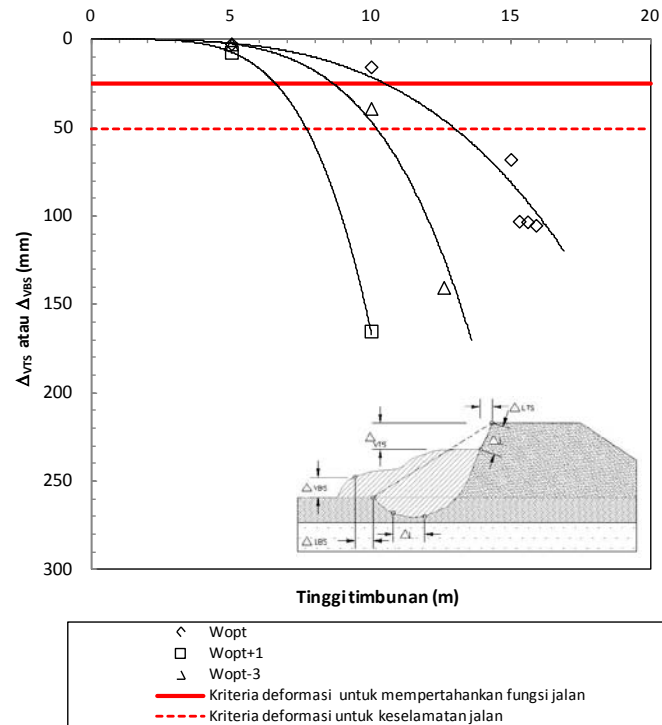


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

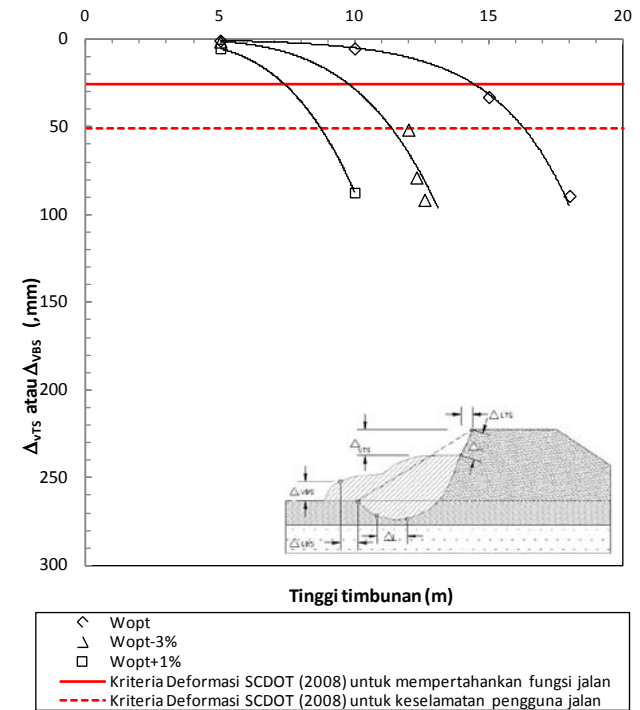


(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-10 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)



(a) Kemiringan timbunan 1V:1H



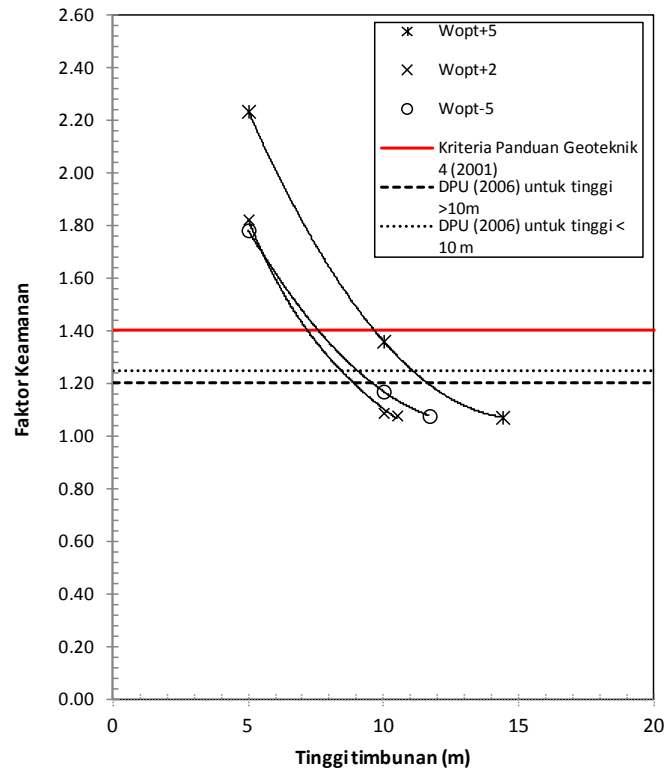
(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-11 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 1 (kepadatan sesuai spesifikasi umum Bina Marga)

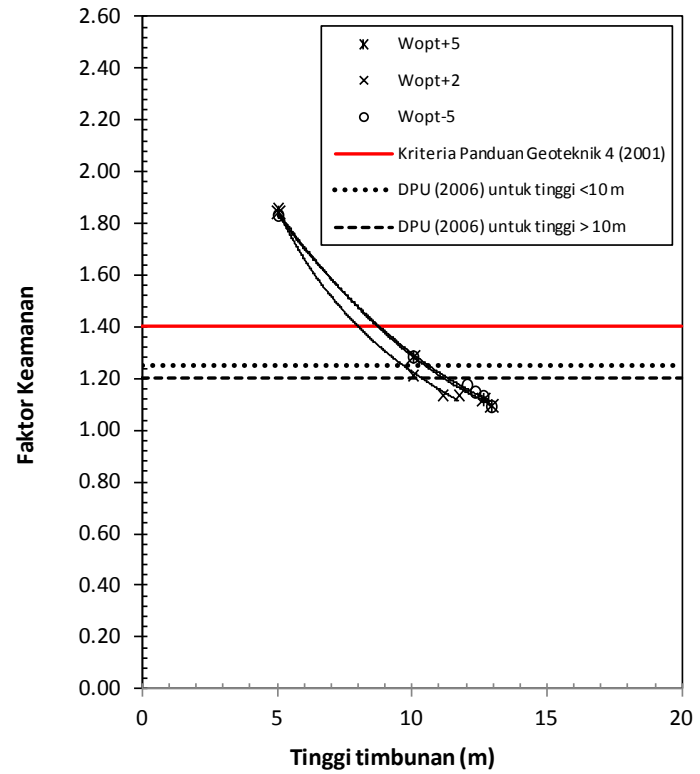
5.4.2 Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga)

Hasil analisis stabilitas dan deformasi untuk Kondisi 2 pada Gambar 5-12, Gambar 5-13 dan Gambar 5-14 memperlihatkan bahwa:

- Jika timbunan tidak sesuai dengan spesifikasi umum Bina Marga, maka diprediksi tinggi maksimum timbunan dengan target $F_t \geq 1,25$ hanya mencapai 11 m untuk timbunan 1V:1H dan 1V:1, sedangkan jika sesuai dengan spesifikasi umum tinggi timbunan dapat mencapai 15 m.
- Dari segi deformasi, jika kemiringan timbunan 1V:1.5H maka masih memenuhi kriteria deformasi SCDOT. Namun demikian jika kemiringan timbunan 1V:1H, timbunan tidak memenuhi kriteria deformasi SCDOT karena deformasinya lebih besar dari yang disyaratkan.

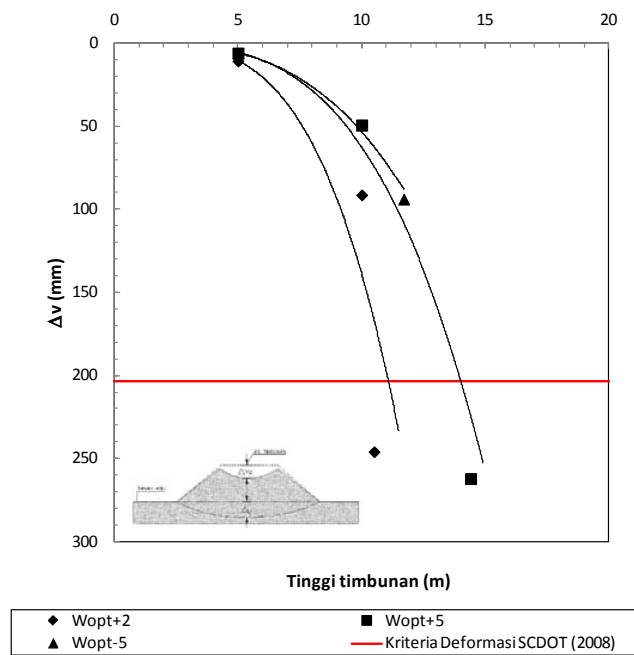


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

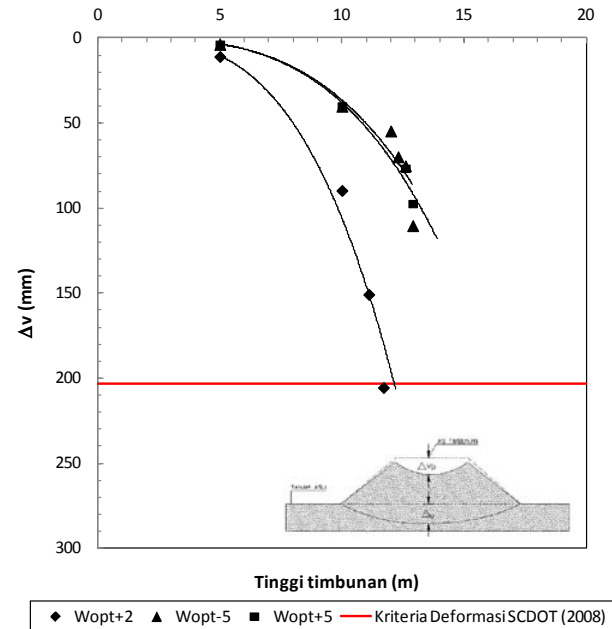


(b) Kemiringan timbunan 1V:1.5H

Gambar 5-12 Stabilitas timbunan Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga)

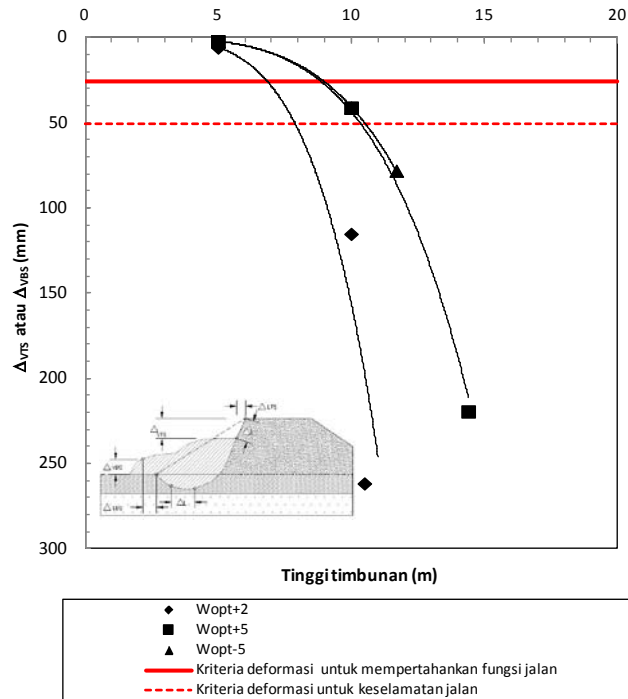


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

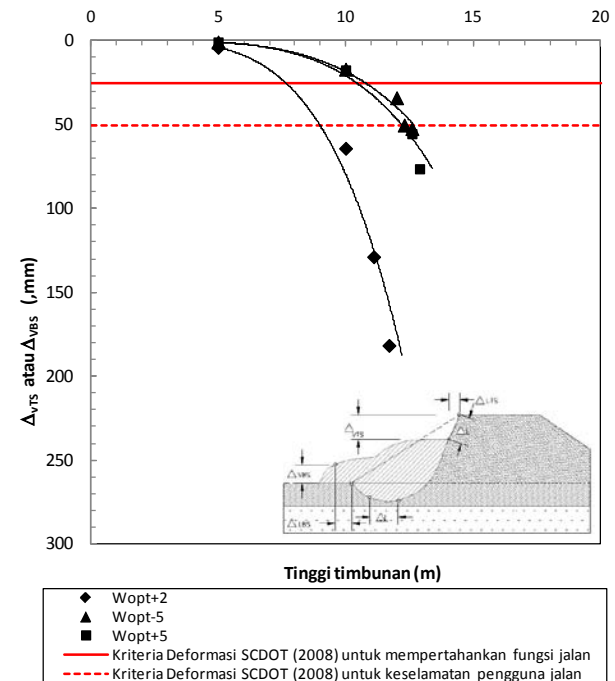


(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-13 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga)



(a) Kemiringan timbunan 1V:1H



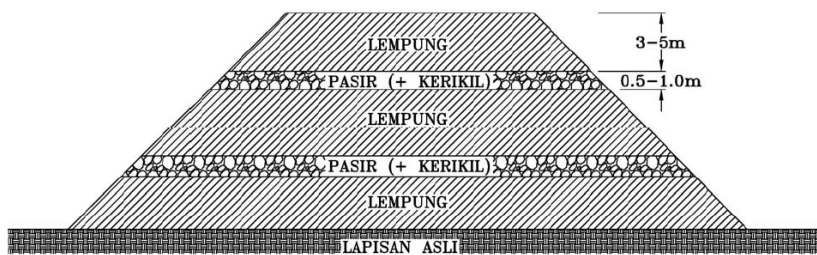
(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-14 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 2 (kepadatan tidak sesuai spesifikasi umum Bina Marga)

5.4.3 Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 3 (dengan penambahan *sandwich layer*)

Evaluasi kinerja timbunan Kondisi 3 dengan penambahan *sandwich layer* pada prinsipnya bertujuan untuk mengetahui spasi (jarak) optimum lapisan pasir yang dibutuhkan. Simulasi dilakukan dengan tinggi timbunan 25 m, menggunakan asumsi pemadatan standar dengan kadar air optimum.

Merujuk ke DPU (2006), tebal *sandwich layer* yang dimodelkan adalah 30 cm dengan dua variasi pemasangan, yaitu di bagian tengah dan bawah trap timbunan. Suwitatmadja (tidak bertahun) memberikan contoh aplikasi sistem *sandwich* untuk mempercepat penurunan timbunan (Gambar 5-15).

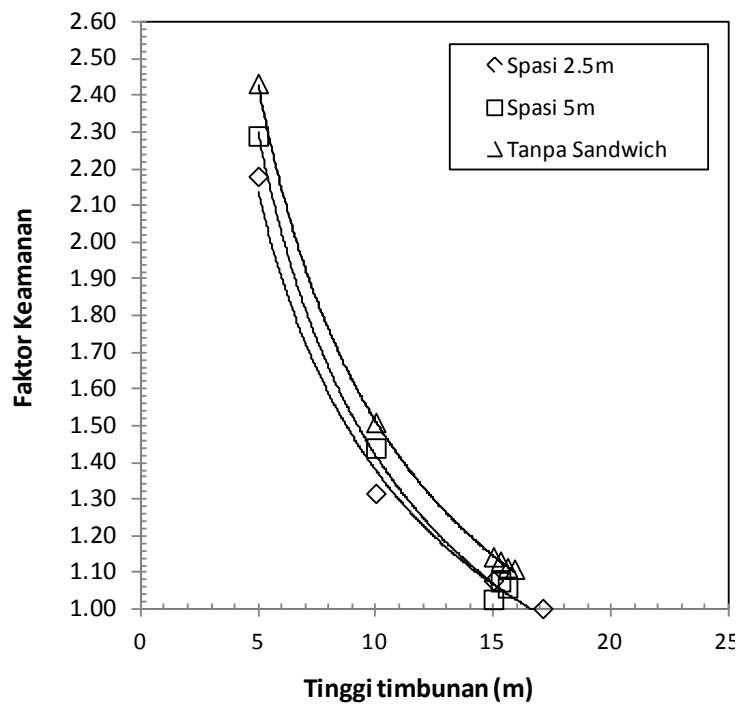


Gambar 5-15 Contoh sistem *sandwich* untuk timbunan (Suwitaatmadja, tidak bertahun)

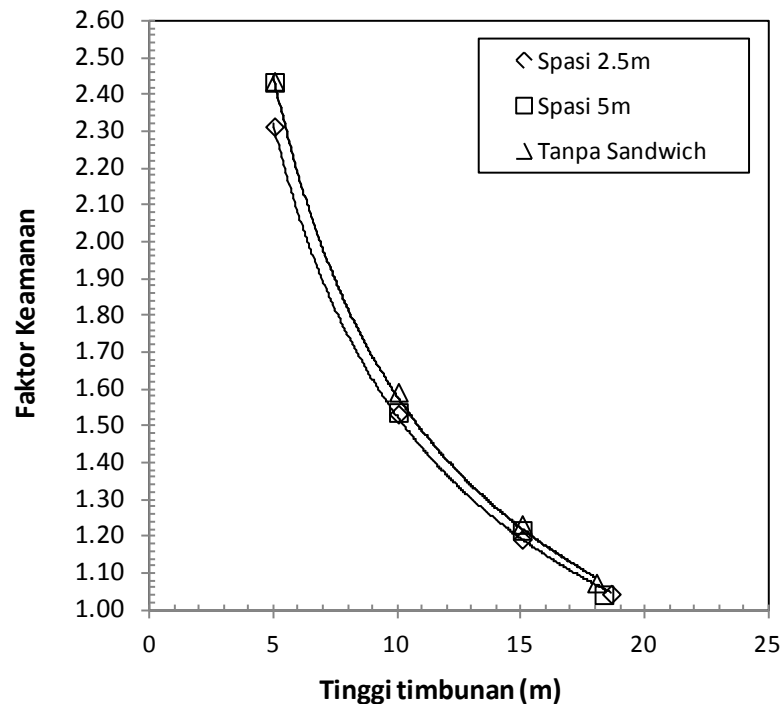
Dari hasil analisis prediksi stabilitas dan deformasi timbunan dengan *sandwich layer* yang dibandingkan dengan timbunan tanpa *sandwich layer* diberikan pada dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Untuk timbunan tinggi, perbedaan faktor keamanan akibat penerapan *sandwich layer* tidak terlalu signifikan karena peningkatan faktor keamanan kurang dari 1% (lihat Gambar 5-16). Namun demikian, diprediksi bahwa tinggi timbunan dapat bertambah maksimum 1,2 m apabila menggunakan *sandwich layer* dengan spasi 2,5 m.

- Seperti terlihat pada Gambar 5-17 dan Gambar 5-18, deformasi vertikal maksimum timbunan *sandwich* dengan spasi 2,5 m maupun 5 m masih memenuhi kriteria deformasi dari SCDOT (2008).
- Meskipun tidak mengalami pengurangan deformasi yang signifikan dibandingkan dengan timbunan biasa (hanya berkisar 10%), waktu yang dibutuhkan timbunan *sandwich* untuk mencapai konsolidasi primer sebesar 90% (t_{90}) 37 kali lebih cepat dibandingkan dengan timbunan biasa. Penurunan t_{90} timbunan *sandwich* dicapai dalam 31 hari sedangkan timbunan biasa 1156 hari (lihat Gambar 5-19)
- Percepatan waktu t_{90} pada timbunan *sandwich* disebabkan panjang pengaliran (*drainage path*) yang lebih pendek dibandingkan dengan timbunan tanpa *sandwich layer*, terlihat dari profil tekanan air pori eksess pada as timbunan timbunan pada Gambar 5-20.

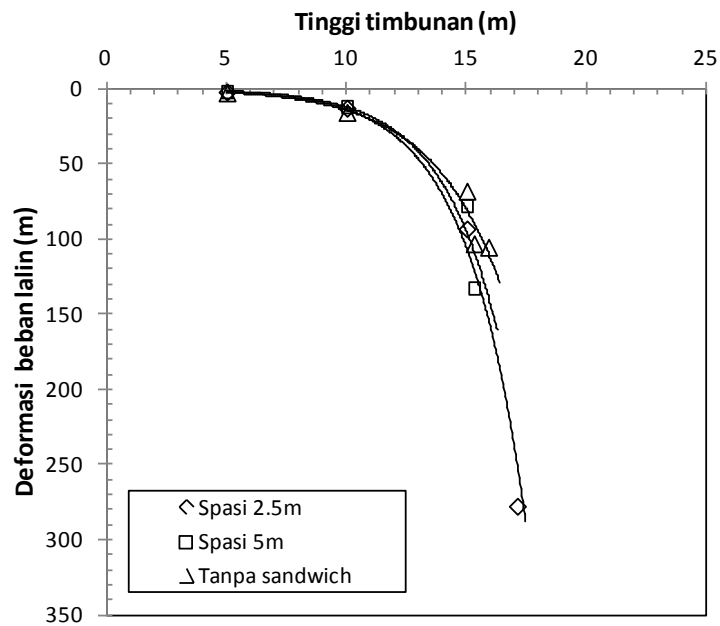


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

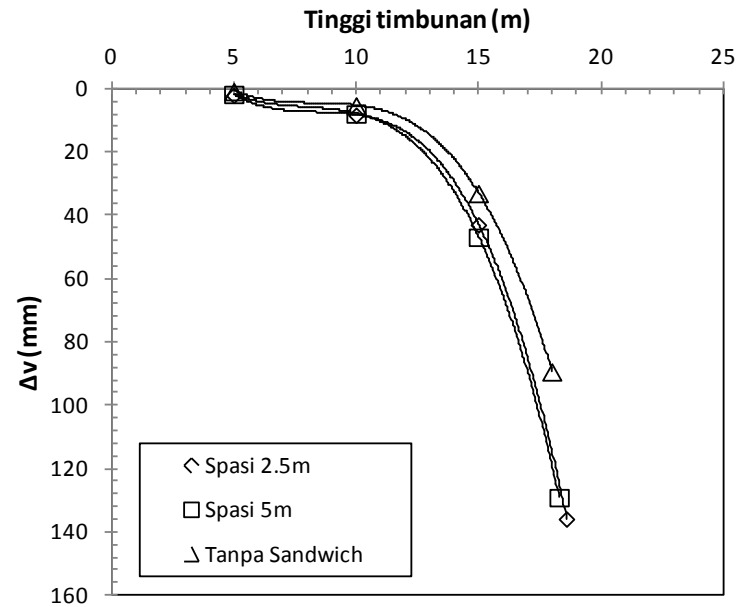


(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-16 Stabilitas timbunan Kondisi 3 , timbunan dengan *sandwich layer* dibandingkan dengan tanpa *sandwich layer*

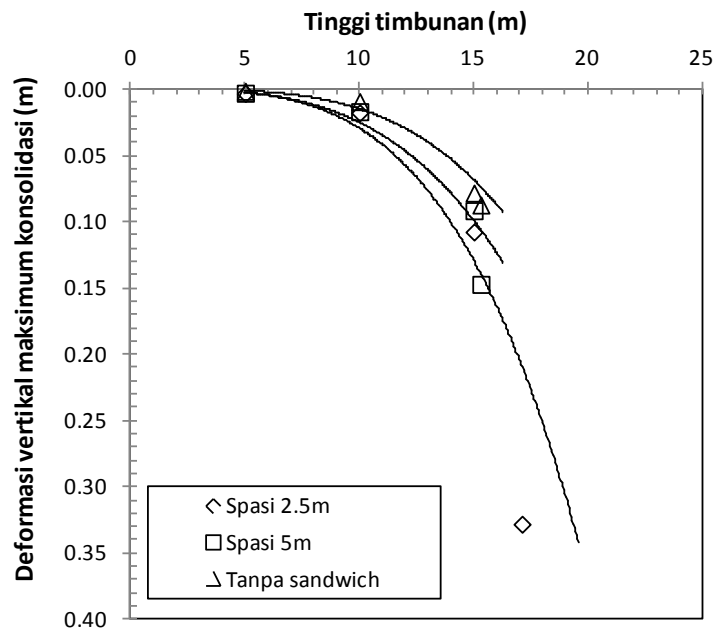


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

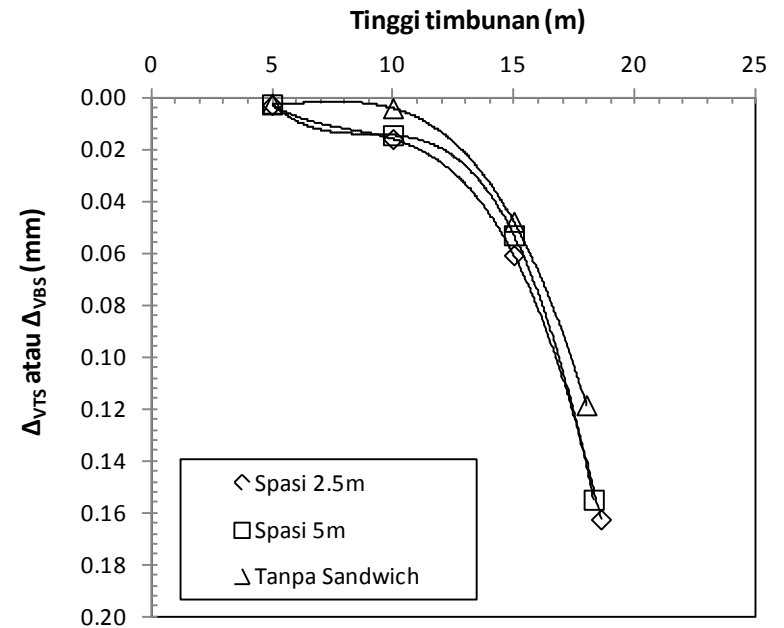


(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-17 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat beban lalu lintas, Kondisi 3 timbunan dengan *sandwich layer* dibandingkan dengan tanpa *sandwich layer*

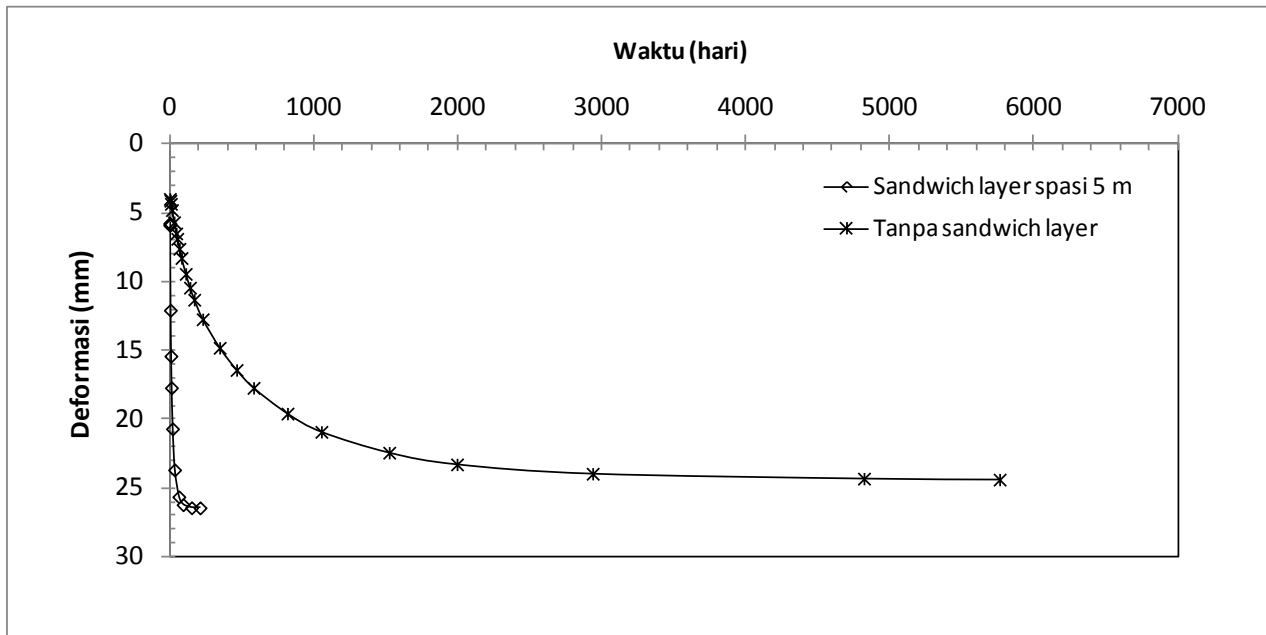


(a) Kemiringan timbunan 1V:1H

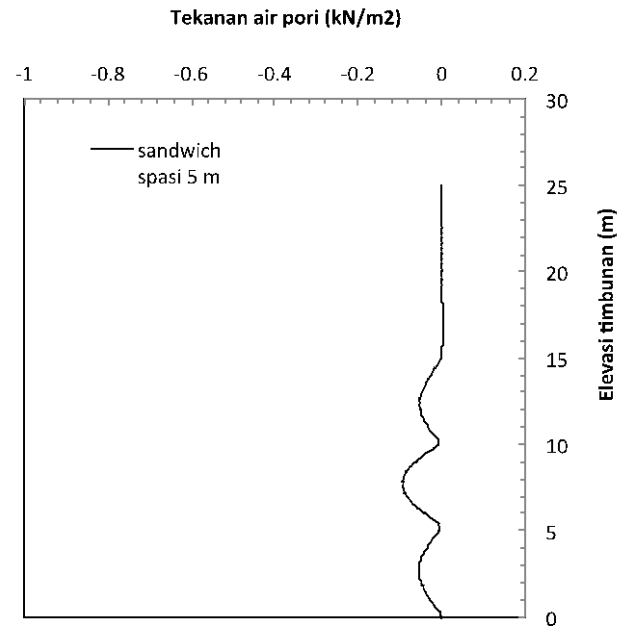
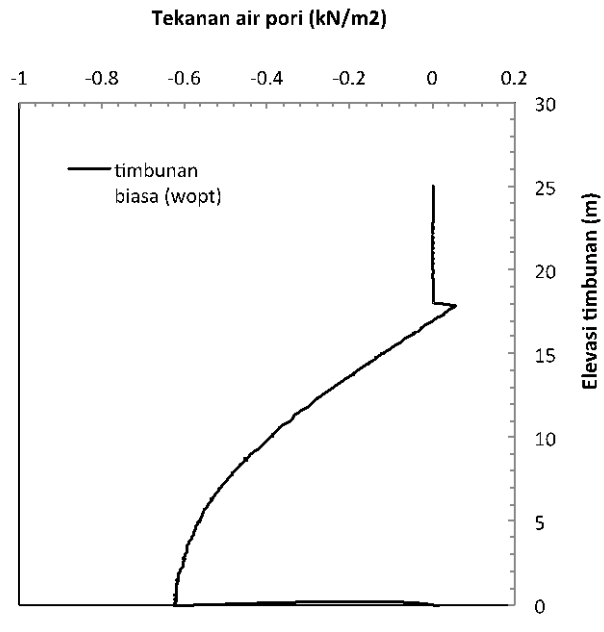


(b) Kemiringan timbunan 1V:1,5H

Gambar 5-18 Prediksi deformasi vertikal maksimum akibat ketidakstabilan lereng timbunan, Kondisi 3 timbunan dengan *sandwich layer* dibandingkan dengan tanpa *sandwich layer*



Gambar 5-19 Perbandingan grafik penurunan timbunan terhadap waktu



(a) Timbunan tanpa *sandwich layer* (Kondisi 1)

(b) Timbunan dengan *sandwich layer* (Kondisi 3)

Gambar 5-20 Profil tekanan air pori pada as timbunan (keterangan: tekanan air pori negatif = eksesi)

6 Proteksi lereng

6.1 *Vetiver System (VS)*

Permukaan lereng timbunan jalan yang dibiarkan terbuka dari pengaruh luar, dalam hal ini adalah air hujan akan rawan terhadap erosi, terutama jika kemiringan lerengnya curam. Penanganan erosi permukaan lereng timbunan dengan menggunakan media tanaman dan memanfaatkan sumber daya manusia serta sumber alam yang dimiliki, telah diatur tata caranya di dalam Pd.T-04-2002-B (Depkimpraswil, 2002).

Jenis tanaman yang digunakan pada penanggulangan erosi permukaan diklasifikasikan berdasarkan kemiringan lereng serta pola tanamnya, sebagaimana diperlihatkan di dalam Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Jenis tanaman berdasarkan kemiringan lereng (Pd.T-04-2002-B, Depkimpraswil, 2002)

No.	Kemiringan lereng	Pola tanam	Keterangan
1.	<50% (<30°)	- Tanaman Penutup Tanah (TPT), atau - Rumput	-
2.	50% - 100% (30° - 45°)	- TPT Tinggi atau TPT Sedang dengan rumput sebagai tanaman sela - TPT rendah dengan rumput yang ditanam secara bersealang-seling	Jangan menggunakan bibit dari biji
4.	100% - 170% (45° - 60°)	- TPT Sedang dan rumput - Rumput lempengan berjarak atau menyeluruh	

Tanaman penutup tanah rendah adalah tanaman yang berfungsi melindungi permukaan tanah dari pengaruh erosi akibat curah hujan dan pertumbuhannya dekat dengan permukaan tanah. Tanaman penutup tanah sedang adalah tanaman tahunan berkayu dengan tinggi tanaman maksimum 10 meter, sedangkan tanaman penutup tanah tinggi adalah tanaman tahunan

berkayu dan berbatang tinggi. Tanaman tersebut memiliki batang dan ranting jauh di atas permukaan tanah, hingga melebihi 10 meter.

Perkembangan metode vegetatif dalam menangani erosi lereng salah satunya telah dituangkan di dalam pedoman *Vetiver System (VS)* (Pusjatan, 2009). Spesifikasi khusus yang mengatur mengenai pengembalian kondisi galian, timbunan, dan penghijauan dengan rumput *Vetiver System* juga telah tersedia (DBM, 2008).

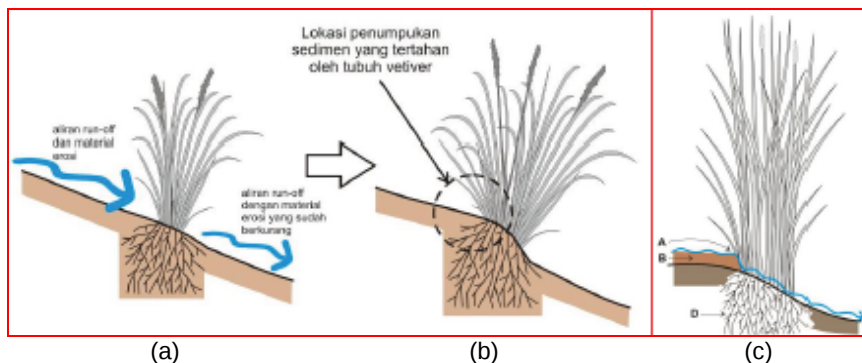
Vetiver System adalah sebuah teknologi sederhana, berbiaya murah yang memanfaatkan rumput vetiver hidup untuk konservasi tanah dan air serta perlindungan lingkungan. Keistimewaan vetiver sebagai tanaman ekologis disebabkan oleh sistem perakarannya yang unik. Tanaman ini memiliki akar serabut yang masuk jauh ke dalam tanah. Akar vetiver diketahui mampu menembus lapisan setebal 15 cm yang sangat keras. Di samping itu, vetiver juga memiliki daya adaptasi pertumbuhan yang sangat luas. Gambar 6-1 memperlihatkan gambar perakaran rumput vetiver.



Gambar 6-1 Rumput vetiver (Paul Trong, 2008 di dalam Pusjatan, 2009)

Dalam upaya menahan laju air yang limpas (*run-off*) dan material erosi lereng yang terbawa dengan tubuhnya, daun dan batang vetiver memperlambat aliran endapan yang limpas di titik A sehingga tertumpuk di

titik B. (Gambar 6-2c). Air akan terus mengalir menuruni lereng C yang lebih rendah. Akar tanaman (D) mengikat tanah di bawah tanaman hingga kedalaman 3 meter. Dengan membentuk “tiang” yang rapat dan dalam di dalam tanah, akar-akar ini mencegah terjadinya erosi dan longsor. Vetiver akan efektif jika ditanam dalam barisan membentuk pagar. Proses tersebut secara detail diperlihatkan di dalam Gambar 6-2a dan Gambar 6-2b.



Gambar 6-2 Penahan limpas (*run-off*) dan pengendapan tanah oleh Vetiver (R. Wijayakusuma, 2007 di dalam Pusjatan, 2009)

Adapun ketentuan lereng yang dapat ditanamani oleh rumput vetiver, adalah sebagai berikut:

- Lereng sudah memenuhi kestabilan struktur yang disyaratkan di dalam perencanaan lereng timbunan atau lereng galian;
- Lereng yang ditangani masih berada dalam rumija (ruang milik jalan) dan di luar rumaja (ruang manfaat jalan);
- Kemiringan lereng maksimum adalah 60° ;
- Lereng dengan kemikringan $< 30^\circ$, di antara dua strip rumput vetiver, selain dapat ditanamai dengan rumput bahia (*paspalum notatum*) dan rumput pahit (*axonopus compressus*), dapat pula ditanami dengan tanaman kacang-kacangan (*legum*).

Spesifikasi khusus rumput Vetiver (DBM, 2008) mensyaratkan restorasi lereng galian atau timbunan yang tidak stabil, baik melalui peningkatan

drainasenya saja atau meliputi penggantian material yang tidak stabil, penghamparan material timbunan pilihan untuk membentuk lereng timbunan yang stabil. Jika penggalian dan pengantian material yang tidak stabil yang digunakan, maka seluruh bahan yang tidak stabil tersebut harus dibuang, permukaan lereng timbunan yang terekspos dan masih utuh harus dibuat bertangga.

Kaki timbunan harus dibuat stabil dan memiliki drainase yang baik. Penimbunan kembali lereng dimulai dari kaki lereng dan dikerjakan serta dipadatkan sesuai dengan ketentuan pemadatan timbunan di dalam Spesifikasi Umum (DPU, 2010). Lereng timbunan yang selesai dipadatkan dapat dilindungi dengan tanaman, atau apabila erosi yang cukup besar diperkirakan akan terjadi, maka pemasangan proteksi lereng seperti *Vetiver System* dapat dipertimbangkan.

Penelitian terakhir mengenai rumput vetiver diperlihatkan pada Tabel 6-2.

Tabel 6-2 Perkembangan aplikasi VS sebagai proteksi lereng

No.	Negara	Hasil penelitian	Aplikasi	Dokumentasi aplikasi
1.	Australia	Efektifitasnya dibandingkan dengan rumput vetiver asli Australia untuk stabilisasi. VS efektif selama musim hujan panjang, sedangkan yang lain tidak.	Stabilisasi dasar saluran, <i>road batters</i> , tepi sungai.	
2.	Indonesia	VS efektif dan direkomendasikan untuk mengontrol erosi permukaan dan longsoran dangkal di lereng VS efektif digunakan pada kemiringan lereng 30°- 60° VS tidak direkomendasikan untuk lereng > 60°, kecuali dikombinasikan dengan teknologi lain	Proteksi lereng jalan dan jalan tol serta proteksi sungai	
3.	Thailand	VS untuk lereng tinggi diaplikasikan bersama dengan drainase permukaan VS sebagai proteksi <i>stream bank</i> efektif jika ditanam di atas dinding gabion. VS efektif ditanam pada lereng dengan kemiringan 30°- 60° atau 60 – 180% VS tidak efektif ditanam pada kemiringan lereng > 70°, 0,35 : 1 dan < 45°, 1:1 VS tidak efektif pertumbuhannya pada lokasi yang tidak terkena sinar matahari secara penuh (<i>shaded areas</i>) Periode ideal penanaman adalah di awal musim hujan dan harus selesai	Proteksi <i>back slope</i> jalan raya Proteksi <i>side slope</i> jalan raya Proteksi <i>stream bank</i> di sepanjang jalan Proteksi saluran tepi jalan	

No.	Negara	Hasil penelitian	Aplikasi	Dokumentasi aplikasi
		sekurang-kurangnya 2 bulan sebelum musim hujan berakhir.		
4.	India	VS efektif digunakan pada lereng yang curam setinggi 150m, kemiringan lereng 40°- 65° VS digunakan bersama dengan teknologi proteksi yang lain	Kontrol erosi dasar sungai, proteksi lereng timbunan, proteksi abutmen jembatan, proteksi lereng galian.	
5.	Malaysia	VS berhasil diterapkan pada lereng-lereng galian setinggi 150 m dengan curah hujan tahunan > 3000 mm	Proteksi lereng badan jalan tol	
6.	Filipina	VS pada beberapa kasus berhasil, namun ada pula yang gagal akibat pelaksanaannya yang kurang baik	Proteksi lereng badan jalan dan kontrol sedimen	

6.2 Prinsip stabilisasi lereng dengan Vetiver System

Prinsip-prinsip penting untuk keberhasilan aplikasi teknologi Vetiver pada stabilisasi lereng, adalah:

- Perencanaan dan teknik yang sesuai
- Penerapan yang tepat
- Program pemeliharaan yang menyeluruh

6.2.1 Perencanaan dan teknik yang sesuai

Aplikasi VS di dalam stabilisasi lereng perlu mempertimbangkan aspek biologi, tanah, hidraulika dan hidrologi. Lereng harus direncanakan dan dibangun dulu dengan mengikuti standar yang telah ditetapkan, sehingga secara struktur telah stabil.

Pada umumnya VS akan melindungi lereng dari longsor dangkal (*shallow slips*) dengan cara memperkuat tanah secara struktur dan hidraulik hingga kedalaman akarnya. Penerapan VS di atas lereng galian yang kemiringannya terjal telah terbukti efektif (Gambar 6-3).



(a) Sebelum penanaman



(b) Setelah penanaman

Gambar 6-3 Aplikasi VS pada lereng galian terjal

Pada Gambar 6-3 kemiringan lereng adalah 1V:1,5H dengan tinggi vertikal 55 m, tanpa trap dan drainase bawah permukaan. Akan tetapi vetiver tetap tumbuh dan melindungi lereng dari erosi.

Kegagalan VS pada sebagian besar kasus diakibatkan oleh perencanaan dan aplikasi yang tidak tepat, dan bukan akibat teknologi vetiver tersebut.

6.2.2 Penerapan yang tepat

Prinsip-prinsip berikut perlu dipertimbangkan agar penerapan VS di lapangan tepat:

- Waktu, untuk memanfaatkan semaksimal mungkin musim hujan dan menghindari atau mengurangi dampak perubahan iklim yang ekstrim.
- Kualitas dan ketersediaan material yang ditanam
- Pengawasan terhadap hama dan fertilisasi yang memenuhi
- Pelatihan SDM

6.2.3 Pemeliharaan menyeluruh

Pemeliharaan VS dapat dikurangi pada saat tanaman tersebut telah cukup umurnya.

6.3 Kelebihan dan kekurangan dari Vetiver System

Kelebihan VS:

- ✓ Kelebihan terbesar teknologi VS dibandingkan dengan teknologi konvensional adalah biayanya yang lebih murah. Untuk stabilisasi lereng terjal, penghematannya mencapai 85% di Cina, 65-75% di Queensland Australia, sedangkan di negara dengan pendatan buruh rendah, angka penghematan ini akan lebih tinggi.
- ✓ Dibandingkan dengan teknologi bioteknologi lainnya, VS adalah metode proteksi erosi yang lebih ramah lingkungan dan lebih bagus dari segi estetika tampilan luarnya, dibandingkan proteksi dengan beton atau batu.

- ✓ Biaya pemeliharaan jangka panjang VS rendah, bertolak belakang dengan teknologi-teknologi konvensional, dimana biaya bioteknologi meningkat seiring dengan waktu dan menuanya tanaman penutup. VST membutuhkan biaya pemeliharaan ekstra di tahun-tahun awal, namun setelahnya tidak memerlukan lagi.

Kekurangan VS:

- ✓ Kekurangan aplikasi VS yang terutama adalah jeda waktu antara penerapan hingga bisa efektif sepenuhnya.
- ✓ Rumput vetiver tidak dapat mentoleransi daerah teduh, terutama di fase penanaman. Daerah yang teduh (tidak cukup sinar matahari) akan mengurangi tingkat pertumbuhan tanaman tersebut.

6.4 Aplikasi Vetiver System dengan material lain

Untuk mempercepat pertumbuhan rumput vetiver pada kondisi yang buruk, material lain seperti geotekstil, kantung pasir (*sand bags*) dan *eco-mortar* dapat digunakan bersamaan dengan penanaman rumput vetiver.

Dari keseluruhan pembahasan dapat disimpulkan bahwa VS sangat efektif dan merupakan bioteknologi berbiaya rendah untuk stabilisasi maupun rehabilitasi area-area yang rusak akibat pembangunan struktur. Meskipun demikian, perlu ditekankan bahwa agar dapat bekerja efektif, kualitas material yang ditanam, teknik penanaman yang tepat serta perencanaan yang benar perlu diperhatikan.

7 Penutup

7.1 Sifat-sifat tanah merah

Dari hasil pengujian laboratorium, beberapa sifat tanah merah untuk timbunan tinggi dapat dirangkum sebagai berikut:

- Kuat geser tanah merah dapat diindikasikan oleh jarak batas-batas atterberg terhadap Garis A dalam kurva plastisitas. Hal ini dapat membantu ketika melakukan evaluasi hasil pengujian triaksial tanah merah. Walaupun demikian, pengujian batas-batas Atterberg harus dilakukan dengan benar dan oleh teknisi berpengalaman.
- Dari hasil analisis numerik, disimpulkan pula bahwa timbunan dengan kadar air pemadatan optimum memberikan faktor keamanan tertinggi dan deformasi timbunan yang paling kecil.
- Nilai CBR standar (kondisi terendam) untuk rentang Wopt-3% s.d Wopt+1% adalah 7.3% - 8.5% yang artinya memenuhi persyaratan di dalam spesifikasi umum yaitu $> 6\%$.
- Nilai Air Voids material timbunan untuk rentang Wopt-3% s.d Wopt+1% adalah $< 10\%$ yang sesuai dengan kriteria yang disyaratkan sebagai bahan timbunan kohesif. Hal ini berarti tanah merah mempunyai potensi kolaps yang kecil.

7.2 Prediksi kinerja timbunan

Dari hasil kajian pustaka dan hasil pemodelan numerik, diusulkan definisi timbunan tinggi adalah timbunan yang lebih dari 15 m. Dari hasil analisis prediksi, timbunan tanah merah masih memenuhi kriteria stabilitas dan deformasi hingga ketinggian maksimum 15 m jika dipadatkan dengan cara pemadatan ringan dan tidak ada masalah dengan tanah dasar. Dari hasil kajian pustaka, batasan tinggi timbunan 15 m tersebut juga tercantum dalam

lima buah pedoman dan spesifikasi asing (seperti dibahas pada bab 2.5). Hal ini memberikan indikasi pada para perencana untuk mempertimbangkan metode pemadatan dengan energi yang lebih besar, penggunaan timbunan batu atau penggunaan teknologi lain ketika mendesain timbunan yang lebih tinggi dari 15 m.

Akan tetapi, definisi timbunan tinggi tersebut tidak berarti bahwa perencana tidak perlu melakukan analisis stabilitas untuk timbunan di bawah 15 m. Batasan tinggi timbunan yang tidak memerlukan perencanaan khusus adalah maksimum 3 m sesuai dengan rangkuman dari beberapa literatur. Jika tanah dasar merupakan tanah problematik (misalnya tanah lunak, serpih atau tanah ekspansif) maka tetap diperlukan perencanaan khusus walaupun tinggi timbunan kurang dari 3m. Sebagai catatan, batasan masalah dalam ini adalah untuk material timbunan tanah merah dan kondisi tanah dasar yang stabil (daya dukung cukup).

Dalam buku ini juga diuraikan hasil simulasi numerik dari konstruksi timbunan yang tidak dipadatkan sesuai dengan spesifikasi teknis untuk mendapatkan gambaran dampak yang akan terjadi terhadap kinerja timbunan. Dari analisis prediksi, kinerja timbunan dari segi stabilitas dan deformasi berkurang secara signifikan jika kepadatan timbunan tidak sesuai dengan spesifikasi.

Usaha pemadatan sesuai spesifikasi (pemadatan per 30 cm) terbukti efektif terhadap stabilitas dan deformasi timbunan, karena dapat meningkatkan faktor keamanan sebesar 33%. Selain itu, trap atau penanggaan juga memberikan kontribusi yang signifikan pada stabilitas timbunan.

7.3 Saran untuk perencanaan timbunan tinggi

- Untuk kasus timbunan tinggi (lebih dari 15 m), maka aspek yang harus mempertimbangkan:

- o Jika menggunakan material timbunan biasa, maka diperlukan adanya percobaan pemadatan modifikasi, kuat geser yang kemudian dituangkan ke dalam spesifikasi khusus.
 - o Jika lebih dari 15m, dapat dipertimbangkan timbunan batu, metode pemadatan berat, atau teknologi lainnya.
 - o Air Voids Content dipertimbangkan sebagai salah satu parameter pemadatan.
 - o Potensi kolaps dipertimbangkan sebagai salah satu parameter pemadatan
 - o Perencanaan drainase harus seksama, dengan mempertimbangkan potensi terjadinya kolaps.
 - o Penyelidikan tanah dasar yang komprehensif.
- Pengujian laboratorium untuk kuat geser dan deformasi timbunan tinggi yang direkomendasikan adalah Triaxial CU dan CD, konsolidasi, konsolidasi potensi kolaps (ASTM D 5333), hisapan matrik dengan uji kertas saring (ASTM D 5298), permeabilitas.
 - Parameter yang direkomendasikan untuk analisis stabilitas dan penurunan timbunan tinggi adalah parameter kuat geser, kekakuan, air void content, kompresibilitas dan potensi kolaps yang disesuaikan dengan tekanan overburdennya.
 - Salah satu alternatif konstruksi timbunan kohesif adalah dengan memberikan lapis-lapis pasir dalam timbunan atau dapat disebut metode *sandwich*. Dari simulasi numerik, fungsi utama metode ini mempercepat terjadinya proses disipasi tekanan air pori eksese dalam timbunan (misalnya akibat beban konstruksi) sehingga penurunan timbunan akan lebih cepat. Sebagai ilustrasi, pemodelan numerik memberikan prediksi waktu yang dibutuhkan timbunan *sandwich* untuk mencapai konsolidasi primer sebesar 90% (t_{90}) 37 kali lebih cepat dibandingkan dengan timbunan biasa.

- Proteksi lereng timbunan dengan vetiver system perlu mempertimbangkan dengan seksama kemiringan lereng, dimana vetiver system efektif ditanam pada lereng dengan kemiringan 30° - 60° atau 60 – 180%. Vetiver system juga efektif bila penanamannya dikombinasikan dengan teknologi proteksi lereng lain.

7.4 Saran untuk penelitian lanjutan

- Stabilitas dan deformasi timbunan dalam kajian ini diprediksi dengan metode elemen hingga. Disarankan untuk memverifikasi model numerik ini dengan melakukan pemantauan jangka panjang pada suatu konstruksi timbunan tinggi.
- Menurut Wesley (2010) tanah merah yang berada di bawah garis A pada grafik plastisitas, serta berada jauh di sebelah kiri garis A di dalam grafik hubungan kuat geser dengan jarak pada grafik plastisitas Wesley memiliki sifat teknis yang paling baik sebagai bahan timbunan. Untuk itu disarankan untuk melakukan pengujian tanah lengkap serta analisis dan deformasi dengan menggunakan parameter tanah merah tersebut.
- Penggunaan kriteria deformasi sebaiknya diakomodir dalam pedoman Indonesia. Sebagai salah satu sumber, kriteria deformasi SCDOT (2008) dapat digunakan.
- Definisi timbunan tinggi 15 m agar disesuaikan dengan penelitian tanah dasar yang dapat mendukung tinggi timbunan 15 m.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim Penulis mengucapkan terima kasih kepada Erza Rismantojo, Ph.D. dan Ir. Kabul Suwitaatmadja yang telah memberikan masukan yang berharga untuk penelitian ini.

Penghargaan setinggi-tingginya juga diberikan kepada Ir. Alan Rachlan, M.Sc. (Alm.) atas ilmu dan pembelajaran yang berharga mengenai timbunan tanah merah.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2007, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Customary U.S. Units." 4th Edition.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 5th Edition, 2010.
- ASTM D 5333 – 92. *Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils*. American Standard Testing Material. 1992.
- Barden, dkk. *The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil*. Engineering Geology, 7, 49-60. 1973.
- Bhattacharyya, S. *Application Of Vetiver System for Riverbank Erosion Control*. International Seminar On The Green Road Construction and International Workshop On The Vetiver Systems, Bandung 4-5 Oktober 2011.
- Dalvi, Ashok D.; Bacon, W. Gordon; Osborne, Robert C. 2004. *The Past and the Future of Nickel Laterites (Report)*. PDAC 2004 International Convention, Trade Show & Investors Exchange.
- DBM. Spesifikasi Khusus Interim Divisi 8 dari Spesifikasi Umum Desember 2006 Pengembalian Kondisi dan Pekerjaan Minor. Seksi Skh 8.9 Pengembalian Kondisi Galian, Timbunan, dan Penghijauan dengan Rumput Vetiver System (VS). Direktorat Jenderal Bina Marga. Desember. 2008.
- Depkimpraswil. Pd.T-04-2002-B. Petunjuk Teknis Tata Cara Penanggulangan Erosi Permukaan Lereng Jalan dengan Tanaman. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2002.
- Dit.BM. Standar Perencanaan Geometrik untuk Jalan Perkotaan. Direktorat Jenderal Bina Marga, Direktorat Pembinaan Jalan Kota. Maret 1992.
- Djajaputra, A., dkk. Laporan Akhir Review Geoteknik Terhadap Pekerjaan Galian dan Timbunan Proyek Pembangunan Jalan Tol Cipularang Tahap II. Team Geoteknik LPPM ITB.
- DPU¹. Pt.T-08-2002-B. Panduan Geoteknik 1: Proses Pembentukan dan Sifat-Sifat Dasar Tanah Lunak. Departemen Pekerjaan Umum. 2002.

- DPU². Pt.T-09-2002-B. Panduan Geoteknik 2: Penyelidikan Tanah Lunak. Desain dan Pekerjaan Lapangan. Departemen Pekerjaan Umum. 2002.
- DPU³. Pt.M-01-2002-B. Panduan Geoteknik 3: Pengujian Tanah Lunak. Pengujian Laboratorium. Departemen Pekerjaan Umum. 2002.
- DPU⁴. Pt.T-10-2002-B. Panduan Geoteknik 4: Desain dan Konstruksi. Departemen Pekerjaan Umum. 2002.
- DPU¹. Pd/T/10/2005/B. Pedoman penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan. Departemen Pekerjaan Umum. 2005.
- DPU². Pd T-09-2005-B. Rekayasa penanganan keruntuhan lereng jalan pada tanah residual dan batuan. Departemen Pekerjaan Umum. 2005.
- DPU¹. ISBN: 979-95959-1-6. Panduan Geoteknik Jalan. Edisi II. Japan International Cooperation Agency dan Departemen Pekerjaan Umum. 2006.
- DPU². Pedoman No: 003 - 02 / BM / 2006 Pekerjaan Tanah Dasar Buku 2 Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar untuk Pekerjaan Jalan. Departemen Pekerjaan Umum. 2006.
- DPU. Spesifikasi Umum Bina Marga. Divisi 3. Direktorat Jenderal Bina Marga. Departemen Pekerjaan Umum. 2010.
- Hill, I. G.; Worden, R. H.; Meighan, I. G. 2000. "Geochemical evolution of a palaeolaterite: the Interbasaltic Formation, Northern Ireland". Chemical Geology 166 (1-2): 65. doi:10.1016/S0009-2541(99)00179-5.
- Huang, B., dkk. *Numerical Study of Reinforced Soil Segmental Walls Using Three Different Constitutive Soil Models*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Oktober 2009.
- Lawton, E.C, dkk. *Collapse of Compacted Clayey Sand*. Journal of Geotechnical Engineering, 115 (9), 1252-1267. 1989.
- Lim, Miller. *Wetting-Induced Compression of Compacted Oklahoma Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(10), 1014-1023. 2004.
- Plaxis b.v. *Plaxis 2D Version 9.0. Netherlands. Manual. ISBN-13 : 978-90-76016-06-1*. 2008.

- PP 34. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 34 Tahun 2006 Tentang Jalan.
- Pusjatan. Pedoman Penanaman Rumput Vetiver untuk Pengendalian Erosi Permukaan dan Pencegahan Longsor dan Galian pada Lereng Jalan. Puslitbang Jalan dan Jembatan. 2009.
- Rachlan, Alan. Bahan Paparan Design Galian dan Timbunan. Tidak bertahun.
- Rorie, Dennis E. *Investigation of Soil Suction in a Compacted Low-Plasticity Clay. Thesis*. Civil Engineering Raleigh, NC. 2006.
- Sanguankaeo, S, dkk. *Sustainable Vetiver System in Erosion Control and Stabilization for Highways Slopes in Thailand*. International Seminar On The Green Road Construction and International Workshop On The Vetiver Systems, Bandung 4-5 Oktober 2011.
- SCDOT. *Chapter 10 Geotechnical Performance Limit*. Final SCDOT Geotechnical Design Manual. Agustus 2008.
- Surarak, C. *Geotechnical Aspect of the Bangkok MRT Blue Line Project*. Griffith School of Engineering Science, Environment, Engineering and Technology Griffith University. Doctor of Philosophy. September 2010.
- Suwitaatmadja, Kabul. Timbunan di lereng. Tidak bertahun.
- Truong, Paul. *Global Review on the Application of Vetiver System for Infrastructure Protection*. TVNI Board Director and Coordinator for Asia and Oceania. Brisbane Australia. International Seminar On The Green Road Construction and International Workshop On The Vetiver Systems, Bandung 4-5 Oktober 2011.
- Wesley D,L. Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan dan Residu. 2012.
- Wesley D.L., *Geotechnical in Residual Soils*. 2010.
- Whittington, B. I. & Muir, D. 2000. *Pressure Acid Leaching of Nickel Laterites: A Review*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, Volume 21, Issue 6. DOI: 10.1080/08827500008914177.

