

PEDOMAN

No: 003 - 02 / BM / 2006

Konstruksi dan Bangunan

Pekerjaan Tanah Dasar

Buku 2

**Pedoman pekerjaan tanah dasar
untuk pekerjaan jalan**



**DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA**

Prakata

Salah satu aspek penting untuk menunjang keberhasilan pembinaan jalan adalah tersedianya Norma, Standar, Pedoman dan Manual (NSPM) yang dapat diterapkan dengan mudah didalam penerapannya.

Untuk mengatasi permasalahan di atas, Direktorat Bina Teknik, Direktorat Jenderal Bina Marga, Departemen Pekerjaan Umum, menyusun Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar.

Pedoman disusun dengan memperhatikan beberapa spesifikasi dan penyusunan pedoman ini mengacu pula pada standar yang berlaku, terutama Standar Nasional Indonesia (SNI). Sumber lain yang digunakan dalam penyusunan pedoman ini adalah tulisan-tulisan dan buku-buku yang diterbitkan oleh Bina Marga, Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, *Asphalt Institute*, *Transport and Road Research Laboratory*, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, *Japan Road Association* serta penerbit-penerbit lain.

Tata cara penulisan pedoman ini disusun mengikuti Pedoman BSN (Badan Standardisasi Nasional) No. 8 tahun 2000.

Apabila dalam penerapannya dijumpai kekurangan atau kekeliruan pada pedoman ini, akan dilakukan perbaikan dan penyempurnaan di kemudian hari.

Jakarta, Desember 2006

Direktur Jenderal Bina Marga



Hendrianto N.

Daftar isi

Prakata	i
Daftar isi	ii
Daftar tabel	vi
Daftar gambar	vii
Pendahuluan	ix
1 Ruang lingkup	1-149
2 Acuan normatif	1-149
3 Istilah dan definisi	3-149
4 Simbol	11-149
5 Pekerjaan galian	13-149
5.1 Umum	13-149
5.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng dan faktor keamanan ..	13-149
5.3 Disain lereng	14-149
5.3.1 Longsor translasi	16-149
5.3.2 Longsor rotasi	17-149
5.3.2.1 Jenis	17-149
5.3.2.2 Analisis stabilitas lereng dengan Metoda Swedia	18-149
5.3.2.3 Retak tarik	21-149
5.3.2.4 Analisis lereng dengan kemiringan seragam	22-149
5.4 Disain potongan melintang jalan pada galian dan timbunan	25-149
5.5 Disain lereng pada galian batuan	26-149
5.5.1 Umum	26-149
5.5.2 Teori disain	26-149
5.5.3 Bahan dan pengujian batuan	28-149
5.5.4 Penyelidikan lapangan	28-149
5.5.5 Analisis disain	28-149
5.6 Penanggulangan longsor pada tanah lempung	35-149
5.7 Penggalan (<i>excavation</i>)	35-149
5.7.1 Klasifikasi penggalan	35-149
5.7.2 Pembersihan lapangan (<i>clearing and grubbing</i>)	36-149
5.7.2.1 Umum	36-149
5.7.2.2 Pembersihan lapangan di luar kota	36-149
5.7.2.3 Pembersihan lapangan di perkotaan	37-149
5.7.2.4 Peralatan	37-149
5.7.2.5 Contoh spesifikasi	38-149
5.7.3 Penggalan untuk jalan dan drainase	39-149
5.7.4 Penggalan untuk struktur	40-149
5.7.5 Penggalan di sumber bahan (<i>borrow excavation</i>)	41-149
6 Pekerjaan timbunan	42-149
6.1 Umum	42-149
6.2 Stabilitas timbunan	42-149
6.3 Penurunan timbunan	44-149
6.3.1 Umum	44-149
6.3.2 Pengaruh pemadatan terhadap penurunan	44-149
6.3.3 Pengaruh tinggi timbunan terhadap penurunan	44-149
6.3.4 Hubungan antara penurunan dengan waktu	45-149
6.4 Konsolidasi	45-149
6.4.1 Persoalan konsolidasi pada pembangunan jalan	45-149
6.4.2 Definisi	46-149

6.4.3	Analisis penurunan.....	46-149
6.4.3.1	Distribusi tegangan	46-149
6.4.3.2	Perkiraan penurunan total	47-149
6.4.3.3	Perkiraan kecepatan penurunan	48-149
6.4.4	Proses konsolidasi	49-149
6.4.5	Teori matematis konsolidasi	51-149
6.4.5.1	Keabsahan anggapan-anggapan dalam praktek	51-149
6.4.5.2	Persamaan teoritis untuk besarnya penurunan	51-149
6.4.6	Pengujian konsolidasi di laboratorium	53-149
6.4.6.1	Peralatan	53-149
6.4.6.2	Prosedur	54-149
6.4.7	Hubungan antara angka pori dengan tebal lapisan tanah	55-149
6.4.8	Hubungan antara tegangan dengan angka pori	56-149
6.4.9	Beberapa aspek praktis mengenai konsolidasi	56-149
6.4.10	Ilustrasi analisis penurunan timbunan	57-149
6.4.10.1	Perhitungan penurunan	57-149
6.4.10.2	Perhitungan kecepatan penurunan	58-149
6.5	Perbaikan tanah di bawah timbunan.....	59-149
6.5.1	Penurunan oleh beban timbunan (<i>gravity subsidence</i>).....	60-149
6.5.2	Penggantian penuh	60-149
6.5.3	Penggantian sebagian	60-149
6.5.4	Penyemprotan (<i>jetting</i>).....	61-149
6.5.5	Pemasangan kolom pasir (<i>vertical sand drain</i>)	62-149
6.6	Pemilihan bahan timbunan	62-149
6.7	Pengerjaan timbunan.....	63-149
6.8	Tegangan vertikal di bawah timbunan	64-149
7	Pemadatan	66-149
7.1	Tujuan pemadatan	66-149
7.2	Teori pemadatan	67-149
7.3	Faktor-faktor yang mempengaruhi berat isi kering.....	69-149
7.3.1	Kadar air.....	69-149
7.3.2	Daya pemadatan.....	70-149
7.4	Pengaruh berat isi kering terhadap sifat-sifat tanah	71-149
7.4.1	Pengaruh berat isi kering terhadap kekuatan	72-149
7.4.2	Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan penyusutan...73-149	
7.4.3	Pengaruh berat isi kering terhadap penurunan.....	73-149
7.4.4	Pengaruh berat isi kering terhadap permeabilitas.....	75-149
7.5	Dasar penentuan spesifikasi pemadatan	76-149
7.5.1	Spesifikasi kinerja (<i>performance specifications</i>)	76-149
7.5.2	Spesifikasi metoda (<i>method specifications</i>)	77-149
7.6	Teknik pemadatan	77-149
7.6.1	Penyelidikan pendahuluan	77-149
7.6.2	Percobaan pemadatan	77-149
7.6.3	Manfaat percobaan pemadatan	79-149
7.6.4	Kepadatan relatif dan efisiensi pemadatan	80-149
7.7	Pengendalian kepadatan dan pengujian berat isi di lapangan	82-149
7.7.1	Umum	82-149
7.7.2	Pengujian berat isi dengan metoda tabung pemotong.....	83-149
7.7.2.1	Peralatan	83-149
7.7.2.2	Prosedur pemeriksaan	83-149
7.7.2.3	Perhitungan	84-149
7.7.2.4	Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pemeriksaan	85-149
7.7.3	Pengujian berat isi dengan metoda corong pasir	85-149
7.7.3.1	Peralatan dan bahan	85-149

	7.7.3.2	Penentuan berat isi pasir	85-149
	7.7.3.3	Penentuan volume corong	86-149
	7.7.3.4	Prosedur pengujian	86-149
	7.7.3.5	Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pemeriksaan	86-149
	7.7.4	Pengujian berat isi dengan metoda balon	87-149
	7.7.4.1	Peralatan	87-149
	7.7.4.2	Pengecekan skala tabung	87-149
	7.7.4.3	Prosedur pemeriksaan	87-149
	7.7.5	Pengujian berat isi dengan metoda nuklir	87-149
	7.7.6	Keunggulan dan kelemahan masing-masing metoda pemeriksaan	89-149
	7.7.7	Jumlah titik pemeriksaan kepadatan dan variabilitas hasil pemeriksaan yang diijinkan	89-149
	7.7.8	Pemilihan berat isi kering dan kadar air untuk acuan pemadatan lapangan	90-149
7.8		Peralatan pemadatan di lapangan	93-149
	7.8.1	Mesin pemadat roda (<i>rollers</i>)	93-149
	7.8.1.1	Mesin pemadat roda besi halus (<i>smooth-wheeled rollers</i>)	93-149
	7.8.1.2	Mesin pemadat roda karet (<i>pneumatic-tyred rollers</i>)	93-149
	7.8.1.3	Mesin pemadat roda besi grid (<i>grid rollers</i>)	93-149
	7.8.1.4	Mesin pemadat roda berduri (<i>tamping rollers</i>)	93-149
	7.8.1.5	Peralatan pelaksanaan (<i>construction traffic</i>)	94-149
	7.8.2	Mesin pemadat getar (<i>vibrating compactors</i>)	94-149
	7.8.2.1	Mesin pemadat roda getar (<i>vibrating rollers</i>)	94-149
	7.8.2.2	Mesin pemadat pelat getar (<i>vibrating plate compactors</i>)	94-149
	7.8.2.3	Mesin pemadat getar (<i>vibrotampers</i>)	94-149
	7.8.3	Mesin pemadat tumbuk (<i>compaction by impact</i>)	95-149
	7.8.3.1	Mesin pemadat tumbuk bermesin (<i>power rammers</i>)	95-149
	7.8.3.2	Mesin pemadat dijatuhkan (<i>weight dropping rammers</i>)	95-149
	7.8.3.3	Mesin pemadat konsolidasi dinamis (<i>dynamic consolidation</i>)	95-149
	7.8.4	Kinerja peralatan pemadatan	97-149
7.9		Dasar pemilihan peralatan pemadatan lapangan	98-149
	7.9.1	Faktor bahan (<i>material factors</i>)	99-149
	7.9.2	Faktor ruang (<i>spatial factors</i>)	100-149
	7.9.3	Faktor peralatan (<i>plant factors</i>)	100-149
	7.9.4	Faktor kontraktual (<i>contractual factors</i>)	101-149
8		Keselamatan kerja dan pengendalian lingkungan pada pelaksanaan pekerjaan Tanah	101-149
	8.1	Keselamatan kerja	101-149
	8.1.1	Keselamatan pada saat pembangunan dan pemeliharaan jalan secara umum	101-149
	8.1.2	Bahaya pada saat pelaksanaan pekerjaan tanah	101-149
	8.1.3	Bahaya pada saat pengoperasian peralatan	102-149
	8.2	Pengendalian lingkungan	102-149
	8.2.1	Umum	102-149
	8.2.2	Koordinasi dengan instansi dan masyarakat	104-149
	8.2.3	Perlindungan terhadap masyarakat serta lahan dan tempat khusus	104-149
	8.2.4	Pemeliharaan kelancaran lalu-lintas dan lingkungan	104-149
	8.2.5	Mobilisasi dan demobilisasi peralatan	104-149

8.2.6	Pengangkutan bahan	104-149
8.2.7	Pembersihan lapangan (<i>Clearing and grubbing</i>)	105-149
8.2.8	Penggalian (<i>excavation</i>)	105-149
8.2.9	Pengendalian erosi	106-149
8.2.10	Penempatan tanah buangan	106-149
8.2.11	Pengembangan lingkungan dan estetika daerah samping	107-149
8.2.12	Pembersihan daerah kerja (<i>final clearing</i>)	107-149

Lampiran

Lampiran A Permasalahan pekerjaan tanah	108-149
---	---------

1.	Tanah dasar	108-149
1.1	Pemompaan pada perkerasan kaku	108-149
1.2	Tanah jelek	108-149
1.3	Tanah yang mempunyai pemuaian besar	108-149
1.4	Tanah laterit	109-149
1.5	Zona transisi	109-149
1.6	Kepadatan dan CBR	109-149
2	Drainase dan air kapiler	110-149
1.2.1	Drainase	110-149
1.2.2	Air kapiler	111-149
3	Stabilitas lereng	111-149
3.1	Kasus longsor	111-149
3.2	Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng	112-149
3.3	Metoda penanganan longsor	113-149
3.3.1	Metode relokasi	114-149
3.3.2	Metoda pembangunan jembatan	114-149
3.3.3	Metoda penggalian	115-149
3.3.4	Metoda drainase	118-149
3.3.5	Metoda konstruksi penahan	120-149
3.4	Pemuaian tanah	123-149
3.5	Evaluasi pemuaian	124-149
3.6	Faktor-faktor yang mempengaruhi penyusutan dan tegangan penyusutan	126-149
4	Pemasangan patok	129-149
4.1	Ketentuan	129-149
4.2	Patok sumbu jalan dan bahu	130-149
4.3	Patok potongan melintang dan lereng	131-149
4.4	Patok referensi (<i>reference stakes</i>)	133-149
4.5	Patok permukaan akhir (<i>finishing grade stakes</i>)	133-149
4.6	Potongan melintang akhir (<i>final cross-sections</i>)	133-149

Lampiran B Contoh perencanaan dan proyek pekerjaan tanah	134-149
--	---------

1.	Penentuan jumlah dan jenis alat pada pekerjaan penggalian dan pengangkutan	134-149
2.	Contoh proyek pekerjaan tanah	135-149
3.	Pengkajian peralatan pemadatan	135-149
4.	Contoh proyek pemadatan	137-149
5.	Perhitungan volume galian dan timbunan	139-149
5.1	Potongan melintang dan mal-seksi (<i>cross-sections and templates</i>)	139-149
5.1.1	Cara menghitung volume galian dan timbunan	140-149
5.2	Penyusutan (<i>shrinkage</i>)	141-149
5.3	Diagram masa (<i>mass diagram</i>)	141-149
5.3.1	Penentuan titik berat masa galian dan timbunan	144-149
5.3.1.1	Metoda grafis	144-149
5.3.1.2	Metoda momen	144-149
5.3.1.3	Metoda planimeter	145-149
5.3.2	Bahan tambahan (<i>borrow material</i>)	145-149

Daftar tabel

Tabel 1.	Kemiringan lereng galian yang disarankan (Sumber: Horner, 1988).....	14-149
Tabel 2.	Tabel penentuan faktor keamanan pada metoda irisan	20-149
Tabel 3.	Kemiringan rata-rata lereng pada galian batuan (Sumber: Baker, 1960) ..	29-149
Tabel 4.	Variabel disain lereng dengan bahu banyak (Sumber: Baker, 1960)	32-149
Tabel 5.	Peralatan yang biasa digunakan pada penggalian di sumber bahan (Sumber: Horner, 1988)	41-149
Tabel 6.	Kemiringan tipikal lereng timbunan* (Sumber: Horner, 1988)	43-149
Tabel 7.	Distribusi penurunan di bawah timbunan	58-149
Tabel 8.	Kadar air optimum dan berat isi kering maksimum beberapa jenis tanah (Sumber: Horner, 1988).....	69-149
Tabel 9.	Contoh spesifikasi metoda (<i>Departement of Transport, UK</i> dalam Horner, 1988)	78-149
Tabel 10.	Volume air per gram menurut suhu	89-149
Tabel 11.	Volume lubang uji dan berat contoh minimum	89-149
Tabel 12.	Keunggulan dan kelemahan masing-masing metoda pengujian berat isi lapangan	89-149
Tabel 13.	Peralatan pemadatan yang sesuai dengan jenis tanah (Sumber: Horner, 1988).....	99-149
Tabel 14.	Perkiraan (sangat konservatif) ukuran konstruksi penahan tanah (Sumber: Baker)	123-149
Tabel 15.	Perkiraan hubungan indeks plastas dengan potensi pemuaian*.....	125-149
Tabel 16.	Faktor yang mempengaruhi pemuaian lempung dipadatkan.....	127-149
Tabel 17.	Contoh peralatan yang digunakan pada proyek pemadatan sebagaimana diuraikan pada Batir 3 (Sumber: Horner, 1988)	138-149
tabel 18.	Contoh lembar perhitungan volume galian dan timbunan (Sumber: Ritter, 1960)	147-149

Daftar gambar

Gambar 1.	Bentuk bidang longsor	15-149
Gambar 2.	Diagram gaya akibat masa tanah	16-149
Gambar 3.	Jenis-jenis longsor rotasi	18-149
Gambar 4.	Lereng dan bidang longsor	18-149
Gambar 5.	Metoda Fellenius untuk menentukan bidang longsor kritis	19-149
Gambar 6.	Analisis "c- ϕ " dengan metoda irisan	20-149
Gambar 7.	Lereng dengan retak tarik	21-149
Gambar 8.	Kurva Taylor untuk berbagai sudut geser (Sumber: TRRL, 1952).....	22-149
Gambar 9.	Kurva Taylor untuk $\phi = 0^0$ dan $\beta < 53^0$ (Sumber: TRRL, 1952).....	23-149
Gambar 10.	Seksi galian-timbunan	25-149
Gambar 11.	Longsor pada lapisan batuan yang miring	26-149
Gambar 12.	Pelapukan diferensial	27-149
Gambar 13.	Teori disain lereng pada batuan	27-149
Gambar 14.	Prinsip disain lereng	30-149
Gambar 15.	Prinsip disain lereng dengan bahu banyak	31-149
Gambar 16.	Contoh disain lereng pada galian batuan	31-149
Gambar 17.	Prinsip disain lereng dengan bahu sementara	32-149
Gambar 18.	Kemiringan longitudinal bahu pada batuan	33-149
Gambar 19.	Hubungan tipikal antara penurunan dengan waktu	45-149
Gambar 20.	Cara grafis penentuan penurunan akibat pembebanan bertahap (Sumber: TRRL, 1952)	49-149
Gambar 21.	Model proses konsolidasi	50-149
Gambar 22.	Syarat batas yang digunakan pada teori Terzaghi	52-149
Gambar 23.	Diagram penampang alat pengujian konsolidasi	54-149
Gambar 24.	Hubungan angka pori-tegangan	55-149
Gambar 25.	Penurunan pada timbunan	59-149
Gambar 26.	Cara penggantian lapisan lunak dangkal	61-149
Gambar 27.	Cara penggalian dan pendesakan sebagian	61-149
Gambar 28.	Skema konstruksi kolom pasir	62-149
Gambar 29.	Kombinasi beban segi tiga sebagai pengganti beban trapezium (Sumber: Baker, 1960)	64-149
Gambar 30.	Grafik tegangan vertical akibat beban segi tiga (Sumber: Baker, 1960)	65-149
Gambar 31.	Grafik tegangan akibat beban segi empat (Sumber: Baker, 1960).....	66-149
Gambar 32.	Skema bagian-bagian tanah	68-149
Gambar 33.	Hubungan kadar air dengan berat isi kering	69-149
Gambar 34.	Pengaruh kadar air terhadap berat isi kering.....	70-149
Gambar 35.	Hasil pengujian pemadatan lempung kepasiran (Sumber: TRRL, 1952)	71-149
Gambar 36.	Pengaruh daya pemadatan terhadap berat isi kering (Sumber: Krebs, 1971)	71-149
Gambar 37.	Hubungan kadar air dengan berat isi kering dan CBR (Sumber: TRRL, 1952)	72-149
Gambar 38.	CBR pada berbagai berat isi kering dan kadar air (sumber: Yoder, 1975).....	72-149
Gambar 39.	Pengaruh berat isi kering terhadap CBR dan pemuaian untuk lempung tipikal (Sumber: Yoder, 1975)	74-149
Gambar 40.	Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan penyusutan (Sumber: TRRL, 1952)	74-149
Gambar 41.	Pengaruh kepadatan terhadap penurunan (Sumber: TRRL, 1952).....	75-149

Gambar 42.	Pengaruh berat isi kering terhadap permeabilitas lempung CH (sumber: Ingles, 1972).....	76-149
Gambar 43.	Hubungan jumlah lintasan mesin pemadat roda besi 11½ ton dengan berat isi kering	81-149
Gambar 44.	Peralatan pengujian berat isi dengan metoda tabung	84-149
Gambar 45.	Alat pemeriksaan berat isi tanah	88-149
Gambar 46.	Pola kurva hasil pengujian pemadatan	91-149
Gambar 47.	Kurva kepadatan tipikal tanah Ohio (sumber: Yoder, 1975).....	92-149
Gambar 48.	<i>Hyster C5330A pneumatic-tyred compactor</i>	95-149
Gambar 49.	<i>Hyster model D towed grid roller</i>	96-149
Gambar 50.	<i>Bomag K300 self-propelled tamping roller</i>	96-149
Gambar 51.	<i>Bomag BW 212S self propelled vibrating roller</i>	96-149
Gambar 52.	<i>Bomag BW 90S manually guided vibrating roller</i>	96-149
Gambar 53.	<i>Bomag P2000 vibrating plate compactor</i>	97-149
Gambar 54.	Siklus pengelolaan dan pemantauan lingkungan	103-149
Gambar 55.	Contoh penempatan tanah buangan yang tidak seksama	107-149
Gambar 56.	Pemasangan drainase bawah permukaan tipikal	111-149
Gambar 57.	Ilustrasi longsor sebagai akibat gelincir (<i>slipout</i>)	112-149
Gambar 58.	Beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng (Sumber: Baker)	113-149
Gambar 59.	Metoda relokasi	114-149
Gambar 60.	Beberapa teknik penggalian untuk menangani longsor	116-149
Gambar 61.	Konstruksi penahan tipikal	121-149
Gambar 62.	Hubungan perubahan volume dengan kadar koloid, indeks plastis dan batas susut (Sumber: Krebs, 1971)	125-149
Gambar 63.	Grafik klasifikasi untuk potensi pemuaian	126-149
Gambar 64.	Pengaruh struktur tanah dan konsentrasi elektrolit terhadap pemuaian lempung kepasiran (Sumber: Krebs, 1971)	127-149
Gambar 65.	Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan tegangan pemuaian (Sumber: Krebs, 1971)	128-149
Gambar 66.	Pengaruh kadar air pemadatan terhadap pemuaian dan tegangan Pemuaian (Sumber: Krebs, 1971)	128-149
Gambar 67.	Jenis-jenis patok berdasarkan penempatannya	130-149
Gambar 68.	Posisi patok lereng pada potongan melintang tipikal	131-149
Gambar 69.	Potongan melintang sebagai ilustrasi untuk penentuan lokasi patok lereng	132-149
Gambar 70.	Contoh proyek pemindahan tanah yang besar (Sumber: Horner, 1988)	135-149
Gambar 71.	Permukaan tanah asli dan mal seksi	139-149
Gambar 72.	Contoh diagram masa (Sumber: Ritter, 1960)	146-149

Pendahuluan

Tanah dasar merupakan pondasi bagi perkerasan, baik perkerasan yang terdapat pada jalur lalu-lintas maupun bahu. Dengan demikian, tanah dasar merupakan konstruksi terakhir yang menerima beban kendaraan yang disalurkan oleh perkerasan.

Pada kasus yang sederhana, tanah dasar dapat terdiri atas tanah asli tanpa perlakuan; sedangkan pada kasus lain yang lebih umum, tanah dasar terdiri atas tanah asli pada galian atau bagian atas timbunan yang dipadatkan.

Sebagai pondasi perkerasan, disamping harus mempunyai kekuatan atau daya dukung terhadap beban kendaraan, maka tanah dasar juga harus mempunyai stabilitas volume akibat pengaruh lingkungan, terutama air. Tanah dasar yang mempunyai kekuatan dan stabilitas volume yang rendah akan mengakibatkan perkerasan mudah mengalami deformasi (misal gelombang atau alur) dan retak. Dengan demikian, maka perkerasan yang dibangun pada tanah dasar yang lemah dan mudah dipengaruhi lingkungan akan mempunyai umur pelayanan yang pendek.

Sehubungan dengan hal di atas, pada pedoman ini diuraikan aspek-aspek yang berkaitan dengan pekerjaan tanah dasar yang diharapkan mampu menahan beban kendaraan serta tidak mudah terpengaruh oleh cuaca atau lingkungan. Dengan demikian, pedoman ini diharapkan menjadi pedoman bagi pembina jalan, terutama pelaksana di lapangan, yang menjadi kesatuan dengan Spesifikasi.

Buku Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar ini disajikan dalam 3 buku, dengan ruang lingkup sebagai berikut :

- **Buku 1. Umum**

Menguraikan tentang sifat alami tanah, sifat-sifat dasar tanah, udara dalam tanah, air dalam tanah, klasifikasi tanah, persyaratan dan pengendalian pekerjaan tanah, serta perencanaan pekerjaan tanah.

- **Buku 2. Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar untuk Pekerjaan Jalan**

Menguraikan tentang tata cara pekerjaan galian tanah, tata cara pekerjaan timbunan tanah, tata cara pekerjaan pemadatan tanah, permasalahan dalam pekerjaan tanah, serta keselamatan kerja, pengendalian lingkungan pada pelaksanaan pekerjaan tanah, permasalahan tanah dasar serta contoh perencanaan dan proyek pekerjaan tanah.

- **Buku 3. Pedoman Penyelidikan dan Pengujian Tanah Dasar untuk Pekerjaan Jalan**

Menguraikan tentang tata cara penyelidikan dan pengambilan contoh tanah, serta pengujian tanah.

Pedoman pekerjaan tanah dasar
Buku 2
Pedoman pekerjaan tanah dasar untuk pekerjaan jalan

1. Ruang lingkup

Tanah dasar merupakan tanah dimana perkerasan dibangun, sebagaimana halnya dengan bangunan sipil lainnya. Pada kasus yang sederhana, tanah dasar dapat terdiri atas tanah asli tanpa perlakuan; sedangkan pada kasus lain yang lebih umum, tanah dasar terdiri atas tanah asli pada galian atau bagian atas timbunan yang dipadatkan.

Sebagai prasarana transportasi darat, perkerasan harus mempunyai permukaan yang selalu rata dan kesat, agar para pengguna jalan dapat merasa nyaman dan aman (*safe*). Karena dibangun pada tanah dasar, maka kinerja perkerasan akan sangat dipengaruhi oleh mutu tanah dasar.

Dengan dituntutnya perkerasan yang harus selalu mempunyai permukaan yang rata, maka persyaratan utama yang harus dipenuhi tanah dasar adalah tidak mudah mengalami perubahan bentuk. Tanah dasar yang mengalami perubahan bentuk, baik akibat beban lalu-lintas maupun cuaca, akan mengakibatkan perkerasan mengalami kerusakan (misal, gelombang, alur, penurunan) yang kemungkinan diikuti dengan terjadinya retak.

Perubahan bentuk tanah dasar dapat diakibatkan oleh kekuatan atau daya dukung yang rendah (tanah mudah runtuh), pengembangan, penyusutan dan densifikasi tanah dasar serta konsolidasi tanah di bawah tanah dasar. Lebih jauh lagi, faktor-faktor tersebut akan tergantung pada jenis tanah, berat isi kering dan kadar air.

Pedoman ini pada dasarnya menguraikan tentang pengetahuan dasar tanah baik itu sifat-sifat tanah, klasifikasi tanah, serta dilengkapi dengan pelaksanaan pekerjaan utahan, perencanaan pekerjaan tanah dasar.

Diharapkan pedoman ini dapat dijadikan acuan dalam menerapkan (atau menyiapkan) Spesifikasi, terutama bagi perencana (*designer*) dan pelaksana, dalam membangun tanah dasar yang memenuhi tuntutan lalu-lintas dan lingkungan di Indonesia.

2 Acuan normatif

Penulisan pedoman yang menyangkut standar, terutama metoda pengujian dan spesifikasi, menggunakan acuan sebagai berikut :

- SNI 03-1742-1989 : Metode Pengujian Kepadatan Ringan untuk Tanah
- SNI 03-1743-1989 : Metode Pengujian Kepadatan Berat untuk Tanah
- SNI 03-1744-1989 : Metode Pengujian CBR Laboratorium
- SNI 03-1966-1989 : Metode Pengujian Batas Plastis
- SNI 03-1967-1990 : Metode Pengujian Batas Cair dengan Alat Casagrande
- SNI 03-1976-1990 : Metode Koreksi untuk Pengujian Pemadatan Tanah yang Mengandung Butir Kasar
- SNI 03-2828-1992 : Metode Pengujian Kepadatan Lapangan dengan Alat Konus Pasir
- SNI 03-3423-1994 : Metode Pengujian Analisis Ukuran Butir Tanah dengan Alat Hidrometer
- SNI 03-3637-1994 : Metode Pengujian Berat Isi Tanah Berbutir Halus dengan Cetakan Benda Uji
- Pd M-29-1998-03 : Metode Pengujian untuk Menentukan Tanah Ekspansif

- Pd T-03-1998-03 : Tata Cara Klassifikasi Tanah dan campuran Tanah Aagregat untuk Kkonstruksi Jalan
- SNI 03-3437-1994 : Tata Cara Pembuatan Rencana Stabilisasi Tanah dengan Kapur untuk Jalan
- SNI 03-3438-1994 : Tata Cara Pembuatan Rencana Stabilisasi Tanah dengan Semen Portland untuk Jalan
- SNI 03-3439-1994 : Tata Cara Pelaksanaan Stabilisasi Tanah dengan Kapur untuk Jalan
- SNI 03-3440-1994 : Tata Cara Pelaksanaan Stabilisasi Tanah dengan Semen Portland untuk Jalan
- SNI 03-4147-1996 : Spesifikasi Kapur untuk Stabilisasi Tanah
- Pd M-07-1998-03 : Metode Pengujian Kadar Semen pada Campuran Semen Tanah dengan Analisis Kimia
- Pd T-03-1998-03 : Tata Cara Klasifikasi Tanah dan Campuran Tanah Agregat untuk Konstruksi Jalan
- SNI 03-1966-1990 : Metode Pengujian Batas Plastis
- SNI 03-1967-1990 : Metode Pengujian Batas Cair dengan Alat Cassagrande.
- SNI 03-2417-1991 : Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles
- SNI 03-4141-1996 : Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat
- SNI 03-2828-1992 : Metode Pengujian Kepadatan Lapangan dengan Alat Konus Pasir.
- SNI 03-3423-1994 : Metode Pengujian Analisis Ukuran Butir Tanah dengan Alat Hidrometer
- SNI 03-6412-2000 : Metode Pengujian Kadar Semen dalam Campuran Segar Semen-Tanah
- SNI 13-6427-2000 : Metode Pengujian Uji Basah dan Kering Campuran Tanah-Semen Dipadatkan
- SNI 19-6426-2000 : Metode Pengujian Pengukuran pH Pasta Tanah-Semen untuk Stabilisasi
- SNI 03-6798-2002 : Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Kuat Tekan dan Lentur Tanah-Semen di Laboratorium
- SNI 03-6817-2002 : Metode Pengujian Mutu Air untuk Digunakan dalam Beton
- SNI 03-6886-2002 : Metode Pengujian Hubungan Antara Kadar Air dan Kepadatan pada Campuran Tanah-Semen
- SNI 03-6887-2002 : Metode Pengujian Kuat Tekan Bebas Campuran Tanah-Semen
- SNI 03-1966-1990 : Metode Pengujian Batas Plastis
- SNI 03-1967-1990 : Metode Pengujian Batas Cair dengan Alat Cassagrande
- SNI 03-1968-1990 : Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar
- SNI 03-1976-1990 : Metode Koreksi untuk Pengujian Pemadatan Tanah yang Mengandung Butir Kasar
- SNI 03-2417-1991 : Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles
- SNI 15-2049-1994 : Semen Portland
- SNI 03-3407-1994 : Metode Pengujian Sifat Kekekalan Bentuk Agregat Terhadap Larutan Natrium Sulfat dan Magnesium Sulfat
- SNI 03-4141-1996 : Metode Pengujian Gumpalan Lempung dan Butir-Butir Mudah Pecah dalam Agregat
- SNI 03-6388-2000 : Spesifikasi Agregat Lapis Pondasi Bawah, Lapis Pondasi Atas dan Lapis Permukaan
- SNI 03-6412-2000 : Metode Pengujian Kadar Semen dalam Campuran Segar Semen-Tanah
- SNI 19-6413-2000 : Metode Pengujian Kepadatan Berat Isi Tanah di Lapangan dengan Balon Karet
- SNI 03-6429-2000 : Metode Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder dengan Cetakan Silinder di dalam Tempat Cetakan
- SNI 03-6817-2002 : Metode Pengujian Mutu Air untuk Digunakan dalam Beton

3. Istilah dan definisi

3.1.

air kapiler

air yang dipengaruhi oleh aksi kapiler.

3.2.

aktifitas

perbandingan antara indeks plastis dengan persentase berat butir yang lebih kecil dari 0,002 mm.

3.3.

angka poisson

perbandingan antara regangan dalam arah lateral terhadap regangan dalam arah longitudinal, sesuai dengan arah beban.

3.4.

angka pori

perbandingan antara volume udara terhadap volume bahan padat tanah yang biasa dinyatakan dalam persen.

3.5.

angka stabilitas

perbandingan antara kohesi dengan hasil perkalian faktor keamanan, berat isi tanah dan tinggi lereng.

3.6.

batas atterberg

empat tingkat konsistensi tanah sebagaimana yang didefinisikan melalui pengujian batas cair, batas plastis dan batas susut.

3.7.

batas cair

kadar air dimana konsistensi tanah berubah dari cair menjadi plastis.

3.8.

batas plastis

kadar air dimana konsistensi tanah berubah dari plastis menjadi semi padat.

3.9.

batas susut

kadar air tertinggi dimana pengeringan mulai kadar air tersebut, tanah tidak mengalami penyusutan.

3.10.

batuan

bagi ahli geologi, batuan berarti semua endapat alami yang membentuk kulit bumi, baik dalam bentuk padat (misal granit), butiran (misal pasir dan kerikil) maupun dalam bentuk tanah (misal lempung); bagi ahli teknik sipil, batuan berarti bahan padat (*solid*) yang biasanya tidak dapat digali dengan cara manual.

3.11.

batuan beku

batuan yang berasal dari magma cair yang mendingin dan membeku.

3.12.

batuan metamorf

batuan sedimen atau batuan beku yang telah mengalami perubahan akibat tekanan dan panas dalam bumi serta reaksi kimia.

3.13.

batuan sedimen

batuan yang terbentuk melalui akumulasi sedimen (butir-butir halus) dalam air.

3.14.

berat isi

perbandingan antara berat dengan volume suatu masa tanah.

3.15.

berat isi basah

perbandingan antara berat bahan padat dan air terhadap volume masa tanah.

3.16.

berat isi kering

perbandingan antara berat kering terhadap volume masa tanah.

3.17.

berat isi kering maksimum

berat isi kering pada kadar air optimum.

3.18.

berat jenis

perbandingan antara berat isi suatu bahan terhadap berat isi air pada suhu tertentu.

3.19.

bongkah

butiran tanah yang mempunyai ukuran lebih dari 75 mm.

3.20.

california bearing ratio (CBR)

kekuatan relatif tanah terhadap kekuatan agregat standar.

3.21.

dilatansi (*reaction to shaking*)

sifat tanah dimana apabila contoh tanah diguncang-guncang (*shaking*) pada telapak tangan, air yang terkandungnya dapat muncul di permukaan dan apabila contoh tanah dipijit (*squeezing*), air yang muncul di permukaan akan hilang kembali.

3.22.

derajat kejenuhan

perbandingan antara volume rongga yang terisi air dengan volume rongga total yang biasa dinyatakan dalam persen.

3.23.

elastisitas

sifat tanah untuk kembali ke bentuk asal setelah mengalami perubahan bentuk akibat pembebanan sesaat.

3.24.

faktor keamanan

perbandingan antara kekuatan geser yang dimobilisasi tanah dengan kekuatan geser yang ditimbulkan masa tanah.

3.25.

faktor waktu

perbandingan antara hasil perkalian koefisien konsolidasi lamanya konsolidasi terhadap kuadrat jarak tempuh air.

3.26.

gambut

tanah berwarna gelap, berbentuk serat, menyerupai busa dan berasal dari tumbuhan.

3.27.

geofisika

hal-hal yang berkaitan dengan fisik bumi, terutama dalam penggunaan peralatan atau metoda (misal seismograff) untuk menyelidiki bagian bumi yang tidak dapat diakses.

3.28.

geologi

ilmu yang mempelajari komposisi dan susunan elemen-elemen kulit bumi, termasuk formasi, struktur, posisi dan sejarahnya.

3.29.

geoteknik

ilmu yang menganalisis perilaku tanah serta disain dan pembangunan bangunan bawah, yaitu bagian bangunan yang menyalurkan langsung beban ke tanah.

3.30.

horizon "A"

lapisan teratas tanah dimana koloid anorganik dan bahan larut lain telah terbilas dan biasanya terdiri atas sisa-sisa bahan organik.

3.31.

horizon "B"

lapisan tanah sebagai akumulasi bahan hasil pembilasan Horizon "A".

3.32.

horion "C"

lapisan tanah yang belum terganggu, yang membentuk Horizon "A" dan "B".

3.33.

horizon "D"

lapisan tanah di bawah Horizon "C" atau "B" (apabila tidak ada Horion "C") yang kurang mirip dengan horizon lapisan di atasnya.

3.34.

horizon tanah

lapisan-lapisan yang terdapat pada profil tanah, yang pada dasarnya dibedakan berdasarkan tekstur, warna, struktur dan kandungan bahan kimia.

3.35.

indeks plastis

selisih antara batas cair dengan batas plastis.

3.36.

indeks kelompok

angka yang menunjukkan kelompok (*group*) pada suatu kelas tanah menurut *AASHTO*.

3.37.

indeks pemampatan

kemiringan grafik yang menunjukkan hubungan antara angka pori (dalam skala linier) dengan tegangan efektif (dalam skala logaritma).

3.38.

kadar air

perbandingan antara berat air dengan berat kering atau bahan padat contoh tanah, yang biasanya dinyatakan dalam persen.

3.39.

kadar air optimum

kadar air yang menghasilkan berat isi kering maksimum.

3.40.

kerikil

butiran tanah yang berukuran antara 75 mm dan 4,75 mm, menurut ASTM D 422.

3.41.

kepadatan

kadang-kadang disebut derajat kepadatan, yaitu perbandingan antara berat isi kering dengan berat isi kering maksimum tanah, yang biasa dinyatakan dalam persen. Kepadatan kadang-kadang diartikan pula sebagai berat isi kering tanah.

3.42.

kepadatan relatif

perbandingan antara berat isi kering lapangan dikurangi berat isi kering lepas terhadap berat isi kering maksimum laboratorium dikurangi berat isi kering lepas.

3.43.

koefisien konsolidasi

perbandingan antara koefisien permeabilitas terhadap hasil perkalian koefisien perubahan volume dengan berat isi air.

3.44.

koefisien pemampatan

perbandingan antara perubahan angka pori terhadap perubahan tegangan.

3.45.

koefisien permeabilitas

kecepatan aliran air dalam tanah di bawah pengaruh satuan gradien hidrolik, dinyatakan dalam satuan panjang per satuan waktu.

3.46.

koefisien perubahan volume

perubahan volume per satuan volume per satuan peningkatan tegangan efektif.

3.47.

kohesi

kekuatan geser tanah yang diakibatkan oleh bukan tahanan gesek.

3.48.

koloid

butiran halus yang berukuran kurang dari 0,001 mm.

3.49.

konsistensi

sifat tanah yang menunjukkan kemudahan relatif untuk dirubah bentuknya.

3.50.

konsolidasi

proses keluarnya air dari masa tanah sebagai akibat pembebanan yang terus menerus dalam suatu periode tertentu sehingga butir-butir tanah menjadi lebih kompak.

3.51.

kuat geser

ketahanan maksimum tanah (gabungan antara kohesi dan tahanan gesek) akibat tekanan geser.

3.52.

lanau

butiran tanah yang berukuran antara 0,075 mm dan 0,005 mm (menurut *ASTM D 422*), atau antara 0,075 mm dan 0,002 mm (menurut *AASHTO T 88*).

3.53.

lempung

butiran halus berukuran kurang dari 0,005 mm (menurut *ASTM D 422*), atau kurang dari 0,002 mm (menurut *AASHTO T 88*).

3.54.

lendutan

penurunan permukaan sebagai akibat pembebanan.

3.55.

longsor rotasi

longsor yang mempunyai bidang longsor berbentuk garis lengkung dan biasanya terjadi pada lereng yang panjangnya terbatas.

3.56.

longsor translasi

longsor yang mempunyai bidang longsor berbentuk garis lurus dan biasanya terjadi pada lereng yang panjangnya "tidak terbatas".

3.57.

mekanika tanah

penerapan hukum-hukum mekanika dan hidrolika terhadap masalah teknik yang berkaitan dengan sedimen atau akumulasi butir-butir padat lain yang tidak terkonsolidasi sebagai

hasil proses penghancuran secara mekanis dan kimia daripada batuan, terlepas dari apakah bahan tersebut mengandung atau tidak mengandung bahan organik.

3.58.

muka air tanah

horizon permukaan air tanah dimana tekanan pada permukaan air adalah sama dengan tekanan atmosfer.

3.59.

pasir

butiran tanah berukuran antara 4,75 mm dan 0,425 mm (*menurut ASTM D 422*), atau antara 2 mm dan 0,075 mm (*menurut AASHTO T 88*).

3.60.

pasir halus

butiran tanah yang berukuran antara 2,00 mm dan 0,425 mm (*menurut ASTM D 422*), atau antara 0,425 mm dan 0,075 mm (*menurut AASHTO T 88*).

3.61.

pasir kasar

butiran tanah berukuran antara 4,75 mm dan 2,00 mm (*menurut ASTM D 422*), atau antara 2 mm dan 0,425 mm (*menurut AASHTO T 88*).

3.62.

pasir sedang

butiran tanah yang berukuran antara 2,00 mm dan 0,425 mm (*menurut ASTM D 422*).

3.63.

pedologi

ilmu pengetahuan tentang cara memperlakukan tanah, yang mencakup penentuan sifat-sifat alami (*nature*), sifat-sifat, formasi, fungsi, perilaku dan pengaruh pemanfaatan dan penataannya (manajemen).

3.64.

pekerjaan tanah

kegiatan dimana tanah atau batuan digali, diangkut dan ditempatkan sebagai timbunan atau bahan buangan serta kemudian dipadatkan. Meskipun pemadatan dapat termasuk sebagai bagian pekerjaan tanah, namun pekerjaan tersebut dapat ditinjau secara terpisah.

3.65.

pemampatan (*compressibility*)

sifat yang memungkinkan tanah dapat menurun volumenya apabila dikenai beban.

3.66.

pemadatan (*compaction*)

proses keluarnya udara dari masa tanah sebagai akibat kekuatan mekanis sehingga butir-butir tanah menjadi lebih kompak.

3.67.

pembilasan (*leaching*)

proses dimana koloid atau bahan larut yang terdapat dalam tanah terbawa oleh air.

3.68.

pemompaan (*pumping*)

proses terbawanya butir-butir halus (di bawah perkerasan) oleh air yang tertekan akibat beban yang disalurkan melalui perkerasan.

3.69.

pemuaian (*bulking*)

perbandingan antara volume tanah lepas dengan volume tanah asli sebelum digali, biasanya digunakan pada pekerjaan tanah.

3.70.

pemuaian (*swelling*)

peningkatan volume tanah akibat penambahan kadar air, biasa digunakan pada mekanika tanah.

3.71.

pengisapan tanah (*soil suction*)

pengurangan tekanan (di bawah tekanan atmosfer) yang mengakibatkan naiknya air di antara butir-butir tanah (pengisapan disebabkan oleh daya kapiler dan faktor-faktor lain serta sering digunakan secara bergantian dengan istilah potensi kapiler).

3.72.

penurunan (*settlement*)

pergerakan ke bawah timbunan atau struktur sebagai akibat pengurangan rongga dalam tanah di bawah timbunan atau struktur atau dalam tanah timbunan, atau kedua-duanya. Pengurangan rongga terjadi sebagai akibat densifikasi (keluarnya udara) atau konsolidasi (keluarnya air).

penyusutan (*shrinkage*)

perbandingan antara volume tanah lepas dengan volume tanah setelah dipadatkan, biasa digunakan pada pekerjaan tanah.

3.73.

permeabilitas

sifat yang menunjukkan kemampuan tanah untuk mengalirkan air melalui pori-pori dalam tanah.

3.74.

pF

nilai ekuivalen pengisapan tanah, yaitu sebagai logaritma tinggi kolom air kapiler yang dinyatakan dalam centimeter.

3.75.

pH

nilai negatif logaritma konsentrasi ion hidrogen dalam bentuk suspensi dalam tanah.

3.76.

plastisitas

sifat yang memungkinkan tanah berubah bentuk tanpa retak atau mengalami perubahan volume yang berarti.

3.77.

porositas

perbandingan antara volume udara dengan volume masa tanah yang biasa dinyatakan dalam persen.

3.78.

profil tanah

potongan vertikal tanah yang menunjukkan sifat-sifat alami dan urutan berbagai lapisan, sebagai hasil pengendapan atau pelapukan, atau kedua-duanya.

3.79.

sensitivitas

perbandingan antara kuat tekan bebas tanah asli dengan kuat tekan bebas tanah yang benar-benar terganggu (*remolded*), tetapi pada kadar dan angka pori, atau berat isi kering, yang sama.

3.80.

struktur tanah

susunan butir-butir tanah.

3.81.

sudut geser

kekuatan geser tanah yang diakibatkan oleh tahanan gesek butir-butir tanah.

3.82.

tanah

bahan lepas atau endapan lunak (di luar batuan) yang terdapat pada permukaan bumi sebagai hasil pelapukan atau penghancuran batuan, atau pembusukan tumbuhan.

3.83.

tanah dasar

tanah (galian atau timbunan) yang terdapat di bawah perkerasan.

3.84.

tanah jenuh

tanah yang seluruh rongganya terisi air (tidak mengandung rongga udara).

3.85.

tanah laterit

tanah di daerah tropis dimana proses pelapukan telah menimbulkan akumulasi *sesquioxides* (bahan gabungan yang terdiri atas dua per tiga bagian oksida dan satu per-tiga bagian bahan lain, terutama besi).

3.86.

tanah penutup

lapisan atas tanah yang menunjang kehidupan tumbuhan.

3.87.

tanah residual

tanah yang terbentuk di tempat dari batuan atau bahan induk.

3.88.

tanah terpindahkan (*transported soils*)

tanah residual yang telah dipindahkan dan ditempatkan kembali oleh angin, air atau es.

3.89.

tekanan air tanah

tekanan air dalam rongga pada tanah jenuh.

3.90.

tekstur tanah (distribusi butir, gradasi)

proporsi masing-masing butir atau kelompok butir yang membentuk tanah.

4. Simbol

a	= jari-jari butir tanah
A	= luas permukaan
	= luas seksi yang berurutan, untuk menghitung volume galian/timbunan
AASHTO	= <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	= <i>American Society for Testing and Materials</i>
a_v	= koefisien pemampatan tanah
β	= sudut kemiringan lereng
c	= konstanta pada penentuan gaya tarik air terhadap butir tanah
	= koreksi pembacaan letak hidrometer akibat miniskus air
	= kohesi tanah
	= satuan biaya operasi alat
C	= biaya total operasi alat
CBR	= <i>California Bearing Ratio</i>
C_c	= indeks pemampatan tanah
	= koefisien lengkungan
C_u	= koefisien keseragaman
C_v	= koefisien konsolidasi
d	= jarak antara dua butir tanah
	= diameter butir tanah
	= lengan momen pada analisis stabilitas lereng
D	= diameter butir tanah
	= kedalaman bidang longsor
	= kedalaman retak
	= tebal lapisan yang dipadatkan
D_{10}	= ukuran pada 10% berat butir yang lolos
D_{30}	= ukuran pada 30% berat butir yang lolos
D_{60}	= ukuran pada 60% berat butir yang lolos
D_f	= faktor letak vertikal permukaan lapisan keras dari permukaan tanah
e	= angka pori
	= biaya penggalian tanah
f	= gaya tarik air terhadap dua butir tanah
F	= persentase berat butir yang lolos saringan No. 200 pada perhitungan indeks kelompok tanah
	= faktor keamanan stabilitas lereng
ϕ	= sudut geser tanah
g	= gravitasi
γ	= berat isi tanah
γ_s	= berat isi bahan padat atau butir-butir tanah
γ_w	= berat isi air
gc	= berat jenis butir kasar
gf	= berat jenis butir halus
GI	= indeks kelompok (<i>Group Index</i>)
G_s	= berat jenis tanah
G_w	= berat jenis air
h	= letak titik berat hidrometer dari permukaan air
	= tebal lapisan tanah pada penentuan CBR
	= jarak pengangkutan di luar jarak bebas

H	= tinggi lereng
	= tebal lapisan tanah pada analisis konsolidasi
JRA	= <i>Japan Road Association</i>
k	= koefisien permeabilitas
K	= faktor koreksi volume tabung untuk pengujian berat isi tanah
l	= panjang busur pada bidang longsor
L	= jarak antara 2 seksi yang berurutan, untuk menghitung volume galian/timbunan
LI	= panjang gorong-gorong
LL	= batas cair
m	= koreksi suhu terhadap keenceran air
m_v	= koefisien perubahan volume
η	= viskositas air
n	= porositas
	= faktor letak horizontal bidang longsor dari tumit lereng
N	= bilangan bulat (<i>integer</i>) pada perhitungan penurunan
	= jumlah alat pada pekerjaan tanah
	= jumlah lintasan pemadatan/penumbukan
N_s	= angka stabilitas lereng
O	= biaya pengangkutan pada jarak-tambahan
p	= beban
	= tegangan awal yang bekerja pada permukaan, untuk hitung penurunan tanah
pc	= persentase fraksi kasar pada perhitungan berat jenis
pf	= persentase fraksi halus pada perhitungan berat jenis
pF	= angka ekuivalen tinggi air kapiler, yaitu sebagai logaritma tinggi air kapiler dalam satuan centimeter
pH	= skala yang menyatakan tingkat keasaman tanah
PI	= indeks plastis
PL	= batas plastis
r	= jari-jari bidang longsor
	= pembacaan hidrometer
	= jari-jari hidrolis
R_h	= pembacaan hidrometer yang telah dikoreksi
S	= penurunan
	= persentase berat butir pada analisis butir dengan hidrometer
SL	= batas susut
S_r	= derajat kejenuhan
SNI	= Standar Nasional Indonesia
σ	= tegangan tekan normal
t	= lama pengendapan butir pada analisis butir dengan hidrometer
	= waktu konsolidasi
	= waktu yang diperlukan untuk pemadatan
T	= waktu yang tersedia untuk pelaksanaan pekerjaan
	= tegangan tarik permukaan butir
T_v	= faktor waktu pada analisis konsolidasi
TW	= kedalaman air di sebelah hilir gorong-gorong
τ	= tegangan geser
θ	= sudut untuk menghitung gaya tarik antara dua butir tanah
	= sudut bidang longsor dengan bidang horizontal
U	= derajat konsolidasi
V	= volume contoh tanah
	= volume galian/timbunan
V_a	= volume udara dalam contoh tanah
V_o	= volume contoh kering tanah
V_s	= volume bahan padat dalam contoh tanah
V_w	= volume air dalam contoh tanah

V_v	= volume rongga dalam contoh tanah
w	= kadar air contoh tanah
	= berat tanah
W	= berat contoh tanah
	= berat tanah
W_w	= berat air pada contoh tanah
W_s	= berat bahan padat pada contoh tanah
z	= tebal lapisan tanah pada analisis atabilitas lereng

5. Pekerjaan galian

5.1. Umum

Meskipun terdapat beberapa definisi, namun istilah “pekerjaan galian” umumnya mempunyai pengertian yang mirip. Pekerjaan galian dapat diartikan sebagai penggalian atau penghilangan (*removal*) tanah, dalam berbagai bentuk, dari posisi aslinya untuk berbagai keperluan, baik permanen (misal untuk jalan) maupun sementara (misal untuk pembuatan pondasi). Dalam pengertian yang lebih luas, pekerjaan galian dapat diartikan sebagai penggalian, pengangkutan dan penempatan tanah, baik pada bangunan timbunan maupun pada tempat pembuangan.

Dua aspek yang menjadi pokok uraian ini menyangkut lereng dan penggalian. Hal tersebut dikarenakan lereng merupakan aspek tidak terpisahkan dari pekerjaan galian yang perlu mendapat perhatian, baik pada saat disain maupun pelaksanaan; sedangkan penggalian (dalam hal ini diartikan sebagai bagian pekerjaan galian) dipandang merupakan pekerjaan utama pada pekerjaan galian.

5.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng dan faktor keamanan

Selama umur rencananya, lereng galian harus tetap stabil, yaitu agar tidak membahayakan bangunan, manusia, harta benda serta pengoperasian alat pada pekerjaan berikutnya yang berada di dekat lokasi pekerjaan. Apabila disain lereng yang aman memerlukan biaya yang sangat tinggi, mungkin dapat diijinkan adanya ketidakstabilan lokal.

Kestabilan lereng dapat diperoleh apabila lereng dibentuk dengan sudut kemiringan yang aman atau apabila dibangun dinding penahan.

Stabilitas lereng alam dan lereng buatan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut:

- Karakteristik, distribusi, kepadatan dan kekuatan tanah.
- Kondisi air tanah atau tekanan air pori.
- Beban luar (*surcharge*).
- Kekuatan dan arah patahan (*discontinuities*).

Pengurangan beban total yang terjadi pada saat pemotongan lereng biasanya mengakibatkan pengurangan tekanan air pori sehingga dalam jangka pendek, stabilitas lereng meningkat. Namun demikian, tekanan air pori akan meningkat lagi sampai mencapai keseimbangan yang baru dan tanah yang membentuk lereng akan menjadi lemah dan selanjutnya mengakibatkan menurunnya stabilitas lereng. Hal tersebut sering terjadi secara cepat pada tanah berbutir dan batuan yang tersambung dengan baik (*well jointed rocks*) sehingga stabilitas lereng dalam jangka panjang dan jangka pendek hanya berbeda sedikit. Sehubungan dengan hal tersebut, analisis stabilitas lereng yang dibentuk oleh kedua jenis tanah tersebut biasanya dilakukan dengan metoda tegangan efektif.

Pada tanah kohesif dan batuan yang mempunyai permeabilitas rendah, proses di atas dapat berlangsung beberapa minggu, bahkan beberapa dekade. Pada kasus tersebut, analisis stabilitas jangka pendek biasanya dilakukan dengan menggunakan metoda tegangan total, sedangkan pada analisis stabilitas jangka menengah dan jangka panjang umumnya digunakan metoda tegangan efektif. Pada daerah yang pernah mengalami ketidakstabilan atau runtuh tektonik, tanah mungkin masih mempunyai bidang geser atau zona runtuh yang lebih lemah daripada tanah di sekitarnya. Penyelidikan dan analisis stabilitas lereng di bagian ini biasanya rumit dan penggunaan metoda tegangan efektif dipandang cocok. Pelapukan dan erosi dapat terjadi pada lereng yang terdiri atas batuan atau tanah sehingga hal tersebut harus diperhitungkan dalam disain. Kerusakan pada lereng yang terdiri atas batuan dapat terjadi akibat peledakan. Untuk mengurangi hal tersebut, sebaiknya diterapkan teknik peledakan khusus, misal dengan teknik pra-pemisahan (*pre-splitting technique*).

Faktor keamanan pada disain lereng sangat tergantung pada pemahaman terhadap kondisi tanah dan kemungkinan keruntuhannya. Dengan penyelidikan yang seksama, faktor keamanan antara 1,3 dan 1,4 dipandang sudah memadai untuk keruntuhan yang terjadi pertama kali, sedangkan faktor keamanan 1,2 dipandang memadai untuk keruntuhan pada permukaan yang pernah mengalami keruntuhan (*pre-existing shear surfaces*).

Pada Tabel 1 ditunjukkan pedoman kasar tentang kemiringan tipikal. Dalam penyelidikan dan disain lereng yang terdiri atas tanah atau batuan sebaiknya melibatkan ahli geoteknik.

Dinding penahan pada pekerjaan sementara biasanya dibuat dari kayu, baja atau almunium, sedangkan pada pekerjaan permanen biasanya dibuat dari baja atau beton. Agar dapat menahan tekanan yang ditimbulkan oleh tanah, beban tambahan (*surcharge*) dan air tanah, dinding penahan harus didisain dengan memperhitungkan faktor-faktor yang sama dengan faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng galian, meskipun biasanya ditetapkan faktor keamanan yang tidak kurang dari 2. Anker mungkin perlu dipasang sebagai bagian dari dinding penahan tanah atau batuan lunak, baik untuk keperluan sementara maupun permanen. Untuk menambah stabilitas lereng yang terbentuk dari batuan dapat digunakan anker dan baut, dengan atau tanpa konstruksi penopang.

Adanya air tanah dapat mengurangi stabilitas lereng dan dinding penahan. Disamping itu, air dapat mengakibatkan tanah galian menjadi tidak cocok untuk timbunan. Dalam hal tersebut, mungkin diperlukan pengeringan sementara atau permanen.

Tabel 1. Kemiringan lereng galian yang disarankan
(Sumber: Horner, 1988)

JENIS TANAH	KEMIRINGAN (V:H)*	
	PERMANEN	SEMENTARA
• Batuan masif	1,5:1 – tegak	1,5:1 – tegak
• Batuan yang mempunyai patahan yang baik (<i>well jointed/bedded rock</i>)	1:2 – 2:1	1:2 – 2:1
• Kerikil	1:2 – 1:1	1:2 – 1:1
• Pasir	1:2,5 – 1:1,5	1:2,5 – 1:1
• Lempung	1:6 – 1:2	1:2 – 2:1

*Hanya sebagai pedoman kasar saja, bukan sebagai disain akhir

5.3. Disain lereng

Dua faktor utama yang mengakibatkan longsornya lereng adalah gaya gravitasi masa tanah serta gaya sisipan air pada tanah.

Analisis stabilitas lereng pada dasarnya terdiri atas dua bagian utama; pertama, penentuan bidang longsor dan penentuan gaya geser pada bidang tersebut yang cenderung mendorong

masa tanah; ke dua penentuan kekuatan geser pada bidang longsor yang menahan pergerakan masa tanah.

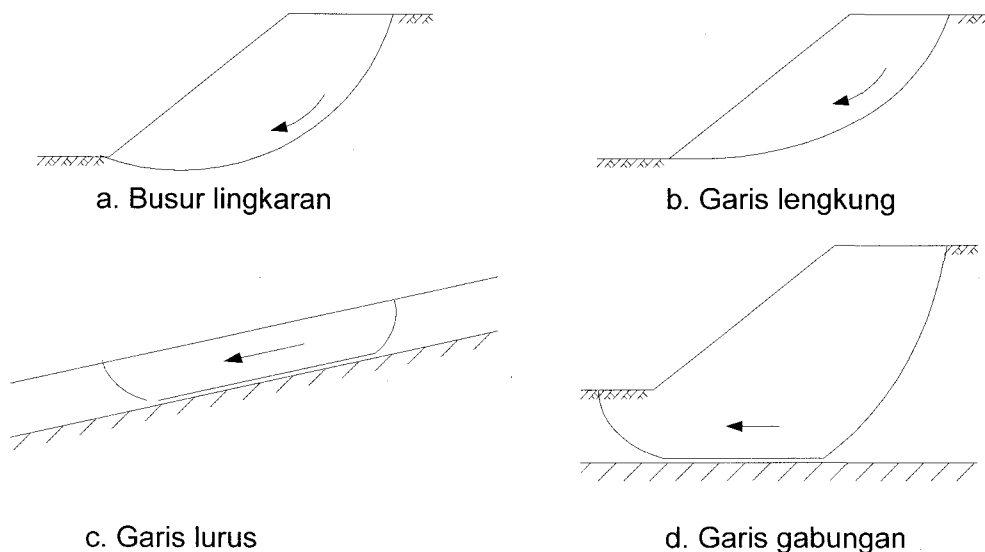
Besarnya gaya geser yang mendorong tanah tergantung pada berat isi tanah dan geometri lereng; sedangkan kekuatan geser tanah yang dapat dimobilisasi merupakan fungsi kohesi dan sudut geser tanah.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, bidang longsor atau bidang gelincir dapat dikelompokkan menjadi,

- Busur lingkaran
- Bukan busur lingkaran
- Garis lurus
- Garis gabungan

Longsoran yang mempunyai bidang berbentuk busur lingkaran atau garis lengkung lain dikenal dengan longsoran rotasi dan biasa terjadi pada tanah yang panjang lerengnya terbatas, sedangkan longsoran yang mempunyai bidang longsor berbentuk garis lurus dikenal dengan longsoran translasi dan biasa terjadi pada tanah miring dimana panjang lerengnya "tidak terbatas". Secara umum, longsoran dengan bidang longsor berbentuk busur lingkaran terjadi pada tanah seragam, sedangkan longsoran dengan bidang longsor berbentuk garis lengkung yang lain terjadi pada tanah yang tidak seragam. Terjadinya longsoran dengan bidang longsor berbentuk garis lurus atau gabungan dipengaruhi oleh keberadaan lapisan tanah yang lebih kokoh. Longsor translasi cenderung terjadi apabila lapisan tanah yang lebih kokoh terletak cukup dangkal; longsoran dengan bidang longsor berbentuk garis gabungan biasanya terjadi apabila lapisan tanah yang lebih kokoh terletak cukup dalam.

Ditinjau dari cara Bergeraknya tanah, longsor dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu: gelincir (*sliding*), keruntuhan (*fall*) dan pelelehan (*flow*). Longsor gelincir biasanya terjadi pada bidang longsor lengkung atau lurus, longsor pelelehan biasanya terjadi pada bidang longsor yang lurus, sedangkan longsor keruntuhan umumnya tidak mempunyai bidang longsor yang jelas.



Gambar 1. Bentuk bidang longsor

5.3.1. Longsor translasi

Dengan memperhatikan Gambar 2, tegangan normal dan tegangan geser pada bidang CD akibat masa tanah adalah:

$$\sigma = \sigma_z \cos \beta \dots\dots\dots 1$$

$$= \gamma z \cos^2 \beta \dots\dots\dots 2$$

$$\tau = \sigma_z \sin \beta \dots\dots\dots 3$$

$$= \gamma z \cos \beta \sin \beta \dots\dots\dots 4$$

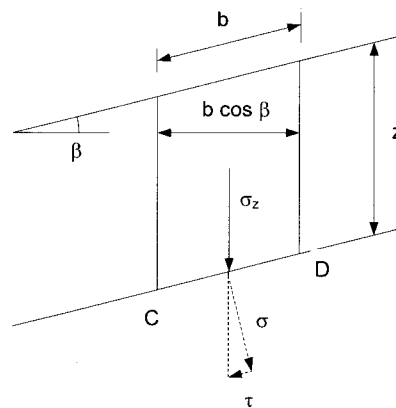
Tegangan geser yang dapat dimobilisasi oleh tanah adalah

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \dots\dots\dots 5$$

$$= c + \gamma z \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi \dots\dots\dots 6$$

Pada saat terjadi kesembungan antara tegangan geser akibat masa tanah (τ) dengan tegangan geser yang dapat dimobilisasi tanah (τ_f), maka,

$$\tau_f = \tau \dots\dots\dots 7$$



Gambar 2. Diagram gaya akibat masa tanah

Agar lereng stabil, maka tegangan geser yang dimobilisasi tanah harus lebih besar dari tegangan geser akibat masa tanah. Perbandingan antara tegangan geser yang dimobilisasi tanah dengan tegangan geser akibat masa tanah disebut faktor keamanan (F), yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \varphi}{\sigma_z \sin \beta} \dots\dots\dots 8$$

$$= \frac{c + \gamma z \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi}{\gamma z \cos \beta \sin \beta} \dots\dots\dots 9$$

Untuk tanah yang tidak berkohesi ($c = 0$), maka Persamaan 9 menjadi,

$$F = \frac{\gamma z \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi}{\gamma z \cos \beta \sin \beta} \dots\dots\dots 10$$

$$= \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \beta} \dots\dots\dots 11$$

Pada Persamaan 10 terlihat bahwa faktor keamanan atau stabilitas lereng tanah tanpa kohesi ($c = 0$) semata-mata fungsi sudut geser tanah (φ) dan kemiringan lereng (β), tidak tergantung pada tinggi lereng.

Apabila pada Persamaan 8, faktor keamanan (F) sama dengan satu, maka z menjadi kedalaman kritis (H_c). Dengan demikian, Persamaan 8 menjadi :

$$1 = \frac{c + \gamma H_c \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H_c \cos \beta \sin \beta} \dots\dots\dots 12$$

$$\gamma H_c \cos \beta \sin \beta = c + \gamma H_c \cos^2 \beta \tan \phi \dots\dots\dots 13$$

$$H_c = \frac{c}{\gamma (\tan \beta - \tan \phi) \cos^2 \beta} \dots\dots\dots 14$$

Pada Persamaan 14 terlihat bahwa untuk kemiringan lereng dan sudut geser tanah yang nilainya tertentu, kedalaman kritis lapisan tanah merupakan fungsi dari kohesi (c).

Dengan menyusun kembali Persamaan 14 diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{c}{\gamma H_c} = (\tan \beta - \tan \phi) \cos^2 \beta \dots\dots\dots 15$$

Pada Persamaan 15, $\frac{c}{\gamma H_c}$ disebut angka stabilitas (*stability number*) dengan simbol N_s .

Dengan demikian, maka:

$$N_s = \frac{c}{\gamma H_c} \dots\dots\dots 16$$

Apabila F_c merupakan faktor keamanan terhadap kohesi dan c_m merupakan kohesi yang dapat dimobilisasi tanah pada kedalaman H, maka:

$$c_m = \frac{c}{F_c} \dots\dots\dots 17$$

Persamaan angka stabilitas dapat ditulis kembali menjadi,

$$N_s = \frac{c}{\gamma H_c} = \frac{c_m}{\gamma H} = \frac{c}{F_c \gamma H} = (\tan \beta - \tan \phi) \cos^2 \beta \dots\dots\dots 18$$

Dari Persamaan 16 dan 18 diperoleh,

$$F_c = \frac{H_c}{H} \dots\dots\dots 19$$

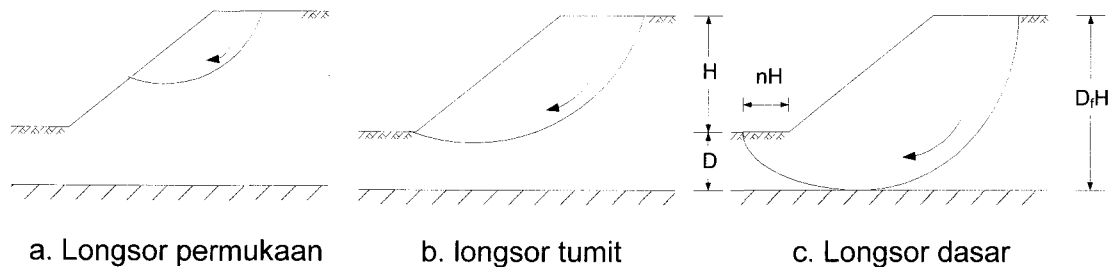
Pada Persamaan 18 terlihat bahwa faktor keamanan terhadap kohesi juga mencerminkan faktor keamanan terhadap tebal lapisan. Hal tersebut didasarkan pada anggapan bahwa sudut geser tanah benar-benar dapat dimobilisasi penuh. Namun demikian, faktor keamanan yang sebenarnya berbeda dengan F_c dan berlaku terhadap kohesi dan sudut geser tanah.

5.3.2. Longsor rotasi

5.3.2.1. Jenis

Dalam analisis stabilitas lereng, bentuk bidang longsor biasanya diganti dengan lengkungan dari spiral logaritma.

Longsor rotasi dapat dikelompokkan menjadi longsor lereng serta longsor dasar. Apabila bidang longsor memotong permukaan lereng pada atau di atas tumit, maka longsor disebut longsor lereng; apabila bidang longsor melalui bidang di bawah tumit, maka longsor disebut longsor dasar. Longsor lereng yang bidang longsornya memotong permukaan lereng disebut longsor permukaan, sedangkan longsor lereng yang bidang longsornya melalui tumit disebut longsor tumit. Jenis longsor tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Jenis-jenis longsor rotasi

5.3.2.2. Analisis stabilitas lereng dengan Metoda Swedia

Meskipun dalam analisis stabilitas longsor rotasi terdapat beberapa metoda (tiga diantaranya adalah Metoda Swedia, Metoda busur gesekan, Metoda Bishop), namun pada pedoman ini hanya diuraikan Metoda Swedia.

Analisis stabilitas lereng dengan Metoda Swedia menganggap bahwa bidang longsor merupakan busur lingkaran. Pada analisis ini dibedakan dua jenis tanah, yaitu tanah kohesif murni ($\phi = 0$) serta tanah yang mempunyai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ)

1) Tanah kohesif murni ($\phi = 0$)

Analisis stabilitas lereng pada tanah jenis ini dikenal juga sebagai analisis " $\phi = 0$ " yang pada dasarnya dilakukan pada sejumlah bidang longsor yang dicoba-coba dan kemudian dihitung faktor keamanannya. Bidang longsor yang mempunyai faktor keamanan terkecil merupakan bidang longsor kritis.

Misal AB pada Gambar 4 merupakan salah satu bidang longsor yang berpusat di titik O serta mempunyai jari-jari sama dengan r .

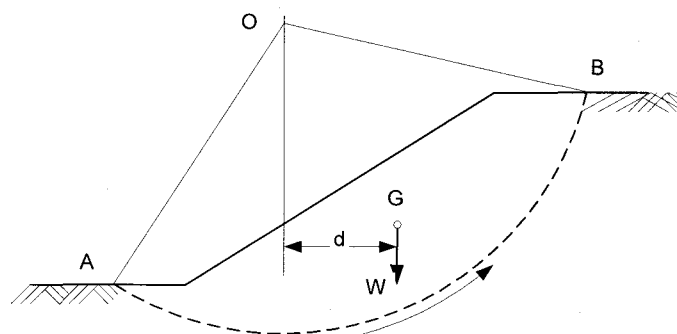
Untuk satuan tebal tanah, misalkan:

- W adalah berat tanah yang bekerja pada titik berat G
- d adalah jarak horizontal antara O dengan W
- τ adalah tahanan geser per satuan panjang bidang longsor

Dengan demikian maka,

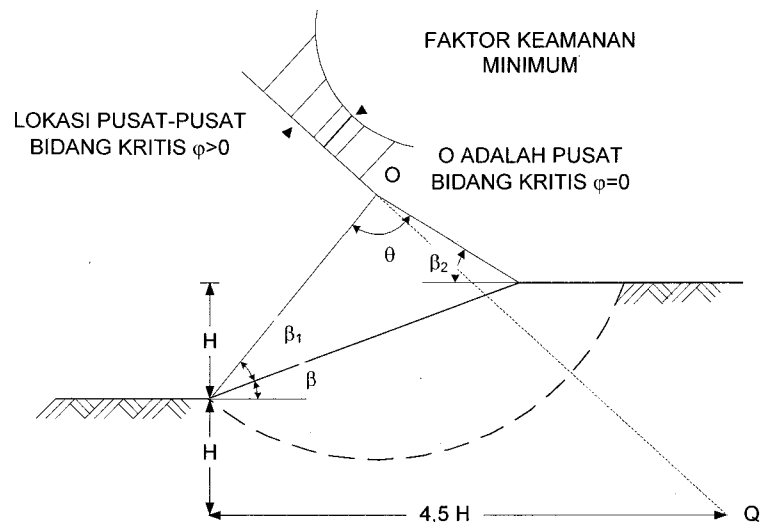
$$\text{Momen penggerak} = Wd \dots\dots\dots 20$$

$$\text{Momen penahan} = \tau \times r\theta \times r = \tau r^2\theta \dots\dots\dots 21$$



Gambar 4. Lereng dan bidang longsor

LERENG (V:H)	LOKASI TTK O		
	β	β_1	β_2
1:0,58	60	29	40
1:1	45	28	37
1:1,5	33,8	26	35
1:2	26,6	25	35
1:3	18,4	25	35
1:5	11,3	25	37



Gambar 5. Metoda Fellenius untuk menentukan bidang longsor kritis

Apabila longsor hampir terjadi, maka momen penggerak akan sama dengan momen penahan, yaitu:

$$Wd = \tau r^2 \theta \dots\dots\dots 22$$

Faktor keamanan terhadap terjadinya longsor dapat ditulis:

$$F = \frac{\text{Momen penahan}}{\text{Momen penggerak}} = \frac{r^2 \theta}{Wd} \dots\dots\dots 23$$

Karena bidang longsor yang harus dicoba-coba jumlahnya tidak terbatas, maka untuk mengurangi jumlah bidang longsor tersebut, Fellenius telah mengembangkan metoda untuk menentukan perkiraan lokasi titik pusat bidang longsor untuk berbagai kemiringan lereng. Metoda tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.

Untuk menentukan letak titik berat gaya W , yaitu titik G , terdapat dua cara yang dipandang sederhana. Cara yang pertama adalah dengan membagi sektor AB menjadi bidang-bidang kecil yang sejajar, baik horizontal ataupun vertikal, dan kemudian menentukan titik berat seluruh sektor berdasar momen masing-masing bidang kecil tersebut. Karena yang diperlukan hanya jarak dalam horizontal saja (d), maka penentuan momen cukup terhadap sumbu vertikal saja. Cara yang ke dua adalah dengan membuat sektor yang sebangun dengan sektor yang akan ditentukan titik beratnya. Sektor tiruan dapat dibuat dari kertas karton atau bahan lain. Dengan menggantung dua kali sektor buatan pada titik yang berbeda, maka titik berat sektor dapat diperoleh dengan memotongkan dua garis gantung (garis vertikal) yang melalui ke dua titik gantung.

2) Tanah yang mempunyai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ)

Analisis stabilitas lereng pada tanah jenis ini dikenal juga sebagai analisis “c- ϕ ”.

Untuk tanah bersudut geser ($\varphi > 0$), besarnya gaya geser pada bidang gelincir tergantung pada gaya normal yang bekerja pada bidang tersebut. Pada bidang gelincir yang berbentuk busur lingkaran, gaya normal pada bidang gelincir tidak mempunyai momen terhadap titik pusat bidang gelincir. Namun demikian, gaya normal tersebut tetap mempengaruhi besarnya gaya geser sepanjang bidang gelincir sehingga akan mempengaruhi momen penahan.

Analisis stabilitas lereng pada tanah yang mempunyai sudut geser umumnya dilakukan dengan metoda irisan (*method of silices*) dan sebagaimana halnya pada metoda " $\phi=0$ ", pada metoda irisanpun bidang longsor yang diperkirakan harus digambar. Selanjutnya tanah di atas busur AB dibagi-bagi dalam irisan vertikal dimana pada analisis ini, gaya yang bekerja antara irisan diabaikan. Selanjutnya, perhatikan gaya-gaya yang bekerja pada irisan abcd (lihat Gambar 6).

Apabila :

w = berat satu abcd

c = kohesi tanah

ϕ = sudut geser tanah

l = panjang busur cd

θ = sudut garis singgung pada busur cd

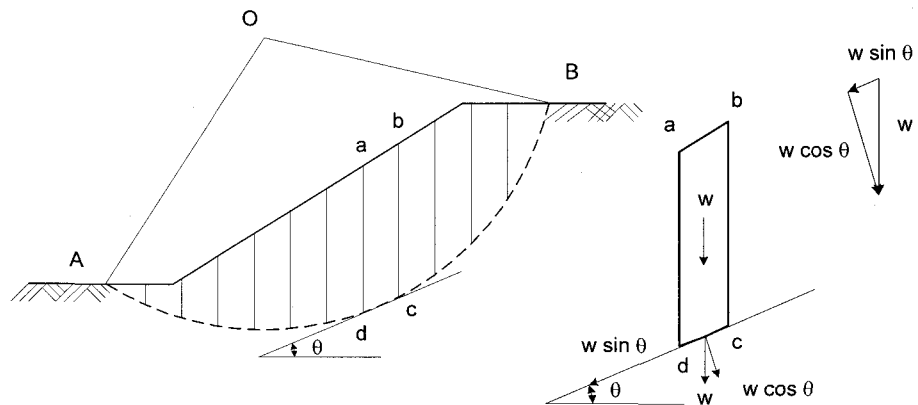
maka gaya yang bekerja pada dasar irisan abcd adalah:

$$\text{Gaya penggerak} = w \sin \theta \dots\dots\dots 24$$

$$\text{Gahan penahan} = cl + w \cos \theta \tan \phi \dots\dots\dots 25$$

Faktor keamanan untuk seluruh sektor dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F = \frac{\text{Gaya penahan total}}{\text{Gaya penggerak total}} = \frac{\Sigma(cl + w \cos \theta \tan \phi)}{\Sigma w \sin \theta} \dots\dots\dots 26$$



Gambar 6. Analisis "c- ϕ " dengan metoda irisan

Penentuan faktor keamanan akan lebih mudah apabila dilakukan dengan menggunakan tabel sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel penentuan faktor keamanan pada metoda irisan

NO. IRISAN	c	ϕ	w	l	θ	$w \sin \theta$	$cl + w \cos \theta \tan \phi$
1	c_1	ϕ_1	w_1	l_1	θ_1	$w_1 \sin \theta_1$	$c_1 l_1 + w_1 \cos \theta_1 \tan \phi_1$
2	c_2	ϕ_2	w_2	l_2	θ_2	$w_2 \sin \theta_2$	$c_2 l_2 + w_2 \cos \theta_2 \tan \phi_2$
3	c_3	ϕ_3	w_3	l_3	θ_3	$w_3 \sin \theta_3$	$c_3 l_3 + w_3 \cos \theta_3 \tan \phi_3$
...
n	c_n	ϕ_n	w_n	l_n	θ_n	$w_n \sin \theta_n$	$c_n l_n + w_n \cos \theta_n \tan \phi_n$
-	-	-	-	-	-	$\Sigma w \sin \theta$	$\Sigma (cl + w \cos \theta \tan \phi)$

Penentuan faktor keamanan dilakukan untuk beberapa bidang longsor dengan bantuan metoda Fellenius yang ditunjukkan pada Gambar 5. Dalam hal tersebut, titik pusat bidang

kritis terletak pada perpanjangan garis QO dimana Q terletak pada posisi H dan 4,5 H dari tumit lereng, sedangkan O ditetapkan dengan bantuan sudut β_1 dan β_2 .

Perlu diperhatikan bahwa metoda Fellenius dalam menetapkan bidang kritis didasarkan pada tanah yang homogen, kemiringan lereng yang seragam dan permukaan tanah di atas lereng yang datar. Untuk kemiringan lereng yang tidak seragam dan tanah yang beragam, lokasi pusat bidang kritis hanya dapat diperoleh dengan coba-coba. Namun demikian, untuk kasus yang umum, metoda Fellenius hanya menghasilkan kesalahan yang kecil. Oleh karena itu, untuk perhitungan kasar (perkiraan), metoda tersebut cukup memadai.

Metoda irisan sebagaimana yang diuraikan di atas sangat berguna untuk menentukan stabilitas lereng, terutama apabila kemiringan lereng tidak beraturan dan kondisi tanah sangat tidak seragam.

5.3.2.3. Retak tarik

Biasanya tanah di bagian atas bidang gelincir mengalami retak sebagai akibat adanya celah dalam (*deep fissures*) atau retak tarik. Menurut Terzaghi, kedalaman maksimum retak yang dapat terjadi dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$D = \frac{2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)}{\gamma_b} \dots\dots\dots 27$$

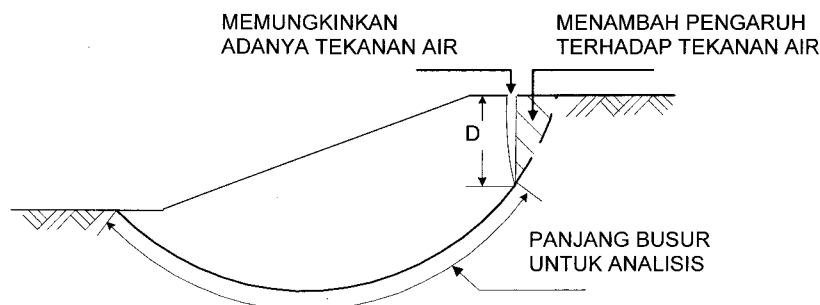
dimana :

- D = kedalaman retak tarik (ft)
- c = kohesi tanah (lb/ft²)
- ϕ = sudut geser tanah
- γ_b = berat isi tanah (lb/ft³)

Untuk tanah kohesif murni atau tanah mempunyai sudut geser sangat kecil, kedalaman retak dapat dinyatakan dengan persamaan,

$$D = \frac{2c}{\gamma_b} \dots\dots\dots 28$$

Dalam analisis stabilitas lereng, adanya retak tarik harus diperhitungkan (lihat Gambar 7). Hal tersebut dapat dilakukan dengan memperhatikan bidang gelincir yang menimbulkan momen penahan. Berat seluruh sektor digunakan untuk menghitung momen penggerak.



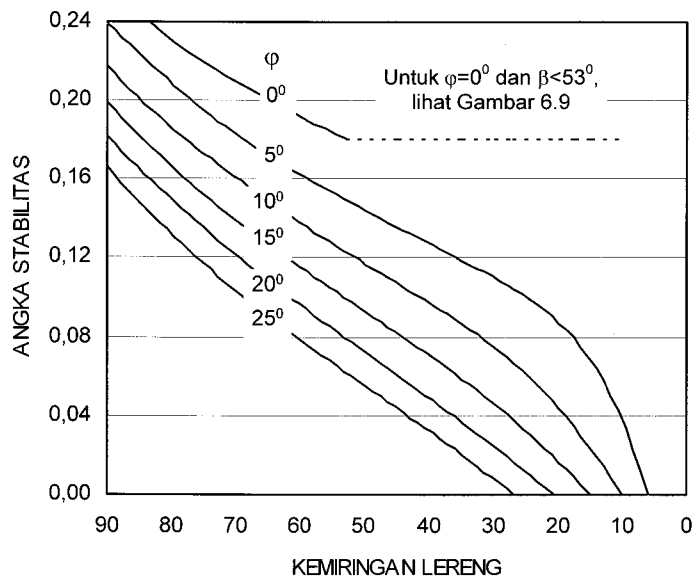
Gambar 7. Lereng dengan retak tarik

5.3.2.4. Analisis lereng dengan kemiringan seragam

D. W. Taylor telah melakukan pemecahan matematik terhadap persoalan stabilitas lereng yang mempunyai kemiringan seragam, dimana faktor keamanan untuk lereng tertentu ditentukan berdasarkan kohesi dan sudut geser tanah. Sebagai alternatif, apabila karakteristik tanah pada rencana galian atau timbunan diketahui, maka untuk faktor keamanan tertentu, sudut kemiringan lereng dapat ditentukan.

Perlu diperhatikan bahwa pemecahan Taylor (Gambar 8 dan 9) didasarkan pada kasus ideal yang jarang terjadi dalam praktek. Oleh karena itu, hasil pemecahan tersebut perlu ditafsirkan dengan hati-hati. Namun demikian, pemecahan Taylor sangat berguna untuk perhitungan kasar.

Pada Gambar 8 terlihat bahwa angka stabilitas yang ditunjukkan adalah untuk berbagai kemiringan lereng dan sudut geser (ϕ) tanah, kecuali untuk $\phi = 0$ serta kemiringan lereng lebih kecil dari 53 derajat. Pada kasus tersebut, bidang gelincir secara teoritis mempunyai jari-jari yang tak terhingga sehingga menghasilkan angka stabilitas yang konstan, yaitu sebesar 0,181.



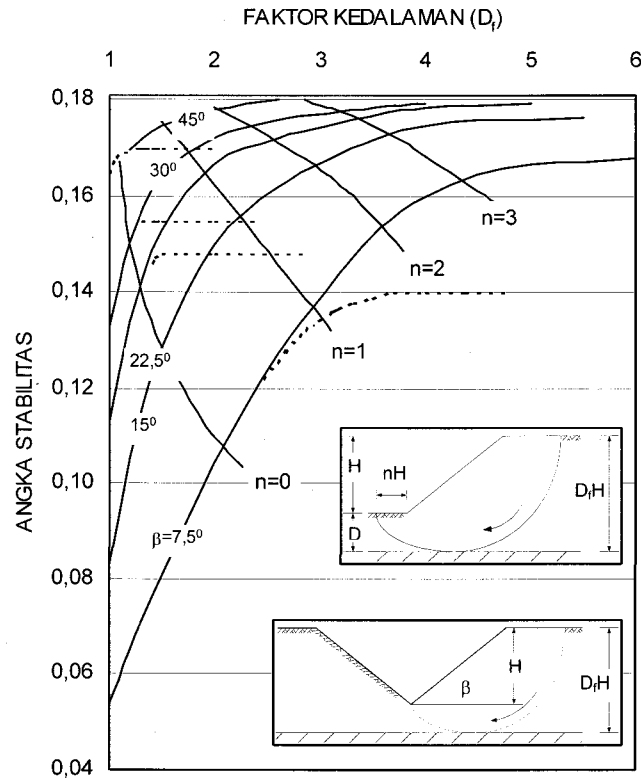
Gambar 8. Kurva Taylor untuk berbagai sudut geser (Sumber: TRRL, 1952)

Pemecahan atau kurva Taylor yang ditunjukkan pada Gambar 9 merupakan hubungan antara angka stabilitas (*stability number*) yang tidak berdimensi ($\frac{c}{F\gamma H}$) dengan sudut

kemiringan lereng (β) untuk berbagai nilai sudut geser (ϕ).

Parameter yang membentuk angka stabilitas adalah:

- c = kohesi (*apparent cohesion*) tanah;
- F = faktor keamanan
- γ = berat isi tanah;
- H = tinggi lereng.



Gambar 9. Kurva Taylor untuk $\phi = 0^\circ$ dan $\beta < 53^\circ$
(Sumber: TRRL, 1952)

Dalam menggunakan angka stabilitas, masing-masing parameter harus menggunakan satuan yang konsisten.

Dalam praktek, kedalaman bidang gelincir dipengaruhi oleh lapisan tanah yang lebih kuat sehingga bidang gelincir akan melewati bidang, di bawah atau di atas tumit lereng, tergantung pada kondisi lapangan.

Apabila bidang gelincir dipengaruhi oleh lapisan keras yang terletak pada kedalaman $D_t H$ (lihat Gambar 9), maka kurva yang digunakan adalah kurva "garis penuh". Apabila bidang gelincir dipengaruhi (*constrained*) untuk melalui tumit, maka kurva yang digunakan adalah kurva "garis putus-putus". Apabila lapisan keras terletak setaraf atau di atas dasar lereng, maka bidang gelincir akan memotong lereng di atas tumit. Pemecahan kasus tersebut dapat menggunakan kurva "garis putus-putus", sebagaimana halnya untuk kasus ke dua.

Pada contoh yang ditunjukkan di bawah akan terlihat bahwa faktor keamanan yang diperoleh dari angka stabilitas akan merujuk pada kohesi nyata (*apparent cohesion*). Untuk mendapatkan faktor keamanan F_T untuk tanah yang mempunyai kohesi dan sudut geser, maka nilai ϕ diganti dengan ϕ_D , dimana $\phi_D = \frac{\phi}{F_T}$.

□ Contoh 1

Misalkan galian sedalam 12 m (40 ft) dengan kemiringan lereng (β) 40° akan dilakukan pada lempung yang mempunyai $c = 0,366 \text{ kg/cm}^2$ (750 lb/ft^2), $\phi = 10^\circ$ dan $\gamma = 1,76 \text{ gr/cm}^3$ (110 lb/ft^3). Berapa faktor keamanan lereng galian dan berapa nilai kohesi yang baru agar diperoleh faktor keamanan sebenarnya yang sama?

Penyelesaian

Untuk $\phi = 10^\circ$ dan $\beta = 40^\circ$, dari Gambar 8 diperoleh,

$$\frac{c}{F\gamma H} = 0,098.$$

$$F = \frac{0,366}{0,00176 \times 1200 \times 0,098} = 1,74$$

$$\phi_D = \frac{\phi}{F_T} = \frac{10}{1,74} = 5,75^\circ$$

Untuk $\phi = 5,75^\circ$ dan $\beta = 40^\circ$, dari Gambar 5.8 diperoleh,

$$\frac{c}{F\gamma H} = 0,123$$

$$c = 0,123 \times 1,74 \times 0,00176 \times 1200 = 0,452 \text{ kg/cm}^2.$$

□ Contoh 2

Misalkan galian sedalam 7,5 m (25 ft) harus dilakukan pada lempung di mana nilai c setelah dikoreksi akibat retak tarik adalah $0,195 \text{ kg/cm}^2$ (400 lb/ft^2) serta $\phi = 7,5^\circ$ dan $\gamma = 1,92 \text{ gr/cm}^3$ (120 lb/ft^3). Berapa kemiringan lereng yang diijinkan apabila $F = 1,5$.

Penyelesaian

$$\phi_D = \frac{\phi}{F_T} = \frac{7,5}{1,5} = 5^\circ$$

$$\frac{c}{F\gamma H} = \frac{0,195}{1,5 \times 0,00192 \times 750} = 0,089$$

Untuk $\frac{c}{F\gamma H} = 0,089$ dan $\phi_D = 5^\circ$, dari Gambar 5.8 akan diperoleh $\beta = 20,3^\circ$

Dengan demikian, maka kemiringan lereng yang diijinkan adalah $20,3^\circ$ atau 1:2,7.

□ Contoh 3

Misalkan galian sedalam 9,5 m (45 ft) harus dilakukan pada lempung yang tebalnya 18 m (60 ft) dan di bawahnya terdapat lapisan batu pasir. Tahanan geser untuk seluruh lapisan lempung dianggap sama, yaitu $0,342 \text{ kg/cm}^2$ (700 lb/ft^2). Berat isi tanah adalah $1,60 \text{ gr/cm}^3$ (100 lb/ft^3). Berapa faktor keamanan lereng apabila kemiringannya 1:1? Berapa kemiringan lereng apabila faktor keamanan sama dengan 1,2?

Penyelesaian

$$\text{Faktor kedalaman lapisan keras } (D_f) = \frac{18}{13,5} = 1,33$$

Untuk $\beta = 45^\circ$ (kemiringan 1:1) dan $D_f = 1,33$ dari Gambar 5.9 akan diperoleh

$$\frac{c}{F\gamma H} = 0,171$$

$$F = \frac{0,342}{0,0016 \times 1350} = 0,92$$

Dari Gambar 9 diperoleh $n = 0,5$ (kira-kira). Dengan demikian, maka $nH = 0,5 \times 13,5 \text{ m} = 6,75 \text{ m}$.

Faktor yang lebih kecil dari satu menunjukkan bahwa galian dengan kemiringan lereng 1:1 adalah tidak stabil dan bidang gelincir akan memotong permukaan tanah pada jarak 6,75 m dari tumit lereng.

Dengan faktor keamanan sama dengan 1,2 akan diperoleh,

$$\frac{c}{F\gamma H} = \frac{0,342}{1,2 \times 0,0016 \times 1350} = 0,130$$

Untuk $D_f = 1,33$ dan $\frac{c}{F\gamma H} = 0,130$ diperoleh $\beta = 19^\circ$

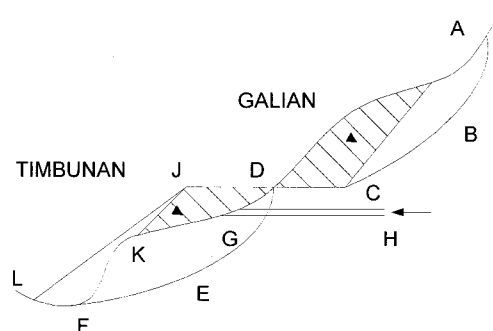
Dengan demikian, agar $F = 1,2$ maka lereng harus mempunyai sudut 19° atau kemiringan 1:2,7.

5.4. Disain potongan melintang jalan pada galian dan timbunan

Dalam arah melintang, pembangunan jalan di daerah perbukitan dan pegunungan sering kali harus dilakukan pada galian dan timbunan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10. Potongan melintang tersebut biasanya disebut sebagai seksi galian-timbunan. Apabila harus dilakukan pada daerah dimana kemiringan lereng alamnya kurang dari 1:5 (vertikal:horizontal), maka pembangunan seksi galian-timbunan biasanya tidak menjadi persoalan yang berarti.

Tiga persoalan yang harus diperhatikan pada pembangunan seksi galian-timbunan adalah:

- ① Tersumbatnya drainase alami (GH) oleh tanah timbunan.
- ② Bertambahnya beban pada bagian tanah yang tidak stabil (DEF) oleh tanah timbunan
- ③ Tergalinya bagian tanah yang tidak stabil (ABCD)



Gambar 10. Seksi galian-timbunan

Untuk menghindari perlunya penanganan khusus pada bagian atas dan bagian bawah jalan, mungkin akan lebih praktis apabila pada lokasi tersebut dilakukan penggalian atau penimbunan penuh. Namun demikian, untuk jalan yang terdiri atas beberapa jalur, pembangunan seksi galian-timbunan mungkin tidak bisa dihindari.

Karena pembangunan seksi galian-timbunan biasanya tidak unik bagi masing-masing lokasi, maka terdapat beberapa cara umum untuk mendapatkan lereng yang stabil, tiga diantaranya adalah:

- ① Memperkecil kemiringan lereng timbunan (JK) sehingga mencapai lereng alam yang berlawanan (L) atau daerah yang stabil.
- ② Sebelum penimbunan, memotong lereng alam bagian atas (DG) sehingga terbentuk tangga. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindarkan bidang yang lemah atau memperbesar masa tanah yang lebih stabil.
- ③ Membangun dinding penahan tanah, meskipun stabilitas tanah di bawah bangunan tersebut masih diragukan.

Disamping meningkatkan stabilitas, keuntungan lain yang diperoleh dari cara yang pertama adalah tersedianya lahan untuk pembuangan bahan galian. Namun demikian, sering kali dijumpai kesulitan untuk memperpanjang lereng dan membuat lereng bertangga.

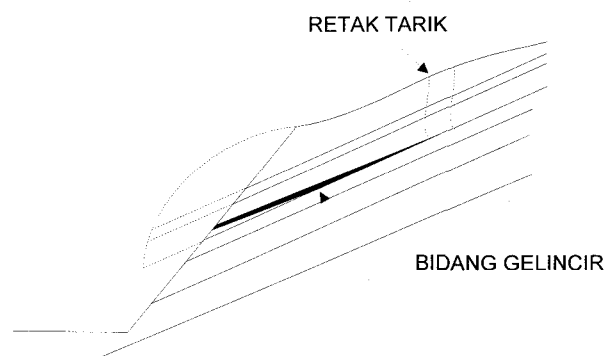
Pada kasus tertentu kadang-kadang diperlukan pembuatan timbunan kecil dengan lebar yang kurang dari 1,5 m dan tinggi 0,6-1,0 m. Pembuatan timbunan dengan kemiringan lereng yang standar akan mengakibatkan lereng menjadi panjang dan tipis, dan mungkin menjadi mahal. Oleh karena itu, pembuatan dinding penahan dari pasangan batu mungkin dipandang lebih praktis, meskipun tanah di bawah bangunan tersebut perlu mendapat perhatian. Dalam hal tersebut, gaya yang bekerja pada dinding penahan adalah kecil dan beban pada lereng di bagian bawah dinding penahan tidaklah besar, asalkan tinggi dinding penahan tidak lebih dari 1 m. Namun demikian, penggunaan dinding penahan tidaklah dianjurkan, apabila tanah di bagian bawah dinding penahan sangat tidak stabil.

5.5. Disain lereng pada galian batuan

5.5.1. Umum

Penggalan batuan dapat mengakibatkan longsor (*slides*) atau keguguran (*falls*). Kasus terakhir lebih sering dijumpai dan terdiri atas fenomena yang secara lebih konvensional dikenal dengan pelapukan. Longsor pada batuan dengan bidang gelincir berbentuk garis lengkung tidaklah biasa dan jarang terjadi pada galian yang tingginya kurang dari 30 m, karena kekuatan yang dimilikinya, sekalipun pada batuan yang lemah (terutama bila dibandingkan dengan kekuatan tanah).

Longsor pada batuan kemungkinan besar terjadi apabila lapisan batuan miring dan penggalan mengakibatkan terbukanya bidang gelincir (lihat Gambar 11).



Gambar 11. Longsor pada lapisan batuan yang miring

5.5.2. Teori disain

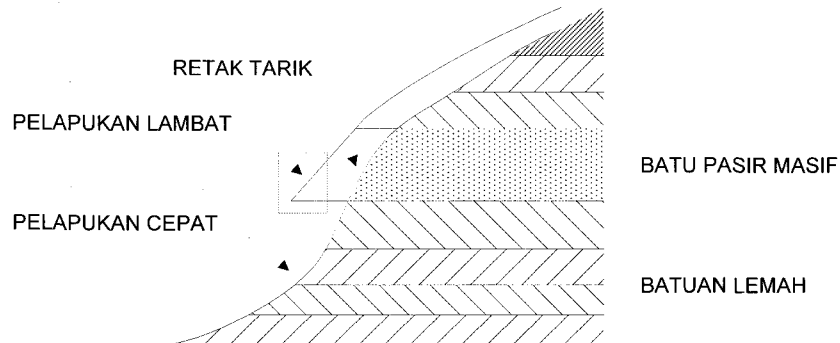
Disain lereng pada galian batuan menyangkut prinsip-prinsip yang normal, yaitu:

- ① Biaya pembangunan harus semimum mungkin.
- ② Biaya pemeliharaan untuk melindungi perkerasan dan keselamatan lalu-lintas harus semimum mungkin.
- ③ Pemecahan harus disesuaikan dengan karakteristik bahan yang dihadapi.

Praktek menunjukkan bahwa harga satuan pembangunan adalah sekitar seperempat sampai sepertiga harga satuan pemeliharaan.

Terdapat beberapa faktor yang mempersulit disain lereng pada batuan, karena lereng pada batuan tidak sebagaimana halnya dengan lereng pada tanah, dimana lereng pada tanah biasanya dapat ditetapkan dan dengan menanam tumbuhan tidak akan mengalami erosi

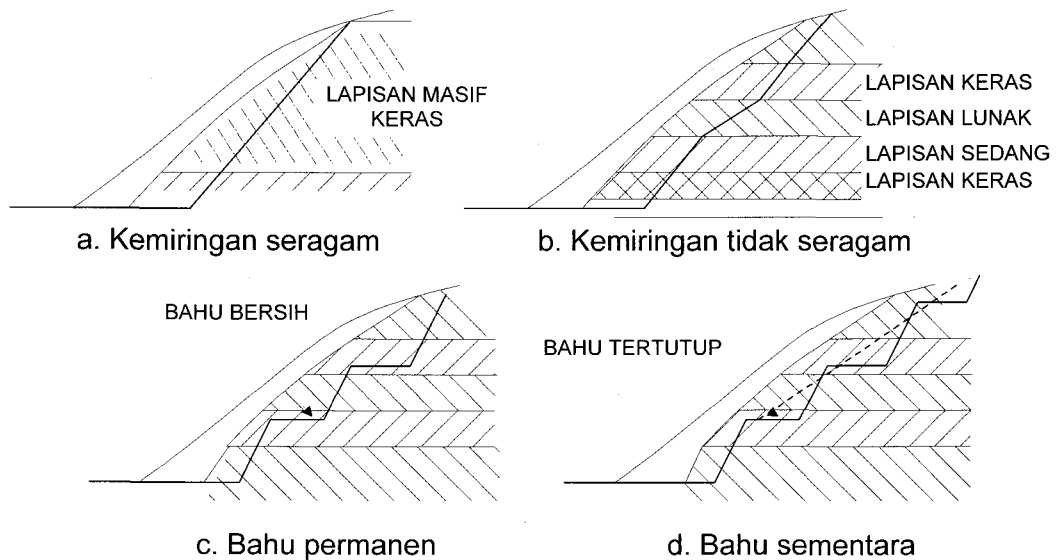
atau pelapukan. Kecuali untuk batuan yang sangat keras, bahan pada permukaan lereng akan terdisintegrasi dan tererosi atau berguguran. Peledakan akan memperluas daerah yang lemah, kecuali apabila dilakukan dengan sangat hati-hati. Beberapa karakteristik geologi, seperti patahan, dapat dimasukkan sebagai titik lemah pada batuan dan akan mengakibatkan bahan mudah bergerak. Apabila lapisan yang mudah mengalami pelapukan terletak di bawah lapisan yang lebih tahan lapuk, maka melalui pelapukan diferensial, lapisan atas akan menggantung sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pelapukan diferensial

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13, dewasa ini terdapat empat teori disain lereng pada batuan, yaitu:

- | | |
|----------------------------|------------------|
| ① Kemiringan seragam | ③ Bahu permanen |
| ② Kemiringan tidak seragam | ④ Bahu sementara |



Gambar 13. Teori disain lereng pada batuan

Teori yang dipandang paling bermanfaat untuk suatu lereng tertentu adalah fungsi dari karakteristik batuan serta kebijakan umum terhadap pertimbangan ekonomi dan keamanan.

Disain lereng sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 13a disarankan apabila batuan diperkirakan tidak akan mengalami pelapukan yang berarti dan batuan mempunyai lapisan yang relatif seragam.

Disain lereng dengan kemiringan yang berbeda sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13b dapat diterapkan apabila batuan diperkirakan akan mengalami pelapukan diferensial dan apabila tersedia informasi untuk menentukan kemiringan masing-masing lapisan. Disain

tersebut seyogyanya tidak diterapkan pada batuan yang mempunyai lapisan yang lemah atau mempunyai patahan.

Disain ke tiga dan ke empat merupakan cara untuk mencegah masuknya butiran batuan (puing-puing) masuk ke dalam saluran dan perkerasan. Disain pada Gambar 13c diterapkan apabila batuan diperkirakan akan mengalami pelapukan ringan, sedangkan disain pada Gambar 13d diterapkan dengan memperbesar kemiringan lereng galian sehingga pelapukan dapat segera terjadi. Dengan demikian maka hasil pelapukan akan menjadi penutup bagi lapisan di bawahnya dan selanjutnya akan mengurangi pelapukan lebih lanjut.

5.5.3. Bahan dan pengujian batuan

Sejauh ini tidak ada pengujian laboratorium atau lapangan untuk menentukan karakteristik pelapukan batuan yang dapat dipercaya. Klasifikasi secara visual dan perbandingan terhadap singkapan yang ada di sekitar batuan merupakan informasi yang paling baik. Untuk menentukan sifat-sifat pelapukan batuan diperlukan pengalaman dan kemampuan untuk menilai (*judgement*).

Apabila dijumpai batuan yang miring, maka kemungkinan terjadinya longsor pada bidang gelincir perlu mendapat perhatian. Dalam hal tersebut, pengalamanlah yang akan menjadi pedoman paling baik, meskipun pengujian kuat geser pada bidang gelincir dapat dilakukan.

5.5.4. Penyelidikan lapangan

Tujuan penyelidikan lapangan adalah untuk mendapatkan informasi mengenai sifat-sifat pelapukan batuan, kemungkinan terjadinya longsor serta kuantitas relatif batuan dan tanah.

Dengan demikian, data rinci masing-masing lapisan yang diperlukan adalah: tebal, jenis batuan, elevasi, kemiringan serta tebal lapis penutup. Keberadaan bagian-bagian yang lemah serta patahan juga perlu dicatat.

Penyelidikan hendaknya tidak terbatas pada daerah yang akan digali, tetapi juga harus mencakup bagian atas yang akan terpengaruh oleh penggalian. Pemboran mesin dapat menghasilkan data yang paling tepat; namun karena penyelidikan dengan cara tersebut mahal, maka pemboran tangan dan pengujian geofisika juga dapat digunakan. Pengamatan terhadap singkapan dapat memberikan informasi yang sangat berguna. Galian untuk jalan raya dan jalan kereta api, dasar sungai, drainase lereng, dan singkapan alami sering kali menjadi sumber informasi yang baik mengenai sifat-sifat pelapukan. Untuk penyusunan struktur dan stratigrafi batuan, hendaknya digunakan peta geologi.

Pada pembangunan jalan raya dengan banyak galian yang tersebar pada daerah yang luasnya beberapa kilometer persegi, pemboran mesin pada banyak titik sebagaimana yang diperlukan untuk mendapatkan data disain yang tepat biasanya tidak praktis. Disamping itu, keterbatasan dalam memperkirakan sifat-sifat pelapukan menetapkan suatu batasan praktis dalam penyelidikan bawah permukaan. Untuk disain fasilitas utama, sekurang-kurangnya satu lubang bor per galian dipandang sudah memadai, kecuali, (1) apabila singkapan yang baik dijumpai di daerah sekitar galian dan (2) apabila menyangkut galian yang sangat kecil.

5.5.5. Analisis disain

Disain lereng pada batuan memerlukan analisis dua jenis keruntuhan, yaitu keguguran (*falls*) dan longsor (*slides*). Tinjauan terhadap persoalan longsor diuraikan pada Butir 5.2, sedangkan butir ini hanya menyangkut uraian tentang keguguran yang terjadi akibat keruntuhan jenis tarik (*tension-type failures*) yang diikuti dengan jatuh bebas oleh pengaruh gaya gravitasi.

Penyelidikan lapangan dan pengujian contoh batuan harus menghasilkan dua informasi sebagai berikut:

- ① Ketahanan batuan terhadap pelapukan, dan
- ② Kemungkinan bahwa retakan (*discontinuities*) pada lapisan batuan akan mengakibatkan keguguran.

Pendekatan paling baik untuk mendapatkan informasi kuantitatif di atas adalah pengujian lapangan terhadap singkapan batuan, karena sejauh ini tidak ada teknik lain yang dapat dipercaya, terutama dalam kaitannya dengan keberadaan retakan. Apabila hasil penyelidikan lapangan menunjukkan kemungkinan wajar adanya kelemahan (*irregularities*), atau mungkin akan terjadi kelemahan sebagai akibat peledakan pada saat pelaksanaan, maka kondisi tersebut harus dianggap bahwa keguguran akan terjadi. Pada Tabel 3 ditunjukkan kemiringan rata-rata lereng untuk penggunaan umum, sedangkan kemiringan yang tepat harus didasarkan pada hasil penyelidikan yang seksama.

Tabel 3. Kemiringan rata-rata lereng pada galian batuan
(Sumber: Baker, 1960)

JENIS BATUAN	KEMIRINGAN (VERT. : HORIZ.)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Batuan beku <ul style="list-style-type: none"> • Granit, <i>trap</i>, <i>basalt</i>, dan lava ▪ Batuan sedimen <ul style="list-style-type: none"> • Batu pasir dan batu kapur masif • Batu pasir, <i>shales</i> dan batu kapur berselang-seling (<i>interbedded</i>) • Batu lempung dan batu lanau masif ▪ Batuan metamorf <ul style="list-style-type: none"> • <i>Gneiss</i>, <i>schist</i>, dan <i>marmer</i> • <i>Slate</i> 	<p>4:1 – 2:1</p> <p>4:1 – 2:1</p> <p>2:1 – 4:3</p> <p>4:3 – 1:1</p> <p>4:1 – 2:1</p> <p>2:1 – 4:3</p>

Kemiringan lereng ditetapkan setelah faktor pelapukan dan retakan dianalisis dengan seksama.

Pertanyaan pertama yang perlu dijawab adalah, kemiringan yang mana yang akan dipilih dari empat kelompok kemiringan (kemiringan seragam, kemiringan tidak seragam, bahu permanen dan bahu sementara). Apabila diperkirakan ada retakan, maka disain lereng dengan salah satu bentuk bahu dipandang pemecahan yang tepat, yaitu dalam rangka mencegah puing-puing yang mungkin berguguran. Apabila diperkirakan tidak ada retakan, maka pemilihan salah satu jenis disain merupakan fungsi dari:

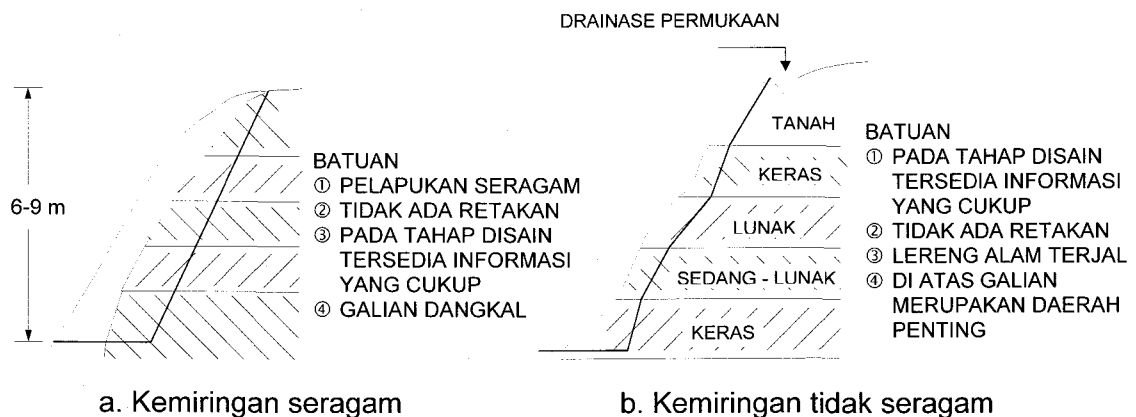
- ① Ketahanan batuan terhadap pelapukan
- ② Jumlah jenis dan elevasi formasi
- ③ Tinggi galian
- ④ Kebijakan ekonomi

Pada Gambar 14 ditunjukkan prinsip disain lereng pada batuan, dimana disain lereng dengan kemiringan seragam sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14a dianjurkan apabila:

- Tinggi vertikal galian kurang dari 6 sampai 9 m
- Batuan tidak mengandung retakan
- Menyangkut batuan yang tahan pelapukan
- Diperkirakan pelapukan batuan terjadi secara seragam

Untuk galian yang tingginya lebih dari 6 m, disain lereng dengan kemiringan seragam jarang dapat mencegah masuknya puing-puing ke dalam saluran atau perkerasan. Namun demikian, untuk batuan yang pelapukannya sangat seragam dan tidak mengandung retakan serta informasi untuk stratigrafi tersedia, maka disain lereng galian setinggi-tingginya 9 sampai

15 m dapat diterapkan. Disain lereng dengan ketinggian lebih dari 15 m biasanya jarang diterapkan.



Gambar 14. Prinsip disain lereng

Disain lereng dengan kemiringan tidak seragam merupakan modifikasi disain lereng dengan kemiringan seragam dimana masing-masing lapis batuan digali dengan kemiringan yang sesuai dengan kondisi batuan (lihat Gambar 14b). Namun demikian, karena tidak ada bahu pencegat, maka disain lereng dengan kemiringan tidak seragam tidak dianjurkan untuk batuan yang mengandung retakan. Hal tersebut dikarenakan puing-puing yang berjatuh akan masuk ke dalam saluran atau menimbulkan bahaya apabila masuk ke lajur perkerasan. Dalam rangka penerapan secara tepat teori kemiringan tidak seragam, diperlukan data akurat mengenai sifat-sifat pelapukan masing-masing lapis batuan. Pada daerah dimana lapisan batuan berselang-seling, misal batuan sedmen (atau kondisi geologi yang sama), data mengenai pelapukan masing-masing lapisan biasanya sulit diperoleh untuk keperluan disain jalan raya. Lebih jauh, apabila suatu lapisan mempunyai sifat yang tidak seragam, mungkin pada lapisan tersebut dapat dibuat lereng dengan kemiringan yang berbeda. Karena kompleksitas dalam pembangunan jalan raya, maka disain lereng dengan kemiringan tidak seragam mungkin tidak perlu sering diterapkan. Pada galian yang tinggi (lebih dari 30 m) dengan lereng alam yang terjal, tinjauan ekonomi akan menuntut penyelidikan yang lebih rinci serta penerapan disain lereng dengan kemiringan tidak seragam tanpa bahu. Untuk disain lereng dengan kemiringan tidak seragam yang tingginya lebih dari 9 sampai 15 m, pedoman umum pada Tabel 3 adalah kurang teliti.

Penerapan disain lereng dengan bahu disarankan untuk jalan raya, terutama bila dibangun pada endapan sedimen berlapis (*stratified sedimentary deposits*). Manfaat utama disain lereng dengan bahu adalah adanya perlindungan jalan dari puing-puing yang berjatuh. Secara umum, disain lereng dengan bahu hendaknya diterapkan apabila:

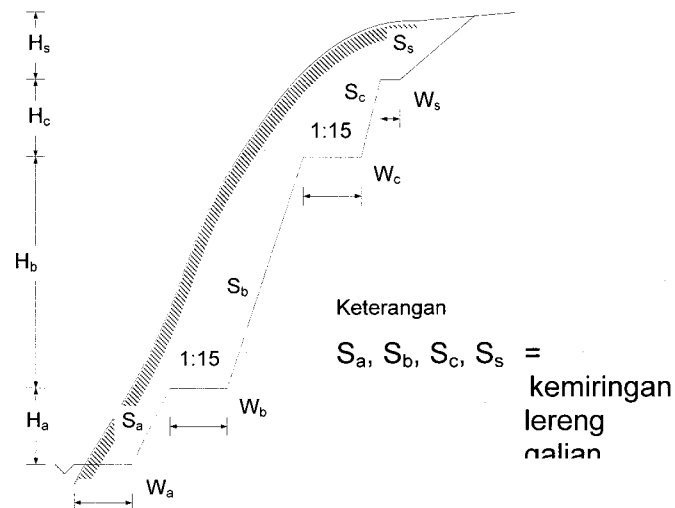
- ① Apabila pada lapisan batuan terdapat retakan
- ② Akibat udara dan air, pada batuan telah terjadi disintegrasi, atau
- ③ Kurang tersedianya informasi yang pasti mengenai jenis, tebal, elevasi dan sifat-sifat pelapukan batuan.

Pengambilan keputusan akhir terhadap penerapan disain lereng dengan bahu sangat tergantung pada pertimbangan ekonomi jangka panjang. Disain lereng dengan bahu biasanya akan memerlukan biaya pembangunan yang lebih besar, tetapi penghematan dalam biaya pemeliharaan dan manfaat yang dapat diperoleh sering kali melampaui tambahan biaya pembangunan.

Apabila disain lereng dengan bahu menjadi pilihan, terdapat tiga variabel yang perlu dipertimbangkan (lihat Gambar 15), yaitu:

- ① Lebar bahu

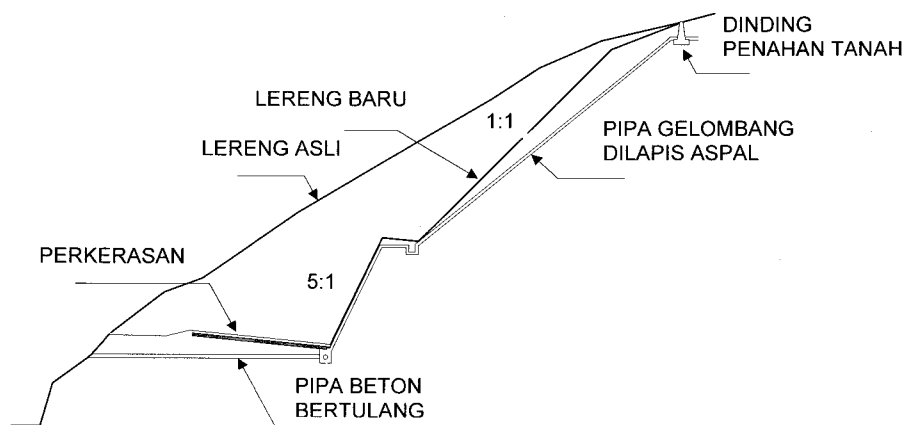
- ② Tinggi antara bahu
- ③ Kemiringan lereng antara bahu



Gambar 15. Prinsip disain lereng dengan bahu banyak

Untuk disain lereng dengan bahu permanen, variabel utama yang perlu diperhatikan adalah kemiringan lereng pada lapisan batuan yang cenderung mengalami pelapukan. Pada Gambar 16 ditunjukkan contoh disain lereng dengan bahu tunggal pada formasi batuan sedimen.

Meskipun disain lereng dengan banyak bahu dapat diterapkan, tetapi apabila data yang baik tentang sifat-sifat pelapukan tersedia, maka cukup dibuat satu bahu saja, yaitu untuk mencegah puing-puing yang berjatuhan. Bahu tersebut biasanya harus dibersihkan secara periodik sehingga letaknya harus pada elevasi yang relatif rendah. Namun demikian, apabila lapisan yang mengandung retakan terletak lebih dari 9 m dari bahu, maka disain lereng dengan satu bahu tidak dianjurkan. Disamping itu, juga diperlukan data yang lebih pasti daripada jenis umum yang dicantumkan pada Tabel 3.



Gambar 16. Contoh disain lereng pada galian batuan

Pada disain lereng dengan banyak bahu yang permanen, kemiringan lereng tetap merupakan variabel yang paling kritis. Zona yang mengandung retakan atau batuan tergali dimana data pelapukan kurang begitu pasti merupakan kondisi yang dipandang paling cocok untuk disain lereng dengan beberapa bahu. Penggunaan data umum mengenai pelapukan tidak dianjurkan apabila bahu bersih merupakan pilihan yang menentukan dalam disain

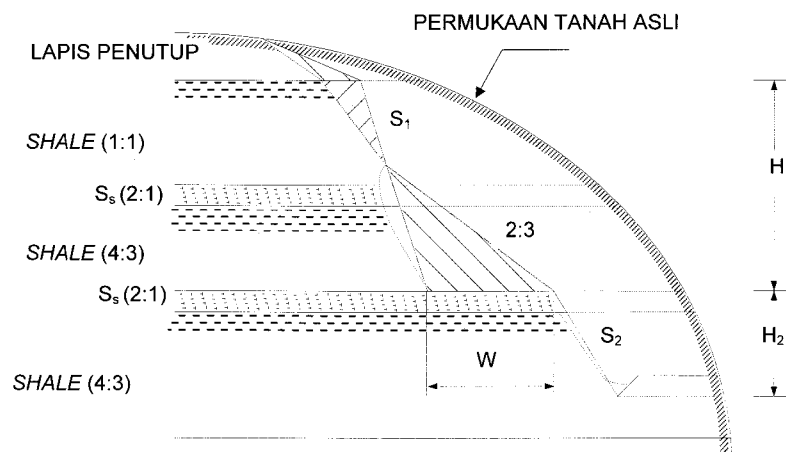
lereng. Namun demikian, pada Tabel 4 ditunjukkan tinggi dan lebar bahu yang disarankan, sebagai pedoman atau perbandingan.

Tabel 4. Variabel disain lereng dengan bahu banyak
(Sumber: Baker, 1960)

JENIS BATUAN	JARAK VERTIKAL BAHU (m)		LEBAR BAHU (m)		KEMIRINGAN (V:H)	
	H_a^*	$H_b', H_c', \text{dst.}$	W_a	$W_b', W_c', \text{dst.}$	S_a	$S_b', S_c', \text{dst.}$
① Galian utama pd <i>shale</i> diselang dgn batu pasir	1,5- 6,0	6- 9	0,0-9,0	6,0-10,5	2:1	4:1-2:1
② Galian utama pd batu pasir	3,0- 9,0	9-12	0,0-6,0	6,0- 9,0	4:1	4:1
③ Galian utama pd batu pasir yang terletak pd <i>shale</i>	3,0- 9,0	6-12	0,0-7,5	6,0-10,5	4:1	4:1-2:1
④ Galian moderat pd <i>shale</i> dan batu pasir	3,0-12,0	6-12	0,0-6,0	6,0- 9,0	2:1	4:1
⑤ Galian utama pd <i>shale</i>	3,0- 7,5	6- 9	0,0-9,0	6,0- 9,0	1:1	2:1-1:2

*Gunakan nilai minimum bila $W_a = 0$

Filosofi disain lereng dengan bahu sementara sangatlah berbeda dengan disain lereng dengan bahu permanen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 17. Pada teori disain lereng dengan bahu sementara, puing-puing batuan diperlukan untuk menutup sebagian lereng. Dengan demikian, bagian lereng yang tertutup tersebut akan terlindungi dari pengaruh udara dan air. Oleh karena itu, salah satu dari tiga variabel (lebar bahu, tinggi antara bahu dan kemiringan lereng) dapat divareasikan. Dalam hal tersebut, variabel yang menentukan adalah volume puing yang dapat ditampung oleh bahu, dengan anggapan bahwa sebagian bahu akan hilang sebagai akibat pelapukan. Dengan demikian, maka lereng galian akan lebih terjal daripada lereng setelah pelapukan. Manfaat dari disain lereng dengan bahu sementara adalah nilai ekonomi, dimana bagian lereng yang tertutup akan terlindungi dan tidak akan mengalami pelapukan untuk membentuk "lereng alaminya". Pada dasarnya disain lereng dengan bahu sementara dapat diterapkan pada semua kondisi dimana pendekatan disain lereng dengan bahu permanen memenuhi syarat. Disamping itu, apabila data mengenai retakan atau sifat-sifat pelapukan terbatas, disain lereng dengan bahu sementara menjadi lebih bebas (*flexible*).

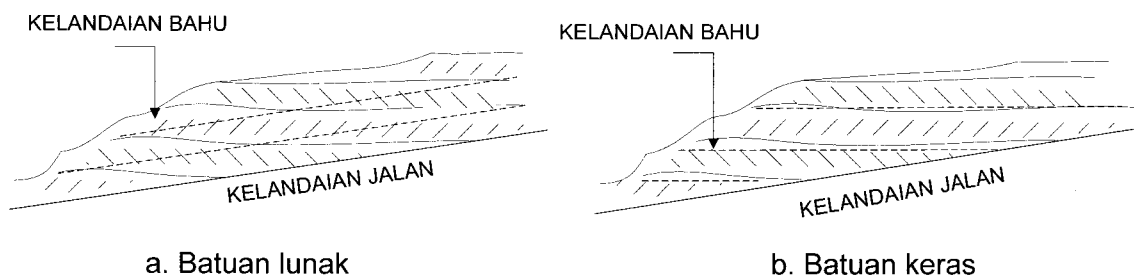


Gambar 17. Prinsip disain lereng dengan bahu sementara

Kelemahan utama disain lereng dengan bahu sementara adalah penampilan lereng pada satu atau dua tahun pertama setelah pembangunan. Dalam hal tersebut, ketidakrapihan lereng dapat menimbulkan kesan disain yang tidak seksama. Namun demikian, pendekatan disain dengan bahu sementara telah banyak diterapkan pada berbagai lokasi. Tinggi dan lebar bahu serta kemiringan lereng yang ditunjukkan pada Tabel 3 merupakan nilai-nilai yang

bersifat umum, sedangkan nilai-nilai yang tepat, apabila memungkinkan, seyogyanya didasarkan pada informasi yang lebih akurat.

Disain bahu memerlukan pertimbangan lain, yaitu kemiringan memanjang dan melintang, lebar minimum serta lokasi berdasarkan lapisan kuat atau lemah. Secara umum, kemiringan memanjang biasanya sejajar dengan permukaan perkerasan, baik karena alasan pelaksanaan ataupun estetika (lihat Gambar 18a). Namun demikian, kemiringan memanjang pada batuan keras dapat mengikuti kemiringan lapisan batuan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 18b. Lebar minimum bahu, sebagian merupakan fungsi jenis batuan yang digali. Apabila penggalian dilakukan pada batuan lunak sampai sedang, lebar minimum bahu hendaknya 6 m, terutama untuk lapisan tipis berlapis yang memerlukan penggalian dengan peledakan. Apabila fragmen batuan diperkirakan akan berguguran, maka bahu pertama di atas elevasi jalan harus cukup lebar (7,5 sampai 9,0 m). Lokasi bahu dengan mengacu pada lapisan lunak atau keras tidaklah begitu kritis, meskipun persoalan diferensial pelapukan (dan penggantungan yang terjadi kemudian) perlu dikendalikan. Secara umum, disain harus mencakup bahu pada bagian atas lapisan lemah yang terletak langsung pada di bawah lapisan yang keras.



Gambar 18. Kemiringan longitudinal bahu pada batuan

Untuk jalan yang didisain dengan standar yang tinggi, pada elevasi jalan seyogyanya dibuat bahu kecil dengan lebar 1,5 sampai 3 m, dengan tujuan untuk lebih memastikan tercegatnya puing-puing batuan hasil pelapukan. Apabila hal tersebut tidak dilakukan, maka lereng di atas bahu pertama sebaiknya dibuat lebih landai dan lebih pendek. Salah satu aspek lain yang lebih penting pada disain bahu adalah kemiringan melintang. Pendekatan konvensional yang diterapkan adalah memiringkan permukaan bahu ke arah lereng, yaitu dalam rangka menghindarkan erosi pada lereng di sebelah bawah bahu (lihat Gambar 16). Karena erosi pada sebagian besar batuan tidak merupakan persoalan yang lebih serius dibandingkan dengan persoalan akibat pelapukan, maka pencegahan puing-puing batuan pada bahu dipandang lebih penting. Pada disain lereng dengan bahu permanen, kemiringan melintang bahu tidak begitu penting, karena puing-puing batuan yang jatuh pada bahu dipandang sedikit atau tidak ada. Namun demikian, apabila puing-puing batuan berjatuh melalui lereng, maka puing-puing tersebut akan secara berkala menutup drainase bahu. Agar endapan yang terkumpul pada bahu stabil, maka air permukaan dan air bawah permukaan perlu dibuang. Pada kasus tersebut, cara paling baik untuk membuang air adalah memiringkan bahu ke arah jalan. Pembuangan air secepatnya menjadi lebih kritis apabila endapan terdiri atas hasil pelapukan serpih (*shale*), karena lempung hasil pelapukan serpih mempunyai permeabilitas yang rendah sehingga dalam keadaan jenuh sangat tidak stabil. Kemiringan melintang bahu dapat sangat kecil (1:15). Stabilitas endapan pada bahu (lihat Gambar 16) tidak terpengaruh oleh kemiringan melintang bahu yang mengarah ke jalan, karena tahanan geser endapan pada bidang pertemuan dengan permukaan bahu kira-kira sama dengan tahanan geser pada bidang yang terdapat dalam endapan. Oleh karena itu, disarankan agar permukaan bahu dimiringkan, kecuali apabila:

- ① Endapan pada bahu terdiri atas bahan granular yang mudah mengalirkan air.
- ② Tidak akan ada endapan pada bahu, atau
- ③ Lereng di bawah bahu sangat rentan terhadap erosi.

Pada disain lereng dengan bahu sementara, tinggi dan kemiringan lereng antara bahu dapat mengacu pada ketentuan umum. Pada dasarnya, nilai kedua faktor tersebut tergantung pada volume endapan yang diijinkan atau yang diperhitungkan untuk ditampung oleh bahu. Pada gambar 14, apabila lereng (S_b , S_c) dibuat lebih datar dalam rangka mengurangi volume puing-puing sampai tingkat yang minimum, maka tingi antar bahu (H_b, H_c) dapat diperbesar. Di sisi lain, keberadaan lapisan masif yang mengandung retakan akan cenderung mengurangi tinggi antar bahu, yaitu dalam rangka menghindari kemungkinan jatuhnya batu-batu besar ke jalan. Pada disain lereng dengan bahu sementara, lereng (S_b , S_c) dapat lebih terjal (4:1) dengan perkiraan bahwa batuan akan melapuk secara cepat. Pada kasus tersebut, tinggi antara bahu (H_b , H_c) dapat dibuat minimum. Lereng paling bawah (S_a) sangatlah kritis, karena puing-puing batuan yang jatuh dari lereng tidak boleh menutup drainase jalan. Bahu paling bawah (W_a) yang terletak pada elevasi jalan tidak perlu dibuat lebar (akan memperbesar volume penggalian). Oleh karena itu, bahu tersebut disarankan untuk dibuat cukup sempit, lereng (S_a) yang tidak tinggi dan lebih datar.

Faktor penting yang sampai tingkat tertentu akan menentukan disain lereng pada batuan adalah tinggi total galian. Secara umum, disain lereng yang tingginya kurang dari 15 m dapat menerapkan pendekatan konservatif tanpa perlu khawatir memperbesar biaya pembangunan. Namun demikian, dalam hal tersebut jarang memerlukan bahu yang lebih dari satu buah, kecuali apabila penggalian dilakukan pada serpih yang sangat lemah atau batu lempung masif yang lunak, maka dua bahu dipandang memadai. Pada galian yang tingginya 15 sampai 30 m, maka tinggi antar bahu, lebar bahu dan kemiringan lereng galian dapat dibuat agak konservatif tanpa perlu khawatir akan memperbesar volume galian. Untuk penggalian yang tingginya lebih dari 30 m, disainnya menjadi lebih sulit. Pada kondisi tersebut umumnya akan sulit untuk mendapatkan informasi rinci mengenai setiap lapisan. Lebih jauh lagi, akan dihadapi bahaya yang lebih besar akibat guguran batuan. Apabila pada disain lereng dengan bahu yang banyak digunakan nilai yang konservatif, maka biaya pembangunan dapat sangat meningkat. Karena penggalian lereng yang tingginya lebih dari 30 m jarang dijumpai, maka untuk disain lereng tersebut sebaiknya dilakukan oleh tenaga yang benar-benar ahli dan telah berpengalaman.

Keberadaan lapisan masif yang tebalnya lebih dari 7,5 m cenderung menyederhanakan disain, karena kemiringan lereng dimana pelapukan akan terjadi lebih mudah untuk diperkirakan. Apabila lapisan masif terdiri atas batuan keras, maka dapat dipilih lebar bahu, tinggi antar bahu dan kemiringan lereng yang nilainya minimum. Sebaliknya, lapisan masif yang terdiri atas batuan lunak akan memerlukan tinggi antar bahu yang nilainya minimum, lebar bahu yang lebih besar serta kemiringan lereng yang lebih landai, meskipun pada disain lereng dengan bahu sementara. Keberadaan lapisan masif kadang-kadang menentukan lokasi bahu. Umumnya, pemotongan lapisan masif yang keras merupakan praktek yang tidak benar, apabila di bawah lapisan tersebut terdapat lapisan lunak yang mudah melapuk, lebih-lebih apabila lapisan masif mengandung retakan.

Pengurangan pelapukan pada batuan sedimen telah dicoba dengan membuat drainase horizontal. Pada batuan berlapis, terjadinya permeabilitas diferensial bukanlah hal yang tidak biasa dan pembuangan air bawah permukaan dapat mengurangi pengaruh terhadap erosi, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 10. Meskipun pembuatan drainase horizontal pada formasi batuan umumnya tidak ekonomis, namun untuk galian yang sangat tinggi pada batuan yang relatif lemah atau batuan dengan lapisan yang miring, pemasangan drainase horizontal dapat secara efektif meningkatkan tahanan geser.

5.6. Penanggulangan longsor pada tanah lempung

Terdapat beberapa cara untuk meningkatkan stabilitas lereng pada lempung atau menstabilkan lereng yang sudah longsor.

Lereng yang terbentuk pada lempung yang mempunyai rekahan (*highly fissured clays*) sering kali cenderung tidak stabil sebagai akibat masuknya air permukaan atau air sisipan ke dalam rekahan sehingga memperlemah lempung.

Retak tarik pada khususnya dapat menjadi perangkap bagi air permukaan dan selanjutnya air memasuki bidang gelincir potensial. Untuk mencegah masuknya air ke bidang gelincir potensial, di sepanjang bagian atas lereng sering dibuat drainase pencegat dan kemudian air yang tertangkap disalurkan ke drainase penampung. Saluran pencegat dapat dibuat dengan pola tulang ikan, sedangkan drainase penampung umumnya terdiri atas saluran yang dibuat pada interval jarak sekitar 0,5 sampai 1,5 m dengan kedalaman yang sejauh mungkin mencapai bidang gelincir potensial dan kemudian diisi dengan kerikil atau bahan lain yang porous. Drainase tulang ikan biasanya mempunyai kedalaman sekitar 0,5 m dan dalam banyak kasus tidak dilengkapi dengan pipa, meskipun untuk drainase paling bawah, pemasangan pipa tersebut akan lebih baik.

Disamping sebagai penampung dan penyalur air, drainase penampung juga mempunyai fungsi sebagai dinding penahan untuk lebih menstabilkan lereng.

Faktor keamanan lereng yang tidak stabil dapat dinaikkan dengan cara membuat timbunan tanah atau batuan di sepanjang tumit lereng. Pembuangan tanah di bagian atas lereng, sehingga lereng membentuk tangga, atau memperkecil kemiringan lereng juga dapat meningkatkan stabilitas lereng.

Pemasangan tiang pancang pada lokasi dekat tumit akan memaksa bidang gelincir potensial bergeser ke posisi yang lebih dalam sehingga lereng mempunyai faktor keamanan yang umumnya lebih besar. Cara ini dipandang lebih mahal dari cara lain. Oleh karena itu, aspek biaya harus selalu menjadi pertimbangan sebelum cara penanggulangan ditetapkan.

Tumbuhan jenis tertentu dapat meningkatkan stabilitas lereng. Disamping dapat menyerap air (sehingga meningkatkan tahanan geser tanah), akar-akar tumbuhan dapat berfungsi sebagai tulangan bagi tanah. Meskipun tumbuhan yang cepat membesar sangat berguna dalam mengurangi kandungan air, namun lokasi penanamannya perlu diperhatikan. Penyerapan air oleh tumbuhan yang ditanam pada lokasi yang tidak tepat akan mengakibatkan penurunan pada tanah dasar. Karena alasan tersebut, maka tumbuhan yang cepat membesar sebaiknya tidak ditanam pada daerah sekitar 15 m dari badan jalan. Disamping itu, tumbuhan dapat berfungsi juga sebagai penutup permukaan tanah sehingga dapat mengurangi erosi.

5.7. Penggalian (*excavation*)

5.7.1. Klasifikasi penggalian

Penggalian tanah yang memerlukan peledakan, misal terhadap batuan padat (*solid rock*), umumnya jauh lebih sulit daripada penggalian tanah. Kenyataan ini dengan sendirinya akan meningkatkan biaya penggalian.

Karena alasan di atas, maka berdasarkan jenis tanah, penggalian dibagi menjadi dua kelompok yang masing-masing biasa disebut "penggalian batuan" (*"rock excavation"*) dan penggalian biasa (*"common excavation"*); mungkin juga ditambahkan "penggalian lumpur".

Dalam praktek, definisi masing-masing istilah tersebut mungkin tidak sama antara satu proyek dengan proyek yang lain. Contoh definisi kedua istilah ditunjukkan di bawah.

Penggalian batuan adalah penggalian, penyingkiran dan pembuangan semua bongkah yang mempunyai volume 1 m³ atau lebih, serta semua batuan keras yang dapat digali hanya dengan peledakan; sedangkan penggalian biasa adalah penggalian yang tidak termasuk pada penggalian batuan.

Definisi di atas memiliki kelemahan, karena kadang-kadang tanah yang digali berada pada batas yang didefinisikan. Salah satu cara untuk mengatasi persoalan tersebut adalah melalui penambahan istilah "penggalian tidak berkelas" (*"unclassified excavation"*), yang mengandung arti penggalian semua jenis bahan, terlepas dari wujudnya (*nature*).

Penggalian dapat diklasifikasikan juga menurut tujuannya, meskipun antara satu proyek dengan proyek yang lain tidak perlu sama (termasuk lingkup pekerjaannya). Berdasarkan tujuan tersebut, penggalian dapat dikelompokkan menjadi jenis-jenis sebagai berikut:

- ① Pengupasan (*stripping*) atau pembersihan lapangan (*clearing and grubbing*).
- ② Penggalian untuk jalan (*road excavation*).
- ③ Penggalian untuk drainase (*drainage excavation*).
- ④ Penggalian untuk struktur (*structure excavation*).
- ⑤ Penggalian untuk terowongan (*tunnel excavation*).
- ⑥ Penggalian untuk pondasi dalam (*footing excavation*).
- ⑦ Penggalian di sumber bahan (*borrow excavation*).

5.7.2. Pembersihan lapangan (*clearing dan grubbing*)

5.7.2.1. Umum

Secara umum, pembersihan lapangan merupakan pekerjaan untuk membuang bahan-bahan yang akan melapuk, baik dari lahan yang akan dibangun jalan maupun dari lahan dimana tanahnya akan digunakan sebagai bahan timbunan. Apabila bahan-bahan tersebut tidak dibuang, maka pelapukan yang terjadi akan menimbulkan rongga pada tanah yang sudah selesai dikerjakan dan selanjutnya kemungkinan akan menimbulkan penurunan.

Meskipun pembersihan lapangan biasanya merupakan tahap awal pekerjaan tanah yang dapat berdiri sendiri, namun pada pedoman ini, pembersihan lapangan dimasukkan sebagai bagian dari pekerjaan timbunan.

5.7.2.2. Pembersihan lapangan di luar kota

Pada pembangunan jalan di luar kota, pembersihan lapangan kadang-kadang hanya mencakup pembuangan rumput, semak dan pohon-pohon kecil; sedangkan pada situasi yang lain, pembersihan lapangan dapat mencakup juga penebangan dan pembuangan pohon besar (termasuk akar-akarnya) serta pembuangan bahan lain yang mengganggu (*debris*).

Pada daerah hutan lebat, pembersihan lapangan mengandung resiko yang besar, antara lain kemungkinan terjadinya kebakaran. Untuk menghindari hal tersebut, pembersihan lapangan harus dilakukan dengan hati-hati, terutama apabila ada bagian pekerjaan dengan cara pembakaran. Dalam hal tersebut, kontraktor harus menyediakan tenaga dan peralatan pemadam kebakaran. Apabila pohon akan dimanfaatkan sebagai bahan bangunan, maka ketentuan pada pekerjaan pembersihan lapangan biasanya menetapkan bahwa batang-batang pohon harus dipotong sesuai dengan ukuran standar perdagangan dan kemudian ditimbun ditempat yang ditetapkan. Atas dasar kepedulian terhadap lingkungan,

penghilangan sisa-sisa tumbuhan dengan cara membakar mungkin dapat dilarang, kecuali apabila dilakukan dengan cara waktu khusus yang dapat menghilangkan asap.

Pembersihan lapangan yang kemungkinan dapat memperpanjang masa pembangunan jalan; contoh, apabila pembakaran hanya boleh dilakukan pada waktu-waktu tertentu saja, maka kemajuan seluruh pekerjaan akan terhambat pembersihan lapangan. Untuk mengatasi hal tersebut, pembersihan lapangan dapat diperlakukan dengan kontrak khusus, misal sebagai pekerjaan pada musim hujan.

Untuk menghindarkan timbulnya perselisihan dalam penerimaan dan penolakan serta pembayaran, spesifikasi pembersihan lapangan harus menentukan secara tegas hal-hal yang berkaitan dengan kegiatan yang harus dilakukan serta produknya, baik batasan mutunya maupun ukurannya (volume).

Contoh spesifikasi pembersihan lapangan adalah, pembersihan lapangan di daerah galian harus mencakup pembuangan akar dan tunggul pohon dari lapisan tanah yang mempunyai tebal sekurang-kurangnya 34 cm bila diukur dari permukaan akhir galian. Hal tersebut berlaku juga untuk timbunan yang tingginya kurang dari 1 m. Pada daerah timbunan yang tingginya lebih dari 1 m; akar dan sisa-sisa lain pohon dapat dibiarkan tetap berada pada tanah asli; asalkan tingginya tidak lebih dari 30 cm. Secara lebih lengkap, contoh ketentuan dalam spesifikasi pembersihan lapangan diuraikan pada Butir 5.7.2.5.

5.7.2.3. Pembersihan lapangan di perkotaan

Pembersihan lapangan di perkotaan dapat mencakup berbagai aspek yang rumit. Menjelang pembersihan lapangan dimulai, pemukiman kembali penduduk dan pemindahan pusat-pusat kegiatan yang berada di lokasi proyek harus sudah selesai. Demikian juga, rencana pemindahan utilitas harus disusun secara rinci dan cermat, agar selama pelaksanaan pemindahannya, utilitas tersebut tetap berfungsi. Dalam hal tersebut, gedung, perkerasan, lajur pejalan kaki dan bangunan lain harus dipindahkan; utilitas yang terletak di atas jalur jalan, misal kabel listrik dan kabel telepon yang melintang atau sejajar jalur jalan mungkin perlu digeser.

Pada pembangunan jalan di bawah permukaan tanah, pembersihan lapangan menjadi lebih rumit, dimana penempatan kembali utilitas tidak hanya mencakup utilitas yang terletak di atas permukaan jalur jalan, tetapi juga utilitas yang terletak di dalam tanah, misal, pipa air dan gas, kabel telepon, saluran drainase.

Agar pembersihan lapangan dapat berjalan lancar, maka penjalinan hubungan dan koordinasi dengan pihak-pihak yang terkait tidak bisa ditawar lagi. Untuk keperluan tersebut dibentuk organisasi khusus yang terdiri atas instansi-instansi yang terkait.

5.7.2.4. Peralatan

Jenis peralatan yang dapat digunakan untuk pembersihan lapangan tergantung pada jenis bahan yang dibersihkan; beberapa diantaranya adalah sebagai berikut:

- Rantai yang ditarik dua buah traktor - digunakan untuk membuang semak dan pohon-pohon kecil.
- *Backhoe* - digunakan untuk mengupas tanah penutup pada daerah terbatas (*confined areas*) atau membongkar akar-akar pohon.
- *Rooters* - digunakan untuk membongkar akar-akar pohon.
- Bahan peledak - digunakan untuk membongkar akar-akar pohon.
- *Scraper* - untuk mengupas, mengangkat dan menumpahkan tanah penutup.
- *Gergaji* - digunakan untuk menebang pohon.

- Doser (tanpa atau dengan garu) - digunakan untuk memecah pasangan batu atau beton dan mendorongnya ke tempat penimbunan.
- *Backhoe* (beberapa buah mungkin dilengkapi dengan cakar atau palu tumbuk) - digunakan untuk menghancurkan bangunan dan perkerasan dan memuat ke alat pengangkut.
- Truk - digunakan untuk mengangkut bahan hasil pembersihan.

5.7.2.5. Contoh spesifikasi

Spesifikasi yang diuraikan di bawah ini hanyalah merupakan ilustrasi saja. Spesifikasi yang diterapkan pada suatu proyek harus menurut dokumen yang diberikan oleh pemilik pekerjaan.

1) Deskripsi

Pembersihan lapangan harus mencakup pengupasan tanah penutup, pemotongan dan pembongkaran pohon, pembongkaran batuan dan bangunan serta pembuangan dan penimbunan bahan-bahan hasil pembersihan lapangan di tempat yang sudah ditentukan; kecuali benda-benda yang harus dibiarkan tetap di tempatnya atau yang harus disingkirkan menurut seksi lain. Pekerjaan ini harus mencakup pula pencegahan kerusakan dan penodaan pohon-pohon dan benda-benda lain yang harus dibiarkan tetap di tempatnya.

2) Persyaratan

- a) Pengawas Pekerjaan akan menetapkan batasan pekerjaan serta pohon-pohon dan benda-benda lain yang harus dibiarkan tetap di tempatnya.
- b) Kontraktor harus menjaga pohon-pohon dan benda lain yang harus tetap di tempatnya. Pemberian tanda pohon-pohon yang tidak boleh ditebang harus dilakukan dengan menggunakan cat atau bahan lain yang tidak merusak pohon.
- c) Semua benda yang terdapat di permukaan serta semua pohon, tunggul, semak dan benda-benda lain yang menonjol di atas permukaan, yang ditetapkan tidak boleh ada di tempatnya, harus dikupas, dipotong dan/atau dibongkar, kecuali yang ditetapkan sebagai berikut:
 - (1) Tunggul dan akar serta benda-benda lain (yang tidak akan musnah) yang terletak sekurang-kurangnya 1 m di bawah permukaan tanah dasar atau timbunan tidak perlu dibongkar.
 - (2) Pada daerah di luar daerah galian dan timbunan yang akan diratakan (*grading*), tunggul dan benda lain yang tidak akan musnah harus dipotong sehingga sisa potongannya tidak menonjol lebih dari 15 cm di atas permukaan tanah yang ada atau permukaan air terendah.
 - (3) Pada daerah di puncak-puncak galian yang akan dibentuk bulat (*rounded*), semua tunggul harus dipotong habis sehingga bagian atasnya rata atau di bawah permukaan akhir lereng.
- d) Kecuali pada daerah yang akan digali; semua lubang akibat pembongkaran tunggul atau benda lain harus ditimbun dengan bahan yang memenuhi persyaratan serta dipadatkan sesuai dengan ketentuan pemadatan.
- e) Apabila pemusnahan bahan dilakukan dengan cara membakar, maka pembakaran harus selalu diawasi oleh tenaga kompeten dan harus sedemikian rupa sehingga tumbuhan, barang milik atau benda lain yang harus dibiarkan tetap di tempatnya dijamin tidak terkena bahaya atau terganggu. Apabila diijinkan, pembakaran harus dilakukan sesuai dengan peraturan dan perundang-undangan yang berlaku.
- f) Selama pembakaran, kontraktor harus menggunakan peralatan dan perlengkapan intensitas tinggi (antara lain, alat pembakaran; cerobong yang tinggi atau terowongan dan parit yang dilengkapi dengan alat untuk menambahkan udara), agar pembakaran berlangsung cepat dengan sedikit atau tanpa asap. Pada akhir setiap

masa pembakaran harus dipastikan bahwa api benar-benar padam sehingga tidak ada sedikitpun benda yang masih membara.

- g) Apabila karena alasan cuaca yang membahayakan; Pengawas Pekerjaan memerintahkan kontraktor untuk tidak memulai atau menanggguhkan pembakaran, maka bahan yang akan dibakar yang dipandang akan mengganggu pekerjaan lain harus ditempatkan oleh kontraktor di tempat penampungan sementara yang ditentukan oleh Pengawas Pekerjaan. Setelah diperintahkan oleh Pengawas Pekerjaan, bahan yang akan dibakar kemudian dipindahkan ke tempat yang ditentukan dan selanjutnya dibakar.
- h) Bahan yang tidak dapat dibakar serta bahan yang dapat musnah dapat dibuang dengan metoda dan ke tempat yang ditentukan oleh Pengawas Pekerjaan, baik di dalam maupun di luar proyek. Apabila dikubur di daerah proyek, bahan buangan harus ditimbunkan dalam lapisan-lapisan. Setiap lapisan harus ditutup atau dicampur dengan tanah sehingga tidak mengandung rongga. Lapisan teratas bahan buangan harus ditutup dengan sekurang-kurangnya 30 cm lapisan tanah atau baban lain serta kemudian diratakan, dibentuk dan dipadatkan sehingga mempunyai tampilan yang baik. Apabila lahan pembuangan terletak di luar proyek, maka kontraktor harus melakukan kesepakatan tertulis bersama-sama dengan pemilik atau penguasa lahan. Biaya pembuangan tersebut harus tercakup dalam biaya penawaran. Salinan kesepakatan harus diserahkan kepada Pengawas Pekerjaan. Lahan pembuangan harus disuburkan dan ditanami rumput, sesuai dengan ketentuan pada pembentukan tanah berumput.
- i) Sisa-sisa batang pohon dapat dibuang dalam bentuk serbuk. Serbuk kayu dapat digunakan sebagai pupuk atau pengendali erosi pada lereng atau dapat disebar pada lahan yang ditentukan oleh Pengawas Pekerjaan.
- j) Dahan rendah dan lapuk atau mengganggu pandangan yang terdapat pada pohon yang harus dibiarkan tetap di tempatnya harus dipangkas sesuai dengan yang diperintahkan oleh Pengawas Pekerjaan. Dahan pohon harus dipangkas sehingga ketinggiannya dari permukaan tanah dasar tidak kurang dari 6,10 m. Seluruh pemangkasan harus dilakukan oleh tenaga ahli.
- k) Pohon yang ditebang secara sendiri-sendiri harus dipotong serata mungkin dengan permukaan tanah, tanpa perlu membuang tunggulnya, kecuali apabila ditentukan lain.

5.7.3. Penggalian untuk jalan dan drainase

Penggalian untuk jalan dan drainase dapat diartikan sebagai penggalian dan pembentukan badan jalan dan saluran, termasuk penyingkiran dan pembuangan seluruh bahan galian, serta semua pekerjaan untuk penyelesaian galian, timbunan, lereng, saluran, jalan penghubung (*approaches*), persimpangan dan bagian-bagian pekerjaan lain yang mirip.

Bahan galian yang memenuhi syarat dapat digunakan untuk membangun elemen struktur jalan; misal, timbunan, bahu, tanah dasar, lereng dan urugan untuk bangunan. Pembuangan galian yang tidak digunakan biasanya diatur dalam spesifikasi atau ditentukan oleh Pengawas Pekerjaan.

Pada spesifikasi penggalian untuk jalan dan drainase umumnya dimasukkan juga ketentuan lain-lain. Ketentuan biasanya menyangkut penyingkiran tumbuh-tumbuhan apabila sebelumnya, lahan belum pernah dibersihkan dan dibongkar. Disamping itu, ketentuan dapat menyangkut penyelamatan (*salvage*) sebagian bahan galian yang dapat digunakan untuk keperluan lain; misal; untuk tanah dasar atau menutup lereng; apabila menyangkut penghematan tanah penutup (*top soil*). Apabila pada galian atau timbunan dijumpai tanah maka tanah tersebut harus dibuang dan diganti dengan tanah yang memenuhi syarat.

Spesifikasi dapat juga mencakup instruksi pembentukan badan jalan, persimpangan dan bagian-bagian lain jalan, sesuai dengan alinyemen, ketinggian dan potongan melintang yang ditetapkan. Selama pelaksanaan pekerjaan tersebut, jalan harus dilengkapi dengan drainase yang setiap saat dapat mengalirkan air. Apabila pada seksi galian dijumpai batuan, maka penggalian umumnya harus mencapai kedalaman 15 atau 30 cm di bawah permukaan akhir (*grade line*), dan selanjutnya bahan galian digunakan kembali untuk mengurug permukaan galian sampai ketinggian yang direncanakan. Ketentuan lain yang sering dimasukkan adalah mengenai pemeliharaan permukaan badan yang telah dibentuk, sampai pekerjaan diterima sampai pekerjaan lapis pondasi dimulai. Ketentuan penggalian dapat juga mencakup penggemburan dan pemadatan kembali pada seksi galian.

Tergantung pada jenis bahan yang digali, beberapa jenis peralatan yang biasa digunakan pada penggalian adalah:

- *Tractor-scraper* - digunakan pada operasi dasar penggalian, pengangkutan dan penghamparan tanah biasa. *Scraper* dengan roda rantai digunakan untuk pengangkutan jarak pendek atau medan yang tidak rata, sedangkan *scraper* dengan roda karet digunakan untuk pengangkutan jarak jauh, apabila dapat dibangun jalan pengangkutan.
- *Ripper* - digunakan untuk menghancurkan bahan keras sehingga dapat dimuat *scraper*.
- Mesin bor dan bahan peledak - digunakan untuk menggali batuan.
- *Shovel* - digunakan untuk memuat bahan hasil peledakan ke alat pengangkut.
- Truk - digunakan untuk mengangkut bahan hasil peledakan ke tempat penimbunan atau pembuangan.
- *Dragline* - digunakan untuk menggali tanah lunak.
- *Backhoe* - digunakan untuk menggali parit.
- *Dozer* - sangat berguna untuk pengangkutan pada jarak sangat pendek serta untuk meratakan bahan yang ditumpahkan dari alat angkut lain.
- *Motor grader* - digunakan untuk membentuk parit, merapihkan lereng serta memelihara jalan pengangkutan.

5.7.4. Penggalian untuk struktur

Penggalian untuk struktur mengandung arti penggalian bahan yang diperlukan untuk pembangunan struktur; misal; gorong-gorong, pondasi jembatan dan tembok penahan tanah. Spesifikasi pekerjaan ini biasanya menyangkut ketentuan mengenai penyingkiran (*removal*) semua jenis bahan yang dijumpai pada daerah penggalian, terlepas dari jenisnya. Pada kasus tertentu; terutama apabila menyangkut galian besar (misalnya pada penggalian untuk pembangunan kepala dan tiang jembatan), untuk menunjang kelancaran penggalian mungkin diperlukan bangunan pelindung (*caisson atau cofferdam*). Ketentuan pembuatan bangunan tersebut dan diikuti dengan penggalian biasanya dicantumkan juga dalam spesifikasi. Bahan galian yang baik dapat digunakan, baik untuk pengurugan kembali di sekitar bangunan yang sudah selesai maupun untuk pekerjaan lain jalan; bahan galian yang jelek atau kelebihannya tentunya harus dibuang. Pengurugan kembali bahan dapat (atau tidak) dimasukkan sebagai bagian dari penggalian. Namun demikian, pada kasus yang manapun; pengurugan kembali biasanya mempunyai ketentuan yang ketat, terutama apabila menyangkut kepadatan.

Pada penggalian untuk struktur dapat digunakan, baik peralatan mekanis maupun manual, dimana alat manual yang digunakan biasanya lebih banyak daripada untuk pekerjaan lain.

Apabila penggalian dilakukan pada tanah yang umum; maka *clamshell* dipandang cocok pada pekerjaan ini, karena kemampuannya untuk menggali secara vertikal dari posisi yang cukup dekat dari bangunan pelindung (misal pada penggalian yang dalam). Peralatan lebih kecil misal *tractor shovel*, juga berguna pada pekerjaan ini. *Bulldozer* juga dapat digunakan untuk menggali dan mengurugkan kembali tanah. Mesin pemadat getar (*vibratory and tamping tools*) sangat berguna untuk pemadatan tanah urugan, terutama pada ruang yang terbatas.

5.7.5. Penggalian di sumber bahan (*borrow excavation*)

Apabila bahan galian yang diperoleh dari daerah milik jalan tidak mencukupi untuk penimbunan bagian lain jalan, biasanya dilakukan pengambilan bahan dari sumber di luar daerah milik jalan. Pemilik pekerjaan dapat menunjukkan sumber bahan yang dipandang cocok, atau kontraktor dapat memilih sendiri sumber bahan. Spesifikasi penggalian di sumber bahan umumnya hampir sama dengan spesifikasi penggalian untuk jalan, yaitu menyangkut ketentuan mengenai penggalian bahan di lokasi yang telah ditetapkan, serta mengenai penempatan bahan pada elemen jalan. Ketentuan tambahan biasanya menyangkut kondisi daerah penggalian selama dan setelah penggalian; misal, apabila pekerjaan telah selesai, maka kondisi daerah galian harus sedemikian rupa sehingga air akan tergenang.

Pembukaan dan pengerjaan di sumber bahan sering kali menyangkut operasi berskala besar yang menuntut penentuan metoda yang paling baik untuk pemindahan tanah. Apabila tanah galian harus ditempatkan pada timbunan dan tanah galian terdiri atas tanah biasa (sebagaimana dibedakan dari batuan), maka pada umumnya penggalian yang efisien dapat dilakukan dengan menggunakan *scraper*. Hal tersebut dikarenakan karakter *scraper* dimana satu buah alat dengan seorang operator dapat menggali, memuat, mengangkut dan menumpahkan/menghamparkan tanah. Namun demikian, apabila jarak angkut lebih dari sekitar 350 m, maka dapat digunakan *tractor* (baik yang beroda karet maupun rantai). Apabila bahan yang harus digali adalah batuan atau tanah tersementasi (*cemented soils*), biasanya *shovel* merupakan alat paling baik. Pada kondisi yang cocok, gabungan *shovel*-truk mempunyai kapasitas produksi yang sangat besar, meskipun ketergantungannya satu sama lain kadang-kadang menjadikan kombinasi peralatan tersebut kurang efektif bila dibandingkan dengan *scraper*, kecuali untuk tanah atau kondisi yang tidak cocok bagi beroperasinya *scraper*.

Pada Tabel 5 ditunjukkan jenis-jenis peralatan yang dapat digunakan pada penggalian di sumber bahan.

Table 5. Peralatan yang biasa digunakan pada penggalian di sumber bahan
(Sumber; Homer, 1988)

PERALATAN GALI	TUJUAN PEMUATAN	KEGUNAAN
▪ <i>Bulldozer / angledozer</i>	-	Meratakan, menggali dan membantu alat lain
▪ <i>Bulldozer / angledozer</i>	Persediaan	Mendorong dalam jarak pendek ke tempat penimbunan
▪ <i>Bulldozer with ripper</i>	-	Menggemburkan dan menggali batuan atau tanah keras / padat
▪ <i>Drill and blast</i>	-	Menggemburkan dan menggali batuan atau tanah keras / padat
▪ <i>Wheeled forward loader</i>	Truk, persediaan, ban berjalan	Menggali timbunan, batuan hasil peledakan, tanah, dimana permukaan tanah baik (<i>good running surfaces</i>)
▪ <i>Tracked forward loader</i>	Truk, persediaan, ban berjalan	Menggali bahan sebagaimana disebutkan di atas namun pada permukaan tanah lebih lunak
▪ <i>Back-acter (wheeled or tracked)</i>	Truk, persediaan, ban berjalan	Menggali tanah atau batuan lunak, batuan hasil peledakan, timbunan yang biasanya terletak di bawah lantai kerja
▪ <i>Face shovel</i>	Truk, persediaan	Menggali tanah atau batuan lunak, batuan hasil peledakan, timbunan yang terletak di atas kedudukan alat
▪ <i>Draglines</i>	Truk, persediaan, ban berjalan	Menggali tanah atau batuan lunak, terutama yang terletak pada jangkauan yang cukup jauh atau terletak di bawah permukaan air
▪ <i>Bucket wheeled excavator</i>	Truk, persediaan, ban berjalan	Menggali tanah atau batuan lunak (umumnya beroperasi pada garis lurus yang cukup jauh)

Table 5. Peralatan yang biasa digunakan pada penggalian di sumber bahan (lanjutan)
(Sumber; Homer, 1988)

PERALATAN GALI	TUJUAN PEMUATAN	KEGUNAAN
▪ <i>Towed scraper</i>	Sendiri	Menggali tanah atau batuan lunak yang terletak pada daerah terbuka. Jarak angkut biasanya tidak lebih dari 400 m
▪ <i>Motor scraper (single or twin engined)</i>	Sendiri	Menggali tanah atau batuan lunak (kekuatan $\pm 70 \text{ KN/m}^2$) yang terletak pada daerah terbuka. Jarak angkut tidak lebih dari 2,6 km.
▪ <i>Elevating scraper</i>	Sendiri	Beroperasi seperti <i>motor scraper</i> , tetapi tidak cocok batuan lunak yang mudah hancur seperti tanah kapur (<i>chalk</i>)
▪ <i>Dredgers</i>	Sendiri, bargas, pompa	Menggali tanah dan batuan lunak yang terletak dalam air

6 Pekerjaan timbunan

6.1. Umum

Timbunan dapat dibangun dengan menggunakan berbagai jenis bahan (tanah) serta untuk berbagai keperluan.

Ditinjau dari keperluannya, timbunan dibagi menjadi timbunan struktural dan timbunan non-struktural. Timbunan struktural (misal untuk jalan atau bendungan) harus mempunyai faktor keamanan yang lebih besar daripada timbunan non-struktural (misal untuk gudang, atau lanskap). Agar dapat dibangun sesuai dengan fungsinya, timbunan harus didisain dengan memperhitungkan berbagai faktor. Disamping itu, tanah untuk timbunan perlu dipilih sedemikian rupa agar biaya pekerjaan serendah mungkin.

Pada pembangunan jalan, timbunan diperlukan untuk menaikkan permukaan jalan di atas permukaan tanah asli, baik untuk memenuhi standar geometri maupun untuk mencegah terjadinya kerusakan jalan akibat air permukaan atau air tanah.

Faktor-faktor utama yang harus diperhitungkan dalam disain timbunan adalah:

- Stabilitas timbunan.
- Daya dukung timbunan.
- Penurunan (*settlement*) timbunan.
- Kemampuan melayani lalu-lintas (*trafficability*).
- Faktor lain, terutama permeabilitas.

6.2. Stabilitas timbunan

Stabilitas timbunan sering berubah dari waktu ke waktu. Hal tersebut makin nyata apabila menyangkut tanah kohesif. Dalam banyak kasus, pada saat pembangunan akan terjadi kenaikan tegangan air pori, baik pada tanah timbunan maupun tanah pondasi. Sesuai dengan berjalannya waktu, tegangan air pori pada tanah timbunan dapat makin meningkat atau menurun; sedangkan pada tanah pondasi cenderung menurun. Oleh karena itu, menjelang akhir masa pembangunan, faktor keamanan stabilitas lereng timbunan sering mempunyai nilai paling rendah. Apabila untuk timbunan digunakan lempung yang telah mengalami konsolidasi (*overconsolidated clays*), di bawah lereng sering timbul tegangan air pori yang dapat mengakibatkan keruntuhan lereng beberapa tahun kemudian.

Sehubungan dengan hal di atas, maka analisis stabilitas timbunan (dan tanah aslinya) harus dilakukan dalam rangka mengetahui faktor keamanan paling rendah untuk berbagai

ketinggian, sifat tanah urugan dan tanah asli, serta tegangan air pori selama dan setelah pembangunan. Secara tipikal, sudut kemiringan lereng timbunan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kemiringan tipikal lereng timbunan*
(Sumber: Horner, 1988)

JENIS TANAH	KEMIRINGAN (V:H)
• Batuan keras (<i>hard rock fill</i>)	1,5:1 – 1:1
• Batuan lunak (<i>weak rock fill</i>)	1:2 – 1:1,25
• Kerikil	1:2 – 1:1,25
• Pasir	1:2,5 – 1:1,5
• Lempung	1:2,5 – 1:1,5

Hanya sebagai pedoman, bukan sebagai disain akhir

Analisis stabilitas tanah asli (pondasi) dibawah timbunan sangat penting, terutama apabila tanah asli tersebut miring atau terdiri atas tanah lunak, misal pada zona runtuh (*past instability*) atau tanah aluvial lunak. Daya dukung timbunan dipandang penting apabila akan dibebani, misal pada jalan raya, lapang terbang, jalan kereta api atau pondasi. Sifat-sifat tanah timbunan akan berubah dari waktu ke waktu; misal, akibat konsolidasi atau peningkatan kadar air. Pada saat menetapkan daya dukung, hal tersebut perlu diperhatikan.

Pada disain jalan raya, jalan kereta api dan lapang terbang, daya dukung atau kekuatan timbunan biasanya dinyatakan dengan CBR (*California Bearing Ratio*) atau modulus reaksi tanah, sedangkan pada disain pondasi, daya dukung timbunan sering dinyatakan dengan hasil pengujian pelat beban (*plate bearing test*) atau triaksial.

Penurunan (*settlement*) pada timbunan dapat diakibatkan oleh penurunan, baik pada timbunan sendiri atau pada tanah asli. Apabila timbunan terdiri atas tanah permeabel, konsolidasi akan terjadi selama pelaksanaan dan dapat dipercepat dengan menambah timbunan. Namun demikian, konsolidasi tanah timbunan yang mempunyai permeabilitas rendah dapat berlangsung beberapa minggu atau beberapa tahun setelah pembangunan, kecuali apabila dilakukan percepatan. Besar penurunan timbunan dapat diperkecil melalui pemadatan, disamping dapat memperbaiki stabilitas. Perbedaan penurunan sering terjadi pada timbunan di sekitar bangunan, karena urugan dekat bangunan umumnya tidak menurun secara bersamaan dengan urugan di bagian lain, disamping urugan dekat bangunan lebih sulit dipadatkan. Perbedaan tersebut dapat dikurangi melalui penggunaan tanah urugan khusus, misal, kerikil. Persoalan yang sama dapat dijumpai apabila timbunan mempunyai ketinggian yang sangat berbeda.

Apabila hasil analisis stabilitas lereng menunjukkan bahwa faktor keamanan tidak mencukupi, atau apabila penurunan tanah asli sangat besar dan berlangsung lama dan/atau tanah asli sangat lunak, maka dalam disain dan pelaksanaan timbunan perlu dipertimbangkan upaya-upaya untuk mengatasinya. Usaha-usaha tersebut mencakup salah satu atau gabungan beberapa teknik sebagai berikut:

- Memperkecil sudut kemiringan lereng (memperlebar dasar timbunan).
- Membangun beban kontra (*berm*) di depan tumit lereng.
- Menggunakan tanah urugan berkekuatan tinggi.
- Meningkatkan kekuatan, baik dengan pemadatan dan pengeringan atau stabilisasi tanah urugan (dengan kapur atau semen).
- Membuat lapisan drainase, untuk menurunkan tegangan air pori.
- Memasang *geotextile*.
- Membangun konstruksi penahan, baik sebagian atau seluruhnya.
- Membuang atau mendorong (*displacement*) tanah yang lunak, baik sebagian maupun seluruhnya, dan menggantinya dengan tanah yang lebih baik.

- i. Membuat parit yang lebar dan dalam serta mengisinya dengan tanah berbutir.
- j. Memperbaiki tanah dengan cara pra-pembebanan (*preloading*), konsolidasi dinamis atau *vibrofloatation*.
- k. Mengendalikan kecepatan pelaksanaan, agar tanah mempunyai waktu yang cukup untuk konsolidasi dan meningkatkan kekuatan.
- l. Menggunakan bahan ringan (misal abu terbang), agar timbunan menjadi lebih ringan.
- m. Membuat drainase vertikal dan/atau lapisan drainase horizontal, agar dapat mempercepat pelepasan tegangan air pori, penurunan dan peningkatan kekuatan.

Penurunan dan kekuatan timbunan lama (misal pada lokasi bekas penambangan) dapat sangat bervariasi, terutama apabila timbunan terdiri atas bahan buangan. Untuk mendapatkan pondasi yang kokoh, mungkin diperlukan upaya penanganan yang ekstensif.

Kemampuan bahan timbunan dalam melayani lalu-lintas sering merupakan faktor penghambat efisiensi pembangunan, terutama apabila menyangkut tanah kohesif atau tanah berbutir yang basah. Dalam praktek, kadang-kadang dialami bahwa tanah yang baik sebagai bahan timbunan, tetapi ternyata dinyatakan tidak baik. Hal tersebut dikarenakan spesifikasi menetapkan bahwa timbunan harus dapat melayani peralatan yang berat, misal *heavy rubber-tyred scrapers*.

6.3. Penurunan timbunan

6.3.1. Umum

Penurunan pada timbunan biasanya merupakan akibat dua faktor sebagai berikut:

- Pengurangan rongga dalam tanah timbunan sebagai akibat pembebanan oleh bagian atas lapisan, beban lalu-lintas dan pengaruh cuaca.
- Penurunan tanah di bawah timbunan. Penurunan tersebut dapat terjadi dalam bentuk pemampatan elastis serta konsolidasi pada tanah jenuh, misal lempung.

Penurunan dalam bentuk pemampatan elastis pada tanah di bawah timbunan biasanya sangat kecil dan dapat diabaikan, kecuali apabila timbunan yang tinggi.

Apabila timbunan terdiri atas lempung yang dipadatkan pada kadar air yang mendekati batas plastisnya, maka tanah tersebut akan mengandung rongga udara yang kecil dan dapat diperlakukan sebagai tanah jenuh. Pada kondisi tersebut, besarnya perkiraan penurunan dapat dilakukan dengan menerapkan teori konsolidasi. Namun demikian, apabila tanah timbunan mengandung rongga udara yang cukup besar, maka teori konsolidasi tidak dapat diterapkan untuk memperkirakan penurunan. Oleh karena itu, perkiraan penurunan harus didasarkan pada hasil pengukuran langsung di lapangan.

6.3.2. Pengaruh pemadatan terhadap penurunan

Derajat kepadatan timbunan yang dicapai pada saat pelaksanaan akan berpengaruh terhadap penurunan. Hal tersebut ditunjukkan oleh hasil pengukuran yang dilakukan selama dan sesudah pelaksanaan beberapa timbunan (*TRRL, 1952*). Analisis hasil pengukuran menunjukkan adanya hubungan yang erat antara kepadatan dengan penurunan akibat densifikasi.

6.3.3. Pengaruh tinggi timbunan terhadap penurunan

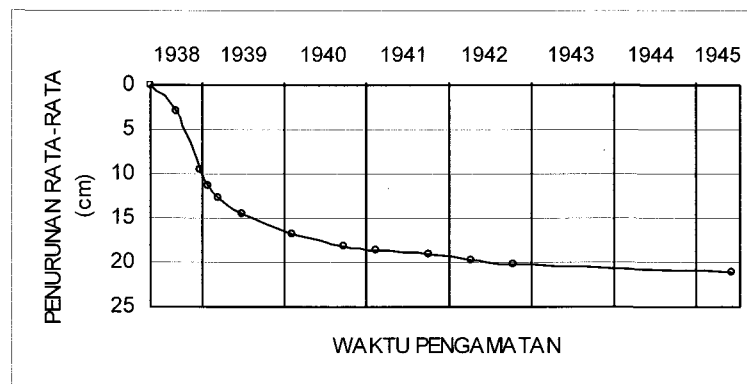
Hasil penyelidikan lapangan menunjukkan bahwa secara kasar, besarnya penurunan adalah proporsional dengan tinggi timbunan. Hal tersebut berarti bahwa apabila tinggi timbunan berkurang oleh suatu bangunan, misal terowongan yang melalui timbunan, maka akan terjadi perbedaan penurunan di sekitar terowongan.

6.3.4. Hubungan antara penurunan dengan waktu

Informasi mengenai hubungan antara penurunan dengan waktu sangat berguna untuk memperkirakan besarnya penurunan setelah jalan selesai dibangun, karena hal tersebut akan mempengaruhi kerataan permukaan perkerasan. Untuk mengatasi hal tersebut sering kali dilakukan dengan cara menanggguhkan pembangunan perkerasan satu tahun setelah timbunan selesai. Pada kurun waktu satu tahun, sebagian besar penurunan dapat berlangsung.

Pengamatan terhadap timbunan menunjukkan bahwa penurunan berlangsung cepat pada masa awal setelah pekerjaan timbunan selesai dan kecepatan tersebut makin menurun sesuai dengan berjalannya waktu. Pada Gambar 19 ditunjukkan hubungan antara penurunan timbunan dengan waktu, dimana timbunan terdiri atas kapur dengan tinggi 13,5 m (45 ft). Pada gambar tersebut terlihat bahwa penurunan total (± 22 cm) dicapai dalam kurun waktu 7 tahun, sedangkan 75 persen penurunan (± 16 cm) dicapai hanya dalam kurun waktu 2 tahun.

Pada kasus timbunan lempung jenuh atau tanah kandungan rongga udaranya diabaikan, kecepatan penurunan dapat diperkirakan berdasarkan pengujian konsolidasi di laboratorium. Kecepatan penurunan di lapangan akan tergantung pada jarak tempuh air untuk mencapai lapisan drainase pada saat air tersebut tertekan. Jarak tempuh air dapat diperpendek dengan membuat drainase kolom pasir pada tanah di bawah timbunan.



Gambar 19. Hubungan tipikal antara penurunan dengan waktu

6.4. Konsolidasi

6.4.1. Persoalan konsolidasi pada pembangunan jalan

Dalam pembangunan jalan, persoalan konsolidasi sering dijumpai pada timbunan dan kepala jembatan. Penurunan pada bangunan tersebut sebenarnya tidak akan menjadi persoalan serius apabila terjadinya seragam. Namun sayangnya hal tersebut jarang terjadi sehingga perbedaan penurunan akan mengakibatkan adanya tambahan tegangan yang mungkin melampaui kekuatan ijin suatu bangunan; contoh, perbedaan penurunan pada jalan dengan perkerasan kaku yang dibangun pada timbunan akan menimbulkan retak pada pelat beton, sedangkan perbedaan penurunan pada kepala jembatan dapat mengakibatkan keruntuhan seluruh jembatan. Jalan yang dibangun pada tanah gambut dapat mengalami perbedaan penurunan yang serius, meskipun tanah tersebut menerima beban yang seragam dan relatif kecil. Terjadinya perbedaan penurunan dapat dijumpai pula di sekitar gorong-gorong.

Terzaghi telah mengembangkan teori yang dapat menghitung penurunan struktur yang dibangun pada tanah mampat. Dengan demikian, maka penurunan struktur yang akan

dibangun dapat diperkirakan cukup teliti, sehingga apabila diperlukan, pengaruh terhadap adanya perbedaan penurunan dapat dikurangi.

Kasus perbedaan penurunan yang paling tua mungkin terjadi pada menara Pisa, yang mulai dibangun pada tahun 1174 dengan tinggi 53,7 m (179 ft). Setelah dibangun, pondasi menara Pisa mulai mengalami penurunan yang berbeda dan sampai sekarang menara tersebut telah miring 4,8 m (16 ft). Hasil penyelidikan modern menunjukkan bahwa miringnya menara Pisa merupakan akibat adanya perbedaan konsolidasi pada lapisan lempung tebal di bawah pondasi.

6.4.2. Definisi

Konsolidasi diartikan sebagai suatu proses dimana akibat pembebanan yang menerus, butir-butir tanah menjadi rapat dan kemudian air yang terkandung dalam tanah terdorong keluar.

Definisi di atas menunjukkan bahwa tanah jenuh yang mendapat pembebanan statis dalam waktu yang cukup lama akan mengalami pengurangan volume. Besarnya konsolidasi biasanya dinyatakan dengan pengurangan angka pori.

Pada tanah jenuh, angka pori (e) adalah proporsional dengan kadar air sebagaimana ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{\text{Volume rongga (air)}}{\text{Volume butir-butir tanah}} \dots\dots\dots 29$$

$$= \frac{\text{Berat air}}{\text{Berat butir-butir tanah}} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots 30$$

$$= \text{Kadar air} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots 31$$

dimana γ_s dan γ_w berturut-turut adalah berat isi butir tanah dan berat isi air.

6.4.3. Analisis penurunan

Perhitungan besar dan kecepatan penurunan pondasi memerlukan data sebagai berikut:

- 1) Tebal, posisi dan sifat-sifat berbagai lapisan tanah di bawah bangunan serta letak permukaan air tanah.
- 2) Hubungan antara angka pori dengan tegangan efektif pada lapisan tanah yang ditinjau.
- 3) Distribusi tegangan pada lapisan tanah sebagai akibat beban bangunan.

Data yang pertama dapat diperoleh dari hasil pengeboran, sedangkan data yang ke dua diperoleh dari hasil pengujian konsolidasi di laboratorium sebagaimana diuraikan di bawah.

Penentuan distribusi tegangan merupakan persoalan yang cukup rumit sehingga diperlukan beberapa penyederhanaan.

6.4.3.1. Distribusi tegangan

Distribusi tegangan pada medium yang semi tidak terbatas, elastis, homogen dan isotropis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Bousinesq. Untuk beberapa jenis pembebanan yang biasa dijumpai dalam praktek, telah dikembangkan tabel distribusi tegangan. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dihitung tegangan pada setiap titik dalam bidang horizontal dan vertikal tanah akibat beban sebagai berikut:

- 1) Bentuk lingkaran dengan beban merata
- 2) Bentuk lingkaran dengan beban "segi tiga"
- 3) Bentuk lajur (*long strip*) dengan beban merata

- 4) Bentuk lajur dengan beban “segi tiga”
- 5) Bentuk lajur dengan beban “bertangga” (*terrace*)
- 6) Bentuk segi empat dengan beban merata.

Dengan mengkombinasikan jenis pembebanan di atas, biasanya jenis-jenis pembebanan yang lain dapat didekati cukup teliti. Penentuan tegangan vertikal di bawah timbunan akibat beban segi tiga dan segi empat diuraikan pada Butir 6.8.

Distribusi tegangan pada tanah ditentukan berdasarkan asumsi yang sama dengan asumsi pada medium Boussinesq (semi tidak terbatas, homogen, elastis dan isotropis).

Disamping berdasarkan persamaan Boussinesq, penentuan distribusi tegangan dalam praktek sering disederhanakan dengan menganggap bahwa penyebaran beban adalah 1:1 atau 2:1 dan pada setiap bidang horizontal, distribusi beban adalah seragam. Hasil perhitungan berdasarkan kedua pendekatan tersebut menunjukkan bahwa penyebaran beban 2:1 ternyata lebih mendekati hasil perhitungan menurut Boussinesq daripada penyebaran beban 1:1.

6.4.3.2. Perkiraan penurunan total

Terlepas dari cara penentuan distribusi tegangan, prosedur perhitungan penurunan total adalah sama.

Adapun prosedur penghitungan penurunan pada dasarnya dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Tentukan angka pori tanah asli.
- 2) Hitung tegangan efektif sebagai akibat beban penutup.
- 3) Hitung tegangan efektif beban bangunan.
- 4) Hitung tegangan efektif total, yaitu tegangan efektif akibat beban penutup ditambah tegangan efektif akibat bangunan
- 5) Tentukan angka pori akhir berdasarkan hubungan antara angka pori dengan tegangan efektif yang diperoleh dari pengujian di laboratorium.
- 7) Tentukan perubahan tebal lapisan, berdasarkan angka pori awal dan angka pori akhir serta tebal lapisan tanah. Nilai tersebut merupakan penurunan bangunan.

Perubahan tebal lapisan atau penurunan total tanah jenuh (*S*) dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$S = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H \dots\dots\dots 32$$

dimana :

- e_1 = angka pori awal
- e_2 = angka pori akhir
- H = tebal lapisan tanah

Pada saat menentukan peningkatan tegangan pada lapisan tanah, biasanya digunakan perubahan tegangan pada tengah-tengah lapisan. Hal tersebut menganggap bahwa distribusi tegangan dalam lapisan tanah adalah linear. Pada kasus tanah yang tebal, anggapan tersebut dapat menimbulkan kesalahan yang cukup besar, sehingga harus digunakan distribusi tegangan yang sebenarnya.

Distribusi tegangan pada bidang horizontal tidaklah merata, kecuali pada perhitungan kasar. Oleh karena itu, penurunan di bawah berbagai titik pada bangunan haruslah dicek dengan menggunakan distribusi tegangan tersebut, agar diperoleh distribusi penurunan yang sebenarnya.

Sebagai alternatif, besarnya penurunan dapat diperkirakan berdasarkan indeks pemampatan (C_c) melalui hubungan sebagai berikut:

$$S = C_c \left(\frac{H}{1 + e_1} \right) \log \frac{p}{p_0} \dots\dots\dots 33$$

dimana :

C_c ditetapkan berdasarkan hubungan e-log

p sebagaimana yang akan diuraikan pada Butir 6.4.8.

6.4.3.3. Perkiraan kecepatan penurunan

Kecepatan penurunan bangunan yang direncanakan ditentukan berdasarkan hubungan antara derajat konsolidasi dengan waktu yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium. Derajat konsolidasi 100 persen adalah sesuai dengan penurunan total yang ditunjukkan pada Persamaan 32 atau 33; sedangkan lamanya penurunan ditentukan berdasarkan kenyataan bahwa kecepatan penurunan adalah berbanding terbalik dengan kuadrat jarak tempuh air.

Untuk pembebanan dan derajat konsolidasi yang sama, hubungan antara waktu konsolidasi di lapangan (t_{ap}) dan waktu konsolidasi di laboratorium (t_{lab}) dapat dinyatakan dengan hubungan sebagai berikut:

$$t_{ap} = \left(\frac{\text{Jarak tempuh air di lapangan}}{\text{Jarak tempuh air di laboratorium}} \right)^2 \dots\dots\dots 34$$

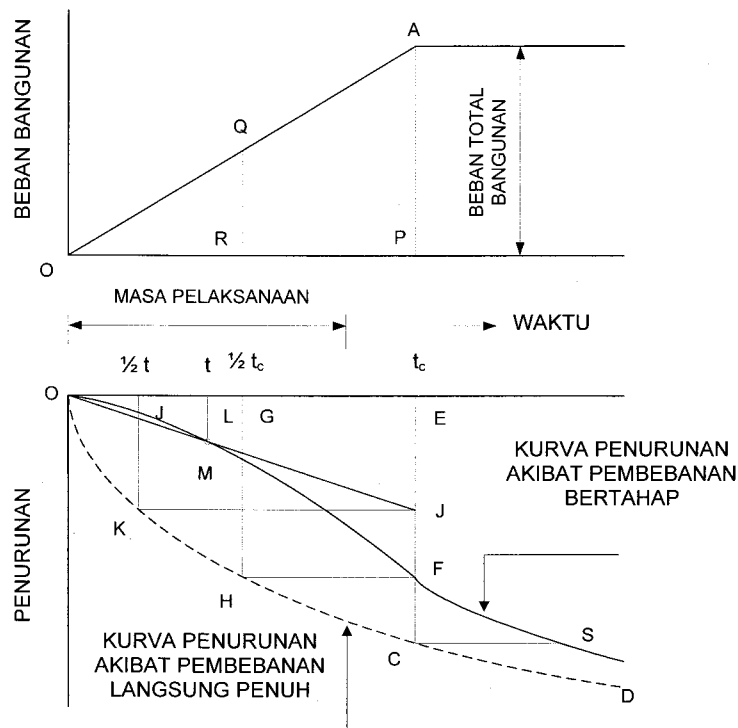
pada persamaan di atas, jarak tempuh di laboratorium adalah sesuai dengan tebal contoh, sedang jarak tempuh di lapangan adalah sesuai dengan tebal lapisan tanah di lapangan serta arah aliran air.

Apabila lapisan tanah adalah sangat tebal, maka jarak tempuh air dapat dianggap sama dengan tebal bagian lapisan yang menerima tegangan terukur.

Dalam teori matematis konsolidasi, ditetapkan anggapan bahwa beban yang mengakibatkan konsolidasi bekerja langsung secara penuh. Dalam praktek, tingkat pembebanan yang bekerja pada tanah adalah bertahap, sesuai dengan kecepatan pembangunan struktur. Disamping itu, kecuali timbunan, sebagian besar struktur biasanya memerlukan penggalian tanah beberapa puluh centimeter. Oleh karena itu, ada kemungkinan bahwa tanah akan memuai dan penurunan tidak akan dimulai, kecuali apabila beban yang diakibatkan oleh bangunan telah melampaui berat tanah yang tergali. Apabila diperlukan perkiraan penurunan yang teliti, baik selama maupun setelah pembangunan, maka hubungan penurunan-waktu harus dikoreksi oleh pengaruh pembebanan bertahap, meskipun penurunan total setelah waktu yang lama tidak akan dipengaruhi oleh kondisi pembebanan awal.

Terzaghi telah mengembangkan suatu metoda untuk menghitung kecepatan penurunan akibat pembebanan lambat (bertahap) selama pembangunan. Metoda tersebut didasarkan pada anggapan bahwa apabila kecepatan pembebanan tetap, maka penurunan yang akan terjadi pada akhir masa pelaksanaan akan sama dengan penurunan yang terjadi di tengah masa pelaksanaan apabila pembebanan bekerja sekaligus pada awal pembangunan. Hubungan penurunan-waktu untuk masa setelah pembangunan akan mengikuti bagian kurva pembebanan sekaligus, mulai dari waktu yang sama dengan setengah masa pelaksanaan.

Perkiraan penurunan yang didasarkan pada anggapan di atas dapat ditentukan melalui cara grafis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Cara grafis penentuan penurunan akibat pembebanan bertahap (Sumber: TRRL, 1952)

Pada Gambar 20,

OAB = beban sebagai fungsi waktu

OCD = kurva penurunan fungsi waktu apabila beban bekerja langsung penuh sejak awal pembangunan

t_c = masa pelaksanaan

Pada akhir masa pelaksanaan (t_c), penurunan yang terjadi akibat beban bertahap adalah sama dengan penurunan pada setengah masa pelaksanaan ($\frac{1}{2}t_c$) akibat beban langsung bekerja penuh (GH atau EF).

Pada setiap saat pada masa pelaksanaan (t), penurunan yang terjadi akibat beban bertahap (LM) adalah sama dengan penurunan pada setengah masa pelaksanaan ($\frac{1}{2}t$) akibat beban langsung bekerja penuh yang dikoreksi oleh beban pada saat t terhadap beban pada akhir pelaksanaan. Dengan demikian, maka $LM = JK \times \frac{QR}{AP}$.

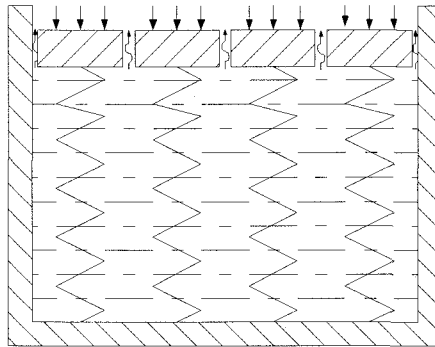
Berdasarkan hal di atas, penurunan pada setiap saat pada masa pelaksanaan dapat diperoleh dengan memproyeksikan penurunan pada setengah masa pelaksanaan akibat beban penuh terhadap garis vertikal melalui t_c , kemudian menghubungkan titik tersebut dengan titik O. Perpotongan antara garis tersebut dengan garis vertikal melalui t merupakan penurunan sampai waktu t .

Kurva penurunan setelah masa pelaksanaan (FS) mengikuti bentuk penurunan akibat pembebanan penuh mulai dari titik H; dalam hal tersebut, $CS = \frac{1}{2}t_c$.

6.4.4. Proses konsolidasi

Proses konsolidasi diilustrasikan dengan model sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 21, yang digunakan oleh Terzaghi pada saat mendemonstrasikan konsolidasi.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 21, model terdiri atas silinder terisi air yang dilengkapi dengan piston tiris (berlubang-lubang) yang ditopang oleh beberapa buah pegas.



Gambar 21. Model proses konsolidasi

Apabila piston dibebani secara tiba-tiba, maka beban tersebut akan sepenuhnya dipikul oleh air. Karena tekanan air dengan udara berbeda, maka air mulai mengalir melalui lubang-lubang pada piston. Dengan keluarnya air, maka tekanan yang dipikul air akan makin berkurang dan secara berangsur-angsur dialihkan ke pegas sehingga akhirnya seluruh beban dipikul oleh pegas dan piston berada pada kedudukan seimbang yang baru. Kiranya dapat dipahami bahwa kecepatan keluarnya air akan tergantung pada jumlah dan ukuran lubang pada piston.

Apabila pembebanan di atas diberlakukan pada tanah jenuh, maka pada awalnya seluruh beban dipikul sepenuhnya oleh air yang mengisi rongga dalam tanah. Dengan demikian, maka tekanan air pori adalah sama dengan tekanan beban. Apabila tanah sangat porus, maka tekanan pada air akan mengakibatkan air mengalir dengan cepat dan tekanan pada air makin berkurang sampai akhirnya seluruh tekanan beban dipikul oleh struktur yang dibentuk oleh butir-butir tanah. Apabila tanah kedap, maka proses keluarnya air akan sangat lambat. Oleh karena itu, proses konsolidasi pada lempung akan berlangsung dalam waktu yang cukup lama. Konsolidasi penuh mungkin berlangsung dalam ratusan tahun, dimana pada awalnya, proses konsolidasi berlangsung cepat dan makin lambat sesuai dengan berjalannya waktu.

Meskipun besarnya penurunan adalah penting, namun kecepatan penurunan pada tahun-tahun awal dipandang lebih penting.

Besarnya penurunan tergantung pada kompresibilitas tanah, sedangkan kecepatan penurunan tergantung pada kompresibilitas dan permeabilitas tanah.

Dalam analisis konsolidasi tanah berbutir halus (lempung) perlu dibedakan dua jenis lempung, yaitu lempung terkonsolidasi normal (*normally consolidated clay*) dan lempung terkonsolidasi berlebih (*overconsolidated clay*). Pada kasus lempung terkonsolidasi normal, lapisan lempung tidak pernah menerima yang lebih besar dari beban efektif yang sekarang bekerja. Hal tersebut benar apabila tebal lapisan penutup (dengan demikian beban yang bekerja pada lapisan lempung) selalu tetap sampai sekarang. Pada kasus lempung terkonsolidasi berlebih, lapisan lempung pernah menerima beban yang lebih besar dari beban efektif yang sekarang bekerja. Tegangan yang pernah bekerja pada lapisan tanah disebut tegangan pra-konsolidasi. Hal tersebut benar apabila tebal lapisan penutup yang sekarang lebih kecil dari tebal lapisan penutup yang pernah ada. Lempung terkonsolidasi berlebih dapat terwujud apabila pada permukaan tanah pernah terjadi erosi. Perlu dicatat bahwa lempung terkonsolidasi berlebih umumnya kurang mampat.

6.4.5. Teori matematis konsolidasi

Teori matematis mengenai konsolidasi yang dikembangkan oleh Terzaghi adalah cukup rumit dimana persamaan diferensial untuk penghitungan konsolidasi hanya dapat diselesaikan melalui persamaan tidak terhingga (*infinite series*).

Beberapa anggapan utama yang ditetapkan oleh Terzaghi adalah:

- 1) Rongga dalam tanah terisi penuh oleh air, sehingga tanah dalam keadaan jenuh.
- 2) Air dan butir-butir tanah tidak dapat memampat.
- 3) Aliran air dalam tanah berlaku menurut Hukum Darcy, yaitu, Kecepatan = Ki , dimana K adalah koefisien permeabilitas dan i adalah gradien hidrolis.
- 4) Selama proses konsolidasi, K adalah konstan.
- 5) Keterlambatan konsolidasi sepenuhnya sebagai akibat rendahnya permeabilitas.
- 6) Dalam arah lateral, tanah adalah terkepung (*confined*).
- 7) Tegangan normal total dan efektif pada setiap titik dalam bidang horizontal adalah sama. Dalam pengertian lain, aliran air dari rongga hanya terjadi dalam arah vertikal saja.
- 8) Perubahan tegangan efektif pada tanah mengakibatkan perubahan angka pori yang sesuai.

6.4.5.1. Keabsahan anggapan-anggapan dalam praktek

Dianggapnya kondisi tanah dalam keadaan jenuh adalah cukup benar pada kasus dimana lempung asli terletak sekitar 1,2 sampai 1,5 m (4 sampai 5 ft) di bawah permukaan tanah.

Dianggapnya air dan butir-butir tanah tidak bisa mampat mengandung arti diabaikannya penurunan akibat pemampatan elastis pada tanah. Hal tersebut dapat diterima dalam sebagian besar praktek.

Hukum Darcy adalah cukup sesuai dengan data hasil percobaan, meskipun anggapan mengenai konstannya koefisien permeabilitas masih dipertanyakan.

Anggapan mengenai terkepungnya tanah dalam arah lateral dan terutama dalam kaitan dengan mengalirnya air hanya dalam arah vertikal saja dipandang merupakan kesalahan terbesar. Namun demikian, apabila permukaan tanah yang dibebani adalah luas, maka kesalahan akibat anggapan tersebut mungkin kecil.

Meskipun anggapan-anggapan yang ditetapkan adalah tidak benar-benar sesuai dengan kenyataan di lapangan, namun pada banyak kasus, perkiraan penurunan cukup mendekati penurunan sebenarnya.

6.4.5.2. Persamaan teoritis untuk besarnya penurunan

Berdasarkan anggapan yang diuraikan di atas serta batas-batas yang ditunjukkan pada Gambar 22, persamaan Terzaghi yang menyatakan hubungan antara besarnya penurunan (S) dengan waktu setelah pembebanan (t) dan beban merata adalah sebagai berikut:

$$S = m_v p_1 H \left[1 - \frac{8}{\pi} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{(2N+1)^2} e^{-\frac{(2N+1)^2 \pi^2 C_v t}{4 H^2}} \right] \dots\dots\dots 35$$

$$m_v = \frac{a_v}{\gamma_w m_v} \dots\dots\dots 36$$

$$= \frac{\Delta e}{\Delta p} \times \frac{1}{(1+e_1)} \dots\dots\dots 37$$

$$= \frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta H}{H_1} \dots\dots\dots 38$$

$$a_v = \frac{e - e_1}{\Delta p} = \frac{\Delta e}{\Delta p} \dots\dots\dots 39$$

$$C_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} \dots\dots\dots 40$$

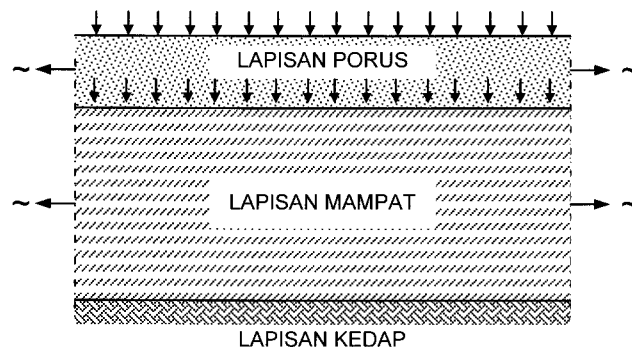
dimana :

- Δe = perubahan angka pori selama proses konsolidasi
- Δp = perubahan tegangan yang mengakibatkan perubahan angka pori
- e_1 = angka pori awal sebelum p_1 bekerja
- p_1 = tegangan awal yang bekerja pada permukaan tanah
- H_1 = tebal lapisan tanah sebelum konsolidasi
- ΔH = perubahan tebal lapisan tanah
- N = bilangan integer
- a_v = koefisien pemampatan
- γ_w = berat isi air
- m_v = koefisien perubahan volume

Koefisien perubahan volume (m_v) dan koefisien konsolidasi (C_v) ditentukan melalui pengujian konsolidasi di laboratorium.

Pada Persamaan 35, $m_v p_1 H$ merupakan penurunan akhir yang akan dicapai setelah waktu yang tidak terbatas, sedangkan $\frac{C_v t}{H^2}$ adalah besaran tidak berdimensi yang dikenal dengan faktor waktu (T_v).

Bagian kanan Persamaan 35 terdiri atas dua bagian, yaitu bagian yang mewakili penurunan akhir serta bagian dalam kurung yang merupakan fungsi faktor waktu, $f(T_v)$ atau $f\left(\frac{C_v t}{H^2}\right)$.



Gambar 22. Syarat batas yang digunakan pada teori Terzaghi

Dengan demikian, persamaan penurunan dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$S = S_1 f(T_v); \text{ dimana } S_1 \text{ adalah penurunan akhir.}$$

Persentase atau derajat konsolidasi yang dicapai pada waktu t adalah:

$$U (\%) = \frac{S}{S_1} \times 100$$

$$= f(T_v)$$

$$= f\left(\frac{C_v t}{H^2}\right) \times 100 \dots\dots\dots 41$$

Untuk derajat konsolidasi tertentu, faktor waktu adalah:

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \dots\dots\dots 42$$

atau waktu konsolidasi,

$$t = \frac{T_v H^2}{C_v} \dots\dots\dots 43$$

Dengan perkataan lain, waktu konsolidasi adalah proporsional dengan jarak tempuh air, atau kecepatan konsolidasi adalah berbanding terbalik dengan kuadrat jarak tempuh air.

Meskipun penting untuk diketahui, namun Persamaan 6.7 biasanya tidak digunakan untuk keperluan praktis, sedangkan hubungan antara derajat konsolidasi (U) dengan faktor waktu (T_v) dapat didekati dengan persamaan sebagai berikut:

- Untuk $U < 60\%$: $T_v = \frac{1}{4\pi} U^2 \dots\dots\dots 44$

- Untuk $U \geq 60\%$: $T_v = -0,0932 \log (1-U) \dots\dots\dots 45$

6.4.6. Pengujian konsolidasi di laboratorium

Kecepatan dan derajat konsolidasi serta besarnya penurunan suatu struktur yang direncanakan dibangun di atas tanah mampat diperkirakan berdasarkan pengujian di laboratorium terhadap benda uji yang diambil dari lapangan.

Metoda pengujian konsolidasi diuraikan secara lengkap dalam SNI 03-2812-1992 (AASHTO T 216), sedangkan di bawah ini diuraikan ringkasannya.

Pengujian konsolidasi dapat dibagi menjadi dua bagian sebagai berikut:

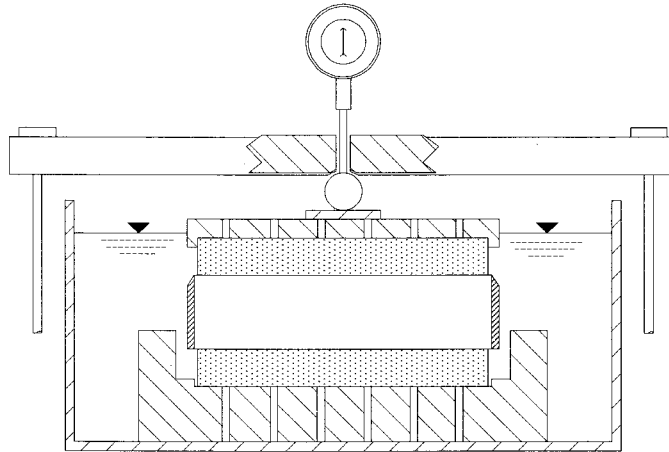
- 1) Penentuan hubungan antara angka pori dengan tegangan efektif.
- 2) Penentuan hubungan antara derajat konsolidasi dengan waktu konsolidasi.

Pembacaan untuk mendapatkan kedua hubungan di atas dilakukan bersamaan pada saat pengujian.

6.4.6.1. Peralatan

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 23, peralatan utama yang digunakan pada pengujian konsolidasi adalah:

- Alat pembebanan (*loading device*)
- Cincin logam (*consolidometer*)
- Batu porus
- Arloji pengukur perubahan tinggi benda uji (*extensiometer*)



Gambar 23. Diagram penampang alat pengujian konsolidasi

6.4.6.2. Prosedur

Setelah benda uji disiapkan dengan menggunakan pemotong silinder, selanjutnya pengujian konsolidasi dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- Benda uji dimasukkan dalam cincin dan kedua permukaannya ditutup dengan batu porus.
- Lakukan pembebanan terhadap benda uji.
- Lakukan pembacaan penurunan benda uji pada waktu-waktu tertentu sampai penurunan hampir berhenti (biasanya diperlukan waktu 24 jam). Pembacaan penurunan biasanya dilakukan ½, 1, 2, 4, 8, 16 ... menit sampai 24 jam setelah pembebanan.
- Buat hubungan antara waktu sebagai sumbu X (biasanya dalam skala logaritma) dan penurunan sebagai sumbu Y.
- Ulangi cara di atas dengan beban yang berbeda sampai beban yang diberikan lebih besar dari beban yang diperkirakan akan diterima lapisan tanah. Beban yang diberikan biasanya 0,274; 0,547; 1,094; 2,183 dan 4,376 kg/cm² (¼, ½, 1, 2 dan 4 ton/ft²).

Apabila informasi mengenai pemuaihan akibat pengurangan beban tidak diperlukan, maka setelah pembacaan terakhir, beban dapat diangkat dan benda uji dikeluarkan dari cincin. Selanjutnya tentukan berat kering dan berat jenis tanah. Berdasarkan data yang diperoleh dan ukuran benda uji, maka dapat dihitung angka pori awal dan angka pori untuk setiap penambahan beban. Selanjutnya, hubungan antara angka pori dan tegangan efektif dapat digambar. Hubungan antara derajat konsolidasi dengan waktu diperoleh dengan menganggap bahwa konsolidasi 100 persen terjadi pada pembacaan akhir untuk setiap pembebanan, yaitu setelah 24 jam setelah penambahan beban. Derajat konsolidasi pada waktu antara (½, 1, 2, 4, 8, 16, ... menit) dapat dihitung berdasarkan pembacaan arloji pada waktu-waktu tersebut dan kemudian diplot.

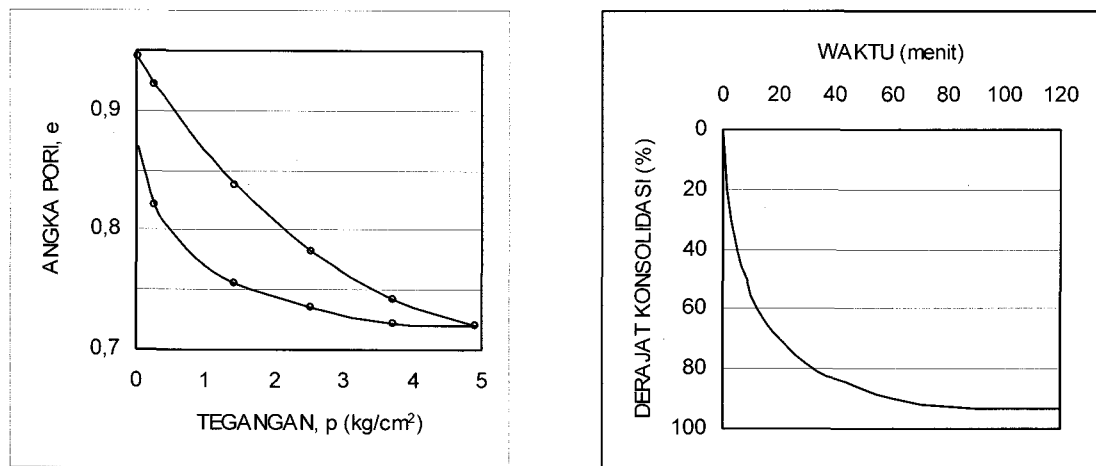
Apabila informasi mengenai pemuaihan akibat pengurangan beban diperlukan, maka setelah pembacaan akhir, dapat dilakukan pengujian pemuaihan. Pengujian tersebut dilakukan dengan cara mengurangi beban dan kemudian melakukan pembacaan arloji. Setiap pengurangan beban biasanya dilakukan 24 jam setelah pengurangan beban sebelumnya. Akhirnya benda uji dikeringkan, ditimbang dan ditentukan berat jenisnya.

Denga cara di atas, maka akan diperoleh hubungan antara angka pori dangan tegangan efektif, baik sebagai pengaruh penambahan beban, maupun pengurangan beban.

Data pengujian pemuaian digunakan dalam menentukan pergerakan tanah ke arah atas apabila beban penutup dibuang; misalnya pada penggalian tanah.

Pada Gambar 24a ditunjukkan contoh tipikal hubungan antara angka pori dengan tegangan efektif dimana pada gambar tersebut terlihat adanya efek histeresis.

Pada Gambar 24b ditunjukkan hubungan antara derajat konsolidasi dengan waktu. Pada gambar tersebut terlihat bahwa 90 persen konsolidasi selesai pada menit ke 60.



a. Hubungan angka pori-tegangan

b. Hubungan waktu-derajat konsolidasi

Gambar 24. Hubungan angka pori-tegangan

6.4.7. Hubungan antara angka pori dengan tebal lapisan tanah

Misalkan suatu contoh mempunyai luas permukaan, tebal dan volume berturut-turut adalah A , H_0 dan V . Contoh tersebut diberi beban yang makin meningkat sehingga mengalami perubahan angka pori dan tebal.

Apabila volume bahan padat pada tanah adalah V_s , maka dapat diperoleh hubungan-hubungan sebagai berikut:

$$e_1 = \frac{\text{Volume rongga}}{\text{Volume bahan padat}} \dots\dots\dots 46$$

$$= \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots 47$$

$$= \frac{V - V_s}{V_s} \dots\dots\dots 48$$

$$= \frac{V}{V_s} - 1 \dots\dots\dots 49$$

$$= \frac{H_1 A}{\frac{W_s}{\gamma_s}} - 1 \dots\dots\dots 50$$

$$= \frac{H_1 A \gamma_s}{W_s} - 1 \dots\dots\dots 51$$

$$= \frac{H_1 A G_s \gamma_w}{W_s} - 1 \dots\dots\dots 52$$

$$1 + e_1 = \frac{H_1 AG_s \gamma_w}{W_s} \dots\dots\dots 53$$

$$\frac{AG_s \gamma_w}{W_s} = \frac{1 + e_1}{H_1} \dots\dots\dots 54$$

Dengan mendiferensialkan angka pori terhadap tebal lapisan (H) pada Persamaan 6.24, maka:

$$\delta e = \frac{AG_s \gamma_w}{W_s} \delta H = \frac{1 + e_1}{H_1} \delta H \dots\dots\dots 55$$

Apabila e_1 dan H_1 diketahui, maka perubahan angka pori dapat ditentukan berdasarkan perubahan tebal lapisan.

6.4.8. Hubungan antara tegangan dengan angka pori

Garis lurus pada hubungan e -log p dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$e_1 - e_2 = \text{konstanta} \times (\log p_2 - \log p_1) \dots\dots\dots 56$$

$$e_1 - e_2 = C_c (\log p - \log p_1) \dots\dots\dots 57$$

$$e_1 - e_2 = C_c \log \frac{p_2}{p_1} \dots\dots\dots 58$$

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{p_2}{p_1}} \dots\dots\dots 59$$

Pada persamaan di atas, C_c disebut indeks pemampatan, yaitu kemiringan bagian garis lurus pada kurva e -log p .

Sebagai alternatif, indeks pemampatan dapat ditetapkan berdasarkan hubungan:

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots\dots\dots 60$$

dimana LL adalah batas cair.

6.4.9. Beberapa aspek praktis mengenai konsolidasi

Apabila pengujian konsolidasi di laboratorium dilakukan terhadap contoh tidak asli, maka gradien kurva angka pori-tegangan efektif sering kali lebih terjal daripada kurva angka pori-tegangan efektif untuk tanah asli. Hal tersebut berarti bahwa apabila suatu struktur dibangun pada tanah tidak asli, maka penurunannya akan lebih besar daripada penurunan apabila dibangun pada tanah asli.

Salah satu cara yang sering diterapkan untuk menentukan "beban aman" sehingga penurunan dapat diabaikan adalah melalui pengujian beban (*loading tests*) pada permukaan yang luasnya terbatas. Namun demikian, pengujian beban skala kecil akan mengakibatkan tegangan menjadi terkonsentrasi pada beberapa puluh sentimeter bagian atas tanah. Oleh karena itu, maka pengujian tersebut dapat menyesatkan. Pengujian pembebanan, baik skala kecil maupun skala besar, tidak memperhitungkan faktor waktu yang sangat berpengaruh terhadap beralngsungnya penurunan struktur setelah beberapa tahun selesai dibangun.

Sebagian besar bangunan memerlukan pengurangan penurunan sampai nilai yang dapat diabaikan atau mempercepat penurunan sehingga sebagian besar penurunan terjadi sebelum pembangunan selesai. Dua cara yang dapat diterapkan untuk mengurangi penurunan sampai tingkat tertentu adalah:

- 1) Memperbesar luas penampang pondasi sehingga mengurangi tegangan yang bekerja pada tanah. Dalam hal tersebut, jenis pondasi rakit (*raft foundation*) mungkin lebih baik daripada pondasi setempat (*footing foundation*).
- 2) Melakukan penggalian sampai kedalaman tertentu sehingga beban akibat tanah tergali kira-kira sama dengan beban akibat bangunan.

Kecepatan penurunan dapat ditingkatkan dengan cara mengurangi jarak tempuh air. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk hal tersebut adalah dengan memasang tiang pasir (*vertikal sand drains*) berdiameter sekitar 20-30 cm (9-12 in) pada jarak sekitar 1,8-3 m (6-10 ft). Tiang pasir berdiameter 45 cm yang dipasang pada jarak kira-kira 3,6 m (12 ft) juga dapat digunakan. Pembuatan lubang dapat dilakukan dengan cara mengebor atau menyemprot (*jetting*), tergantung pada kondisi tanah dan lapangan.

Hasil pengujian di laboratorium (TRRL, 1952) terhadap dua contoh (satu contoh tanpa "tiang pasir" dan satu contoh dengan "tiang pasir") berdiameter 15 cm (6 in) dan tinggi 17,5 (7 in) menunjukkan bahwa 80 persen konsolidasi pada tanah dengan "tiang pasir" dicapai hanya dalam waktu kira-kira 2/3 hari; sedangkan pada tanah tanpa tiang pasir dicapai dalam waktu sekitar 16 hari. Pada pengujian tersebut, "tiang pasir" yang dibuat pada salah satu contoh adalah 7 buah dimana jarak tempuh rata-rata air adalah 10 mm (0,4 in).

6.4.10. Ilustrasi analisis penurunan timbunan

Misalkan perlu dihitung distribusi penurunan timbunan rencana yang terdiri atas bahan granular yang dipadatkan. Dimensi dan parameter timbunan serta tanah di bawah timbunan ditunjukkan pada Gambar 25a. Pada rencana tersebut, permukaan air tanah terletak sama dengan letak permukaan tanah.

6.4.10.1. Perhitungan penurunan

Karena timbunan terdiri atas bahan granular yang dipadatkan, maka penurunan pada timbunan dianggap kecil sehingga pada analisis ini diabaikan.

Untuk penyederhanaan, tegangan vertikal rata-rata pada setiap bidang vertikal longitudinal adalah sama dengan tegangan pada bagian tengah lapisan tanah, yaitu tegangan pada kedalaman 3,75 m.

Tegangan efektif pada kedalaman 3,75 m sebelum pembangunan timbunan adalah:

$$p_1 = 0,75(1,92 - 1) + 3(2-1) \times 0,1 = 0,376 \text{ kg/cm}^2$$

Distribusi tegangan pada kedalaman 3,75 m sebagai akibat beban timbunan dihitung dengan menggunakan tabel untuk pembebanan lajur berbentuk trapesium. Dengan demikian, beban timbunan dapat dipandang sebagai dua beban berbentuk segi tiga yang masing-masing mempunyai dasar 30 dan 15 m. Tegangan akibat beban timbunan diperoleh dengan mengurangi tegangan akibat beban segi tiga yang besar dikurangi oleh tegangan akibat beban segi tiga yang kecil.

Pada Gambar 25b ditunjukkan distribusi tegangan vertikal pada kedalaman 3,75 m sebagai akibat beban timbunan.

Distribusi penurunan dalam arah melintang akibat beban timbunan diperoleh dengan menghitung penurunan pada berbagai titik di bawah timbunan.

Perhitungan penurunan di bawah pusat timbunan adalah sebagai berikut:

- Tegangan efektif awal, $p_1 = 0,376 \text{ kg/cm}^2$

- Angka pori pada p_1 , $e_1 = 0,910$
- Tambahan tegangan akibat beban timbunan, $p_2 = 1,557 \text{ kg/cm}^2$
- Tegangan efektif total di bawah timbunan, $p_3 = 0,376 + 1,557 = 1,933 \text{ kg/cm}^2$
- Angka pori pada p_3 , $e_2 = 0,810$
- Penurunan atau perubahan tebal pada lapisan lempung adalah,

$$S = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \times 20 = \frac{0,910 - 0,810}{1 + 0,910} \times 600 = \frac{0,1 \times 20}{1,91} = 32 \text{ cm}$$

Dengan cara yang sama, selanjutnya dapat dihitung penurunan pada titik-titik yang lain, dimana hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7 dan Gambar 25c.

Tabel 7. Distribusi penurunan di bawah timbunan

BESARAN	JARAK DARI SUMBU TIMBUNAN (m)				
	0	12,5	25	37,5	50
$p_1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376
$p_2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	1,557	1,535	1,349	0,792	0,230
$p_3 = p_1 + p_2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	1,933	1,911	1,725	1,168	0,595
e_1	0,910	0,910	0,910	0,910	0,910
e_2	0,810	0,812	0,822	0,855	0,890
$e_1 - e_2$	0,100	0,098	0,088	0,055	0,020
$1 + e_1$	1,910	1,910	1,910	1,910	1,910
$S \text{ (cm)}$	32,0	31,4	28,0	17,7	6,4

6.4.10.2. Perhitungan kecepatan penurunan

Jarak tempuh air di lapangan adalah sama dengan setengah tebal lapisan lempung (3 m), karena lapisan porus terdapat pada permukaan dan dasar lapisan lempung.

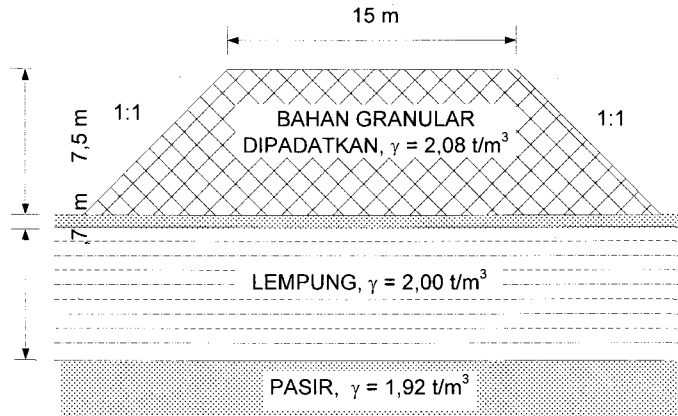
Karena jarak tempuh air di lapangan adalah 3 m (10 ft), sedangkan di laboratorium adalah 0,5 cm (0,2 in), maka perbandingan antara waktu konsolidasi di lapangan dengan waktu konsolidasi di laboratorium adalah:

$$\left(\frac{\text{Jarak tempuh di lapangan}}{\text{Jarak tempuh pada pengujian di laboratorium}} \right)^2 = \left(\frac{300}{0,5} \right)^2 = 360.000$$

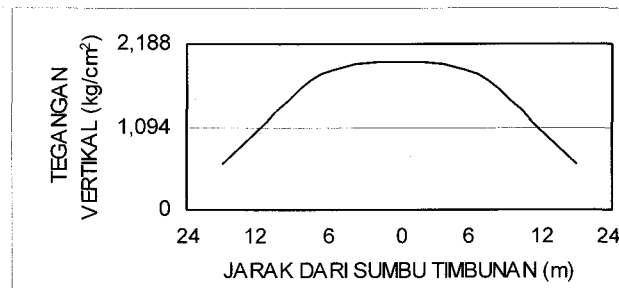
Dengan demikian, waktu untuk mencapai derajat konsolidasi tertentu, waktu konsolidasi di lapangan adalah 360.000 kali waktu konsolidasi di laboratorium; misal untuk mencapai 50 persen derajat konsolidasi di laboratorium diperlukan waktu 8 menit, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi yang sama di lapangan adalah:

$$\frac{8 \times 360.000}{60 \times 24} = 2.000 \text{ hari}$$

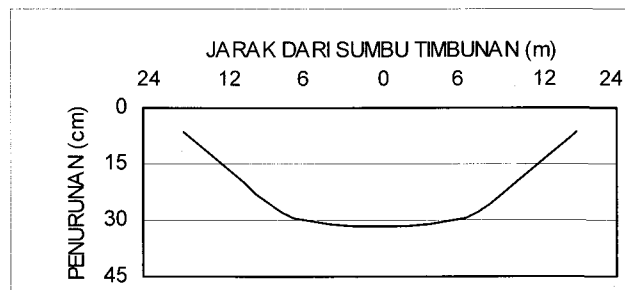
Pada Gambar 6.7d ditunjukkan hubungan antara penurunan (yang terjadi di bawah sumbu timbunan) dengan waktu yang diperlukan untuk mencapai penurunan tersebut.



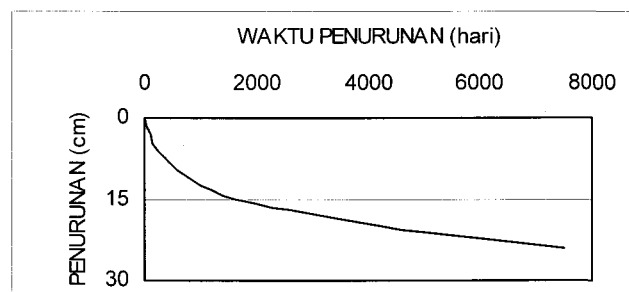
a. Dimensi timbunan



b. Tegangan vertikal



c. Distribusi penurunan



d. Penurunan di bawah sumbu timbunan

Gambar 25. Penurunan pada timbunan

6.5. Perbaikan tanah di bawah timbunan

Timbunan yang harus dibangun pada daerah rawa, terutama pada daerah rawa yang terdiri atas gambut atau tanah lain mengandung bahan organik, sering memerlukan penanganan khusus. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindarkan terjadinya keruntuhan/kerusakan

pada timbunan dan perkerasan, baik sebagai akibat konsolidasi maupun keruntuhan (*displacement*) tanah di bawah timbunan.

Untuk mengatasi persoalan di atas, beberapa cara yang umumnya diterapkan adalah sebagai berikut:

- 1) Penurunan dengan pembebanan (*gravity subsidence*).
- 2) Penggantian tanah, sebagian atau seluruhnya (penuh).
- 3) Peledakan.
- 4) Penyemprotan (*jetting*).
- 5) Pemasangan kolom pasir (*vertical sand drains*).
- 6) Pemasangan tiang dan pelat (*pile-slab*), yaitu untuk memikul timbunan.

6.5.1. Penurunan oleh beban timbunan (*gravity subsidence*)

Pada beberapa kasus, tanah timbunan dapat langsung ditempatkan pada tanah lunak dan timbunan dibiarkan turun, tanpa penanganan khusus tanah dasar. Apabila tanah pondasi mempunyai pemampatan (kompresibilitas) yang tinggi dan tahanan geser yang rendah, maka metode tersebut tidak cocok, kecuali bagi jalan yang melayani lalu-lintas sangat rendah.

Selama pelaksanaan atau dalam jangka pendek setelah pelaksanaan, akibat keruntuhan geser atau pendorongan (*displacement*) yang terjadi pada tanah pondasi, timbunan akan cepat turun, sedangkan akibat konsolidasi, penurunan akan berlangsung beberapa tahun. Pada kedua kasus tersebut, pemasangan perkerasan dipandang akan sia-sia, karena dalam jangka panjang, timbunan akan memerlukan pemeliharaan yang terus menerus (sesuai dengan berjalannya waktu, tanah harus terus ditambahkan, sampai timbunan mencapai kondisi yang stabil). Penurunan akibat konsolidasi dapat dipercepat dengan memasang lapisan pasir di bawah timbunan serta menempatkan timbunan sementara (*surcharge*).

6.5.2. Penggantian penuh

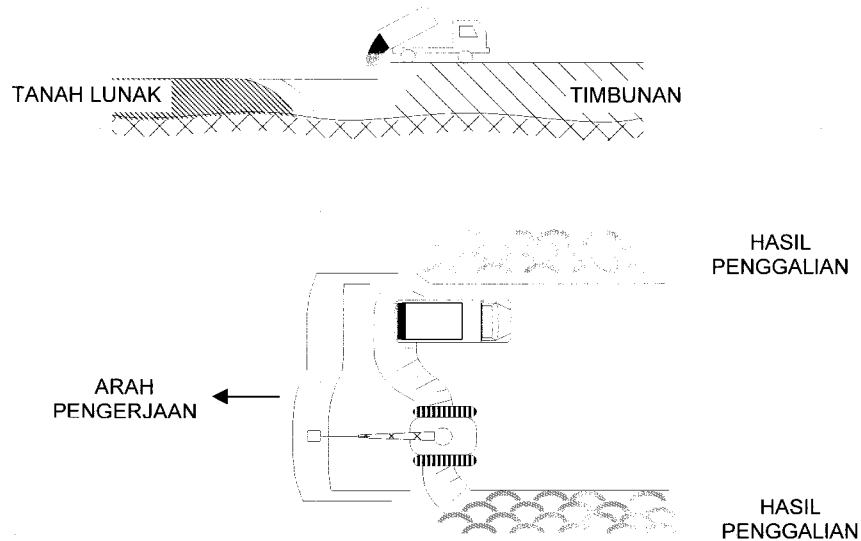
Apabila lapisan gambut tidak tebal, kurang dari 3 m, maka seluruh lapisan tanah biasanya dibuang dan diganti dengan tanah yang baik. Pada Gambar 26 ditunjukkan ilustrasi cara penggantian penuh.

Penggalian dimulai dari salah satu ujung rencana timbunan dan bergerak ke ujung yang lain. Untuk mencegah lereng galian menutup kembali, maka penimbunan harus dilakukan sesuai dengan kemajuan penggalian. Apabila pekerjaan dilakukan pada pelebaran jalan yang ada, maka penggalian pada daerah pelebaran harus sampai pada tanah yang stabil. Tanah lunak yang berada di bawah perkerasan dapat dibiarkan, karena nantinya akan dikelilingi oleh bahan pengganti.

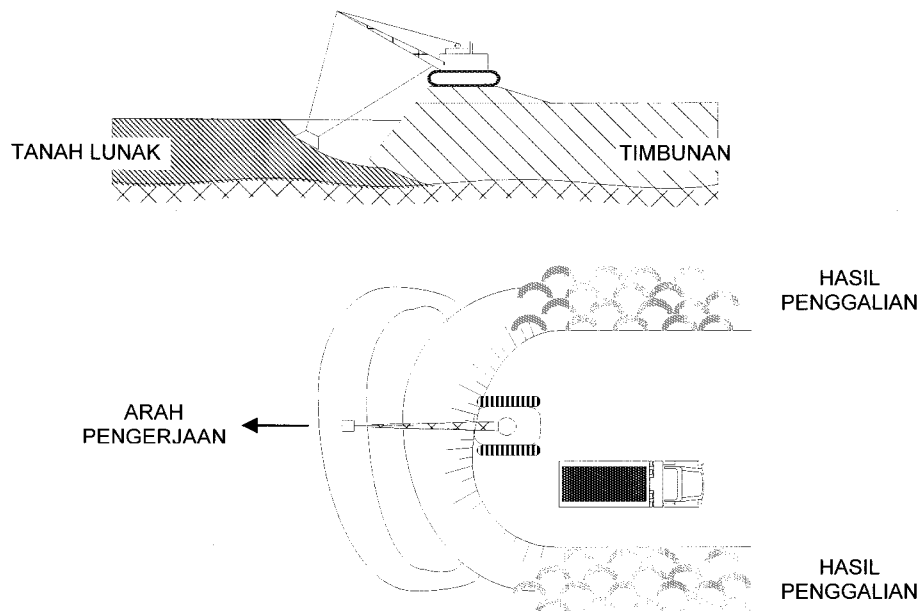
6.5.3. Penggantian sebagian

Pada beberapa kasus dimana tebal gambut lebih dari 3 m, terutama apabila bagian atas gambut terdiri atas serat atau ranting-ranting kayu sedang bagian bawahnya lunak, maka lapisan gambut biasanya digali sampai kedalaman 2,5 atau 3 m dan bagian yang lunak didesak oleh bahan timbunan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 27. Untuk mendesak bagian tanah yang lunak, dapat digunakan beban tambahan (*surcharge*) yang tingginya kira-kira 1,5 m di atas permukaan timbunan (pada beberapa pekerjaan, beban tambahan mungkin perlu dibuang, tetapi pada pekerjaan yang lain, sebagian besar bahan tambahan akan menjadi bagian timbunan).

Apabila bagian tanah yang lunak tidak dapat didesak dengan beban tambahan, maka untuk mengatasinya mungkin dapat dilakukan dengan penyemprotan sebagaimana yang diuraikan di bawah.



Gambar 26. Cara penggantian lapisan lunak dangkal



Gambar 27. Cara penggalian dan pendesakan sebagian

6.5.4. Penyemprotan (*jetting*)

Proses "penyemprotan" ("*jetting*") menyangkut pemompaan air ke tanah di bawah timbunan sehingga tanah tersebut menjadi encer dan selanjutnya akan mudah didesak oleh beban timbunan. Dengan demikian, penyemprotan dilakukan bersamaan dengan penimbunan dimana penyemprotan dapat ditempatkan di sepanjang salah satu sisi timbunan.

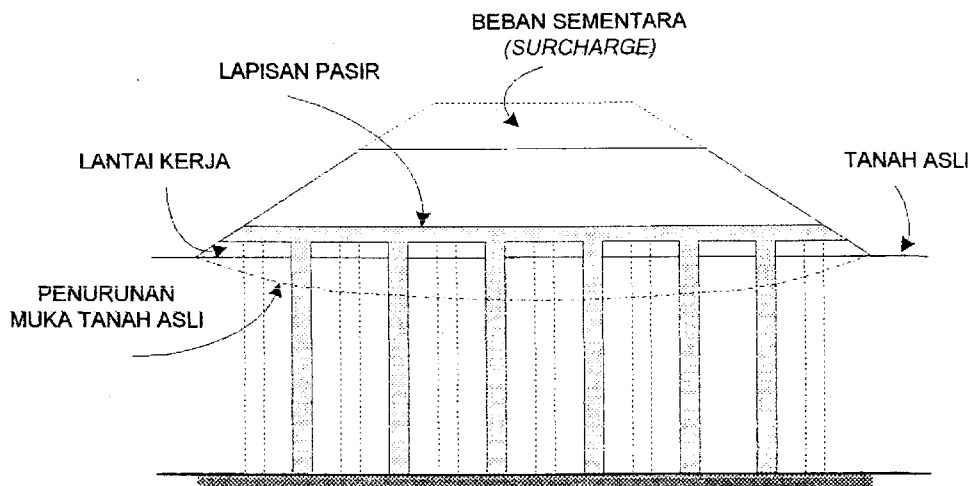
Untuk membantu pendesakan, mungkin perlu dibuat parit di salah satu atau kedua sisi timbunan. Pada beberapa kasus, tanah timbunan juga dapat disemprot; yaitu dalam rangka menambah berat timbunan.

6.5.5. Pemasangan kolom pasir (*vertical sand drain*)

Penggunaan kolom pasir untuk menangani tanah di bawah timbunan, akhir-akhir ini dipandang makin meningkat. Tujuan utama pemasangan kolom pasir adalah untuk mempercepat konsolidasi pada tanah di bawah timbunan. Pada Gambar 28 ditunjukkan skema pemasangan kolom pasir.

Pada saat konsolidasi pada tanah yang tidak dipasang kolom pasir, air hanya dapat mengalir keluar melalui permukaan (apabila tanah di bagian bawahnya kedap), atau melalui permukaan dan dasar (apabila tanah di bawahnya porus). Apabila lapisan tanah di bawah pondasi tebal (lintasan air panjang), maka penurunan akibat konsolidasi dapat berlangsung beberapa tahun. Dengan dipasangnyanya kolom pasir maka konsolidasi dapat berlangsung cepat, karena air menjadi pendek.

Kolom pasir biasanya mempunyai diameter yang berkisar antara 20 sampai 45 cm dengan jarak dari sumbu ke sumbu berkisar antara 1,8 sampai 3,0 m; sedangkan tebal lapisan pasir umumnya berkisar antara 0,9 sampai 1,5 m.



Gambar 28. Skema konstruksi kolom pasir

6.6. Pemilihan bahan timbunan

Agar pembangunan timbunan ekonomis dan stabil serta mempunyai penurunan dalam batas yang diterima, sering kali perlu dilakukan pemilihan bahan timbunan. Oleh karena itu, pengelompokan tanah menjadi tanah "baik" dan "tidak baik" atau menjadi tanah "dapat diterima" dan "tidak dapat diterima" biasanya dilakukan pada tahap disain, perencanaan dan pelaksanaan. Faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan dalam menetapkan kriteria mutu bahan (dan implikasi ekonomi) adalah sama dengan faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan pada disain timbunan.

Secara umum, parameter yang biasa digunakan untuk menyatakan mutu tanah kohesif adalah kadar air, batas Atterberg, kekuatan dan parameter pemadatan. Dengan diterapkannya spesifikasi metoda pada pekerjaan pemadatan, ada kemungkinan parameter pemadatan menjadi kurang populer.

Cara yang paling sering digunakan untuk menyatakan mutu tanah kohesif adalah dengan cara menghubungkan kadar air dengan batas plastis. Secara tipikal, batas atas kadar air yang dipandang baik adalah berkisar antara 1,1 sampai 1,3 kali batas plastis. Namun demikian, hubungan tersebut dipandang kurang sesuai dengan keperluan praktis, karena pengujian batas plastis memerlukan waktu yang cukup lama dan hasilnya kadang-kadang

kurang akurat. Disamping itu, batas plastis bukan indikator terpercaya bagi kekuatan yang akan menentukan stabilitas timbunan dan kemampuan melayani lalu-lintas. Kenyataan tersebut telah mendorong penggunaan *undrained shear strength* sebagai kriteria mutu tanah kohesif. Secara tipikal, batas bawah kekuatan geser berkisar antara 0,35 -i 0,50 kg/cm².

Untuk menjamin diperolehnya kepadatan, mutu tanah berbutir biasanya dinyatakan dengan kadar air maksimum dan minimum dalam hubungannya dengan kadar air optimum. Kriteria kekuatan (sudut geser dalam atau CBR) biasanya ditetapkan pula.

Disamping kriteria di atas, terdapat kriteria lain yang dapat digunakan untuk menyatakan mutu tanah. Tanah dianggap jelek apabila,

- a. Tanah mengandung bahan organik yang dapat membusuk.
- b. Tanah yang mudah terbakar.
- c. Tanah terdiri atas lempung sangat plastis yang mempunyai karakteristik penyusutan/pengembangan besar.
- d. Tanah yang secara kimia atau fisik berbahaya.

Kriteria mutu dapat disesuaikan dengan tuntutan ekonomi suatu proyek. Contoh, apabila dalam pelaksanaan diperoleh surplus tanah yang baik, maka dapat diterapkan kriteria yang lebih ketat, yaitu untuk menjamin digunakannya tanah terbaik.

Sebagai akibat cuaca yang jelek atau perlakuan selama dan sesudah pelaksanaan, tanah dapat dinyatakan sebagai tanah "jelek". Beberapa jenis tanah, misal kapur (*chalks*), pasir, lanau dan lempung, yang mempunyai kadar air di atas kadar air optimumnya sangat mudah mengalami penurunan mutu.

Tanah hasil galian perlu dihampar dan dipadatkan secepatnya. Untuk mempercepat pengaliran air yang tidak mengakibatkan erosi, permukaan timbunan harus diratakan dan dibentuk. Selama periode hujan yang terus menerus, pekerjaan tanah tidak boleh dilakukan.

Satu atau beberapa jenis tanah timbunan yang berbeda dari jenis tanah untuk timbunan secara umum mungkin diperlukan. Tanah tersebut sering disebut tanah "husus" atau "terpilih"; contoh, batuan urugan (*rock fill*), tanah porus (*free draining materials*), tanah untuk lapisan drainase, tanah lantai kerja (*capping layers*) dan tanah bertulang (*reinforced earth*), tanah bebutir untuk struktur serta lempung untuk inti bendung. Bahan tersebut umumnya lebih baik daripada tanah untuk sebagian besar timbunan serta harus memenuhi kriteria dasar dan kriteria khusus. Pada pekerjaan tanah tertentu (misal pembangunan timbunan untuk rekreasi atau lanskap, mungkin dapat atau perlu digunakan tanah yang dianggap "jelek".

6.7. Pengerjaan timbunan

Setelah dilakukan perbaikan tanah pondasi (jika diperlukan), timbunan dibangun melalui penghamparan tanah lapis demi lapis. Masing-masing lapisan kemudian dipadatkan sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan. Tabel lapisan padat biasanya berkisar antara 10 cm sampai 30 cm, tergantung pada jenis tanah dan jenis alat pemadat yang digunakan.

Apabila timbunan dibangun (dalam arah melintang) pada lereng atau berdampingan dengan timbunan yang sudah ada, atau dibangun setengah bagian setengah bagian, maka lereng asli pada arah bukit, atau lereng timbunan lama, atau lereng setengah bagian yang baru harus dipotong secukupnya untuk menampung lebar mesin pemadat. Tanah hasil pemotongan harus diurugkan kembali dan dipadatkan bersama-sama dengan tanah urugan yang baru.

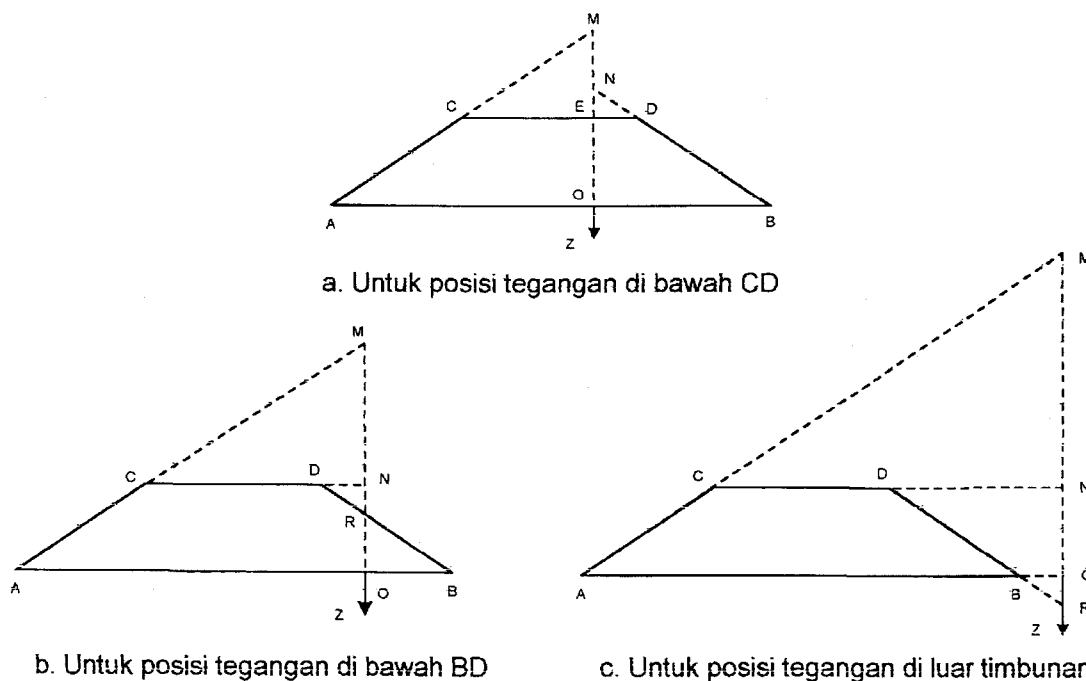
Bagian atas timbunan setebal 30 cm biasanya disyaratkan harus mempunyai kepadatan 100 persen (terhadap berat isi kering maksimum hasil pengujian kepadatan ringan), sedangkan bagian bawahnya disyaratkan mempunyai kepadatan 95 persen (untuk timbunan tinggi yang mungkin akan mengalami densifikasi, persyaratan ini mungkin perlu ditinjau).

6.8. Tegangan vertikal di bawah timbunan

Sebagaimana ditunjukkan pada contoh di muka, untuk menghitung penurunan akibat konsolidasi pada tanah di bawah timbunan diperlukan besarnya tegangan vertikal pada berbagai kedalaman. Tegangan tersebut biasanya dihitung berdasarkan teori Boussinesq dengan memperhatikan geometri beban. Sesuai dengan bentuk umum timbunan untuk jalan raya, tegangan di bawah timbunan dihitung berdasarkan beban trapesium. Apabila timbunan cukup lebar, maka tegangan di bawah sumbu timbunan akibat beban trapesium dapat dihitung berdasarkan beban segi empat, sedangkan tegangan pada berbagai posisi arah melintang dapat dihitung berdasarkan kombinasi beban segi empat dan beban segi tiga atau hanya berdasarkan beban segi tiga saja, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 29.

Kombinasi beban segi tiga untuk mengganti beban trapesium adalah sebagai berikut:

- Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan vertikal di bawah CD, Beban OAM + Beban OBN - Beban GEM - Beban DEN
- Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan vertikal di bawah BD, Beban OAM + Beban OBR - Beban CMN - Beban DNR
- Kombinasi pembebanan untuk menghitung tegangan vertikal di luar timbunan, Beban OAM + Beban OBR - Beban GMN - Beban DNR



Gambar 29. Kombinasi beban segi tiga sebagai pengganti beban trapesium (Sumber: Baker, 1960)

Sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 30, tegangan vertikal (σ_z) di bawah titik sudut siku-siku dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

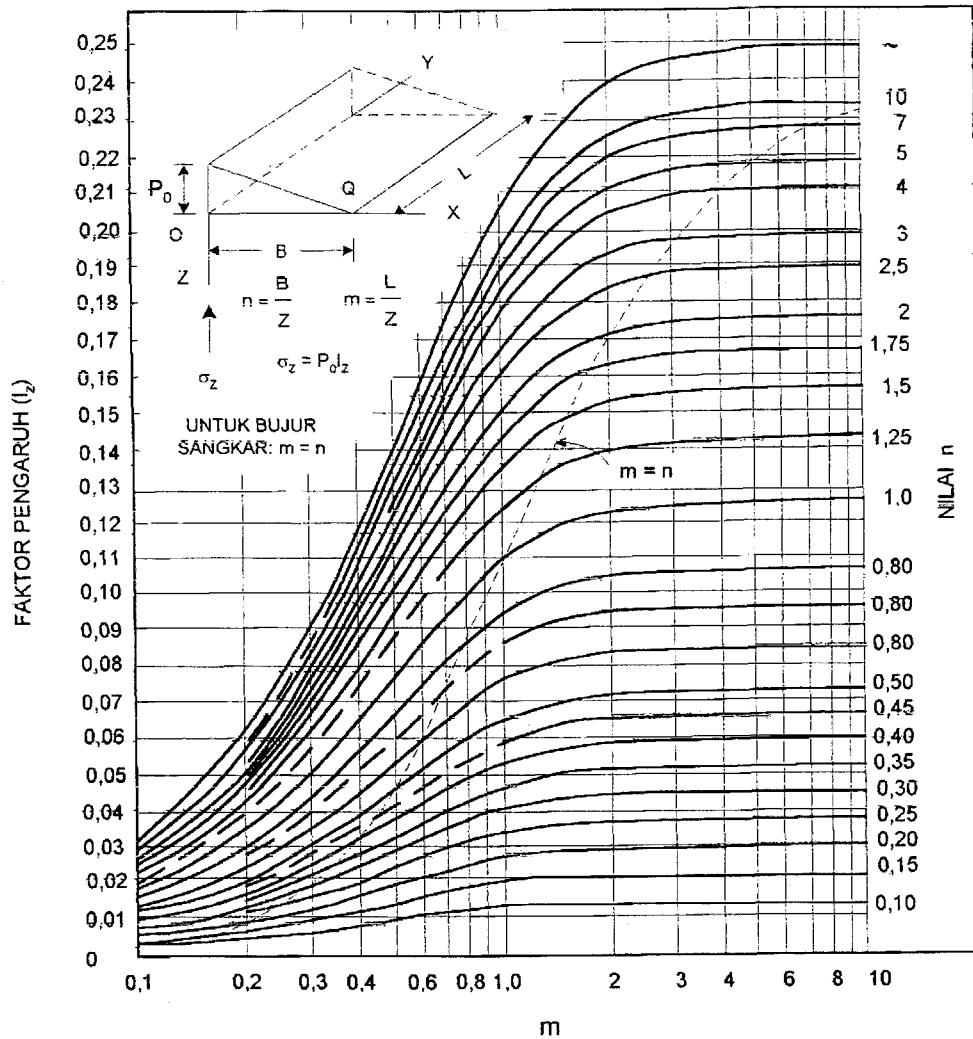
$$\sigma_z = P_0 \times I_z$$

dimana :

P_0 adalah beban maksimum pada beban segitiga,

I_z adalah faktor tegangan yang diperoleh berdasarkan Gambar 30.

Apabila timbunan berbentuk segi empat, maka tegangan vertikal pada berbagai titik di bawah timbunan dapat dihitung berdasarkan kombinasi beberapa buah beban segi empat, dimana tegangan vertikal di bawah salah satu sudut segi empat ditunjukkan pada Gambar 31.



Gambar 30. Grafik tegangan vertikal akibat beban segi tiga
(Sumber: Baker, 1960)

berarti, namun tanah di bawah timbunan kemungkinan tetap akan mengalami pemampatan (konsolidasi). Tanah dasar dan lapis pondasi yang dipadatkan seksama akan tahan deformasi dan tidak mudah dipengaruhi air, disamping mempunyai kekuatan yang tinggi.

Pemadatan merupakan aspek penting dalam pekerjaan tanah untuk timbunan struktural (*structural embankment*), misal pada pembangunan jalan atau waduk. Dengan demikian, maka tujuan pemadatan adalah:

- Meningkatkan kekuatan.
- Memperkecil pemuaian dan penyusutan akibat penyerapan atau pengurangan kadar air.
- Memperkecil kemungkinan pemampatan atau penurunan akibat densifikasi.
- Menurunkan permeabilitas.

Apabila dibebani, tanah yang tidak dipadatkan akan mudah menurun (*settle*) dan selanjutnya akan mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk terjadinya perubahan kadar air pada tanah timbunan. Akibat pembebanan, kondisi tersebut selanjutnya akan mengakibatkan timbunan mengalami penurunan yang besar dan kehilangan kekuatan.

7.2. Teori pemadatan

Tanah terdiri atas tiga bagian sebagai berikut:

- a. Butir-butir padat
- b. Air
- c. Udara

Tanah yang tidak mengandung udara disebut tanah jenuh, sedangkan tanah yang tidak mengandung air disebut tanah kering.

Sebagaimana disebutkan di atas, pemadatan merupakan suatu proses dimana butir-butir tanah dipaksa secara mekanis menjadi lebih kompak melalui pengurangan rongga udara. Derajat kepadatan yang bisa diperoleh tergantung pada usaha pemadatan (*compactive effort*), kepadatan awal, kandungan air dan kandungan udara.

Komposisi masing-masing bagian tanah dapat dihitung menurut konsep sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 32. Berdasarkan konsep tersebut, hasil pemadatan biasa dinyatakan dengan berat isi kering dan kadar air. Untuk keperluan praktis, berat jenis tanah selama pemadatan dianggap tetap.

Untuk satu satuan volume tanah, hubungan antara parameter-parameter tanah untuk keperluan analisis pemadatan adalah sebagai berikut:

$$\begin{array}{ll} \text{▪ Kadar air (w), \%} & = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \dots\dots\dots 61 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{▪ Berat isi basah } (\gamma) & = \frac{W}{V} \dots\dots\dots 62 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{▪ Berat isi kering } (\gamma_d) & = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma}{100 + w} \dots\dots\dots 63 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{▪ Rongga udara } (V_a), \% & = \frac{V_a}{V} \times 100 = \left[1 - \frac{\gamma_d}{G_s} \left(\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100} \right) \right] \times 100 \dots\dots\dots 64 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{▪ Berat isi kering pada berbagai persentase rongga udara} & \\ (\gamma_d) = \frac{(100 - V_a) G_s}{(100 + w G_s)} \dots\dots\dots 65 \end{array}$$

- Berat isi kering pada berbagai derajat kejenuhan (S_r)

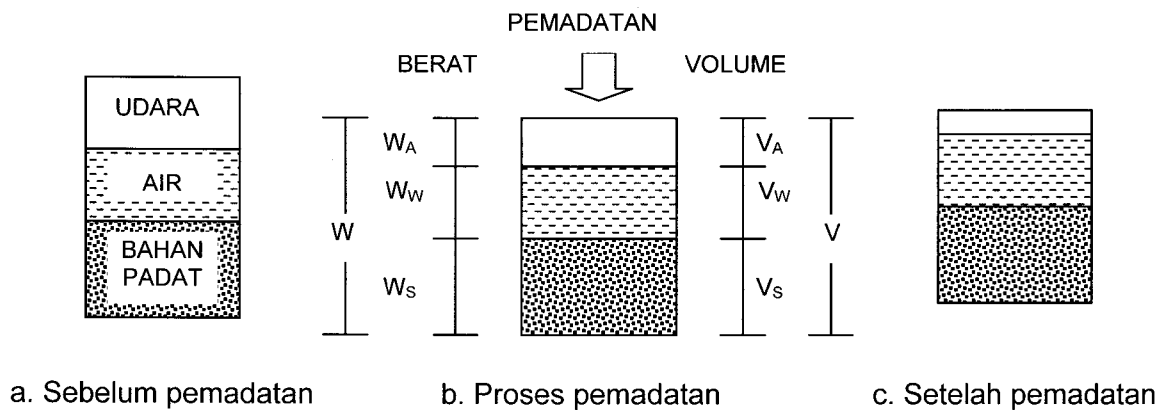
$$(\gamma_d) = \frac{S_r G_s}{(100 + w G_s)} \dots\dots\dots 66$$

- Berat isi kering pada derajat kejenuhan 100%

$$(\gamma_d) = \frac{100 G_s}{(100 + w G_s)} \dots\dots\dots 67$$

Pada persamaan di atas, G_w dan G_s adalah berat jenis air dan berat jenis butiran tanah.

Berat isi kering yang ditunjukkan pada persamaan di atas merupakan parameter utama yang biasa digunakan untuk menyatakan hasil akhir pemadatan.

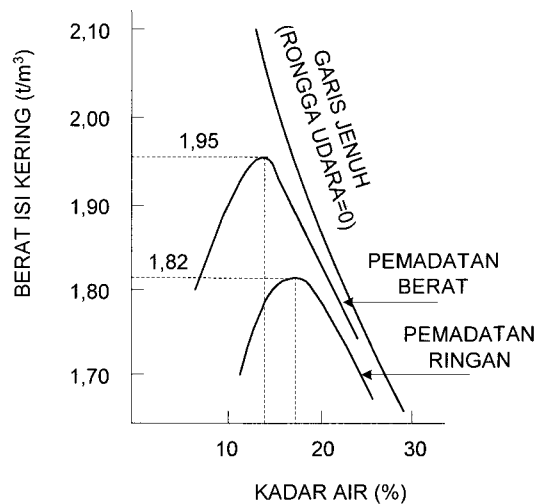


Gambar 32. Skema bagian-bagian tanah

Apabila tanah dipadatkan dengan alat pemadat tertentu pada berbagai kadar air, maka tanah akan mempunyai berat isi kering yang tergantung pada kadar air tersebut. Apabila berat alat pemadat ditingkatkan, maka berat isi kering akan meningkat pula. Penomomena tersebut diilustrasikan pada Gambar 33.

Pada Gambar 33 terlihat bahwa pada kadar air tertentu, berat isi kering yang diperoleh mempunyai nilai yang maksimum. Dalam hal tersebut, kadar air yang menghasilkan berat isi kering maksimum disebut kadar air optimum.

Tanah kohesif umumnya mempunyai kepadatan maksimum yang lebih rendah dan kadar air optimum yang lebih tinggi daripada tanah berbutir. Sebagai ilustrasi, pada Tabel 8 ditunjukkan perbandingan antara berat kering maksimum dan kadar air optimum berbagai jenis tanah berdasarkan dua tingkat daya pemadatan.



Gambar 33. Hubungan kadar air dengan berat isi kering

Tabel 8. Kadar air optimum dan berat isi kering maksimum beberapa jenis tanah
(Sumber: Horner, 1988)

JENIS TANAH	METODA PENGUJIAN	KADAR AIR OPT. (%)	BIK MAKS. (t/m ³)
▪ Lempung berat	Ringan (2,5 kg)	26	1,47
	Berat (4,5 kg)	18	1,87
▪ Lempung kelanauan	Ringan (2,5 kg)	21	1,57
	Berat (4,5 kg)	12	1,94
▪ Lempung kepasiran	Ringan (2,5 kg)	13	1,87
	Berat (4,5 kg)	11	2,05
▪ Lempung kelanauan mengandung kerikil	Ringan (2,5 kg)	17	1,74
	Berat (4,5 kg)	11	1,92
▪ Pasir seragam	Ringan (2,5 kg)	17	1,69
	Berat (4,5 kg)	12	1,84
▪ Pasir kekerikilan atau kerikil kepasiran	Ringan (2,5 kg)	8	2,06
	Berat (4,5 kg)	8	2,15
▪ Kerikil kepasiran mengandung lempung	Ringan (2,5 kg)	11	1,90
	Berat (4,5 kg)	-	-

7.3. Faktor-faktor yang mempengaruhi berat isi kering

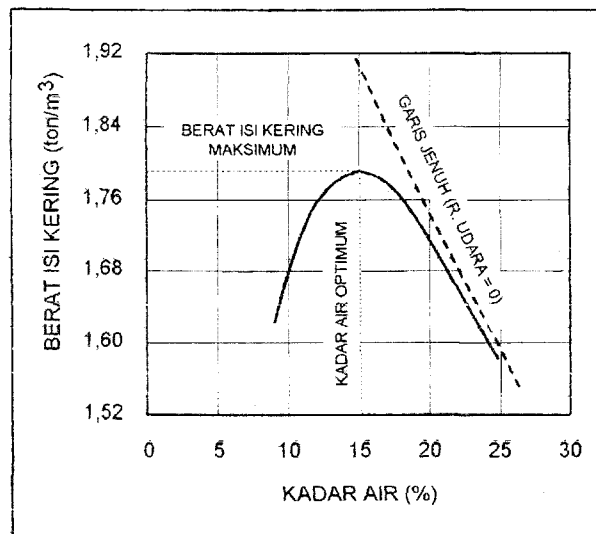
Dengan memperhatikan fenomena yang disebutkan pada Butir 7.2, maka berat isi kering suatu jenis tanah hasil pemadatan tergantung pada dua faktor utama, yaitu daya pemadatan dan kadar air.

7.3.1. Kadar air

Tanah yang mempunyai kandungan air rendah berada dalam keadaan keras sehingga sulit dipadatkan; oleh karena itu, tanah tersebut mempunyai berat isi kering yang rendah dengan kandungan udara yang tinggi. Apabila kandungan air makin tinggi, maka air akan berfungsi sebagai pelumas bagi butir-butir tanah sehingga tanah mudah dipadatkan. Hal tersebut menghasilkan berat isi kering yang tinggi dengan kandungan udara yang rendah. Pada tanah yang mempunyai kandungan udara yang rendah, kombinasi air dan udara cenderung menahan pergerakan lebih lanjut butir-butir tanah sehingga kandungan udara sulit berkurang lagi. Dengan penambahan air lebih lanjut, volume total rongga (volume udara dan volume air)

akan meningkat sejalan dengan meningkatnya kandungan air sehingga berat isi kering tanah makin menurun.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 34, kurva kadar air-berat isi kering di sebelah kanan puncak kurva makin mendekati garis jenuh (kurva hubungan teoritis antara kadar air dengan berat-isi kering tanpa kandungan udara), namun tidak akan pernah bersentuhan, karena udara dalam tanah tidak mungkin seluruhnya dapat dikeluarkan.



Gambar 34. Pengaruh kadar air terhadap berat isi kering

7.3.2. Daya pemadatan

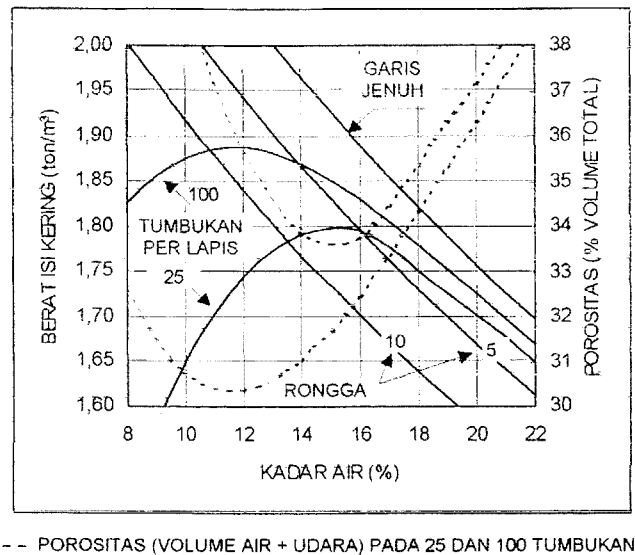
Untuk semua jenis tanah dan semua metoda pemadatan, peningkatan daya pemadatan (energi per satuan berat tanah) akan menghasilkan peningkatan berat isi kering maksimum dan penurunan kadar air optimum sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 35.

Pengujian pemadatan yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 35 dilakukan terhadap lempung kepasiran (batas cair = 29%, indeks plastis = 7%). Pemadatan dilakukan dalam tiga lapis dimana masing-masing lapis dipadatkan sebanyak 25 dan 100 tumbukan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pemadatan pada kadar air di atas kadar air optimum (rongga udara kecil), penambahan daya pemadatan tidak mengakibatkan peningkatan berat isi kering yang berarti; sebaliknya, pada kadar air di bawah kadar air optimum (rongga udara besar), penambahan daya pemadatan dapat mengakibatkan peningkatan berat isi kering yang besar.

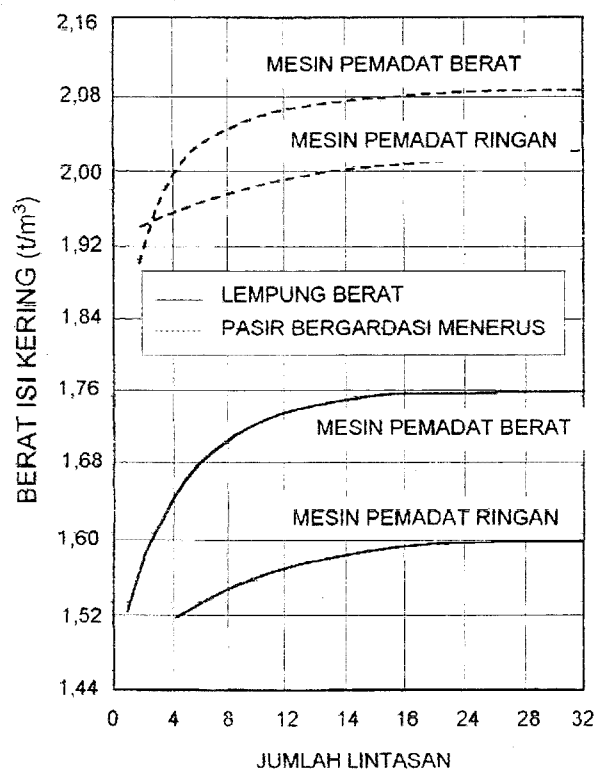
Pada Gambar 36 (Krebs, 1971) ditunjukkan hasil percobaan pemadatan lempung dan pasir dengan menggunakan mesin pemadat roda karet. Pemadatan dengan mesin pemadat berat (tekanan ban = 140 psi) dilakukan terhadap lapisan lepas yang tebalnya 30 cm, sedangkan pemadatan dengan mesin pemadat ringan (tekanan ban = 36 psi) dilakukan terhadap lapisan yang tebalnya 15 cm. Pada percobaan tersebut, kadar air pemadatan adalah di sekitar kadar air optimum, dimana kadar air pemadatan dengan mesin pemadat berat adalah sedikit lebih rendah daripada kadar air pemadatan dengan mesin pemadat ringan. Pada Gambar 36 terlihat bahwa penambahan jumlah lintasan pada awal pemadatan meningkatkan berat isi kering secara nyata; sedangkan penambahan jumlah lintasan setelah jumlah lintasan tertentu tidak meningkatkan berat isi kering yang cukup nyata bahkan selanjutnya dapat diabaikan.

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 36 adalah, efektifitas pemadatan sangat tergantung pada tekanan roda mesin pemadat. Disamping itu, penambahan jumlah lintasan setelah jumlah lintasan tertentu tidak menunjukkan hasil yang efektif.

Hasil percobaan lain (Krebs, 1971) menyimpulkan bahwa mesin pemadat getar cocok untuk pemadatan tanah granular dengan lapisan yang cukup tebal.



Gambar 35. Hasil pengujian pemadatan lempung kepasiran (Sumber: TRRL, 1952)



Gambar 36. Pengaruh daya pemadatan terhadap berat isi kering (Sumber: Krebs, 1971)

7.4. Pengaruh berat isi kering terhadap sifat-sifat tanah

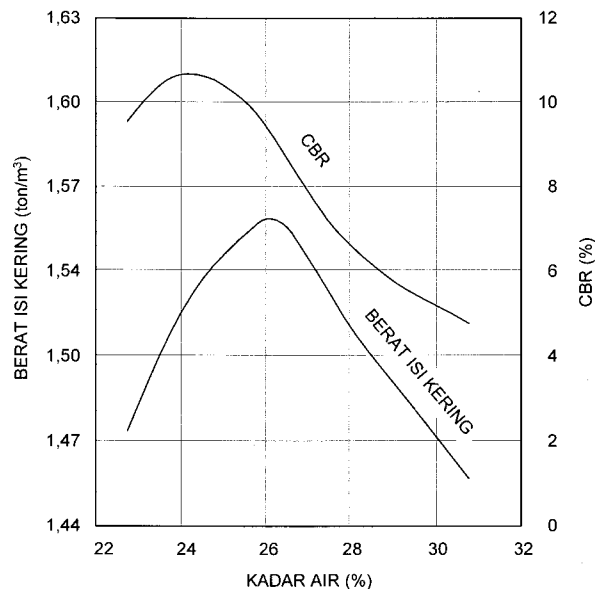
Pada Butir 7.1 disebutkan bahwa tujuan pemadatan adalah untuk meningkatkan kekuatan, mengurangi pemuaian dan penyusutan, memperkecil penurunan akibat densifikasi serta menurunkan permeabilitas.

Di bawah ditunjukkan pengaruh kepadatan (berat isi kering) terhadap kekuatan, pemuaian dan penyusutan tanah, penurunan akibat densifikasi, serta permeabilitas.

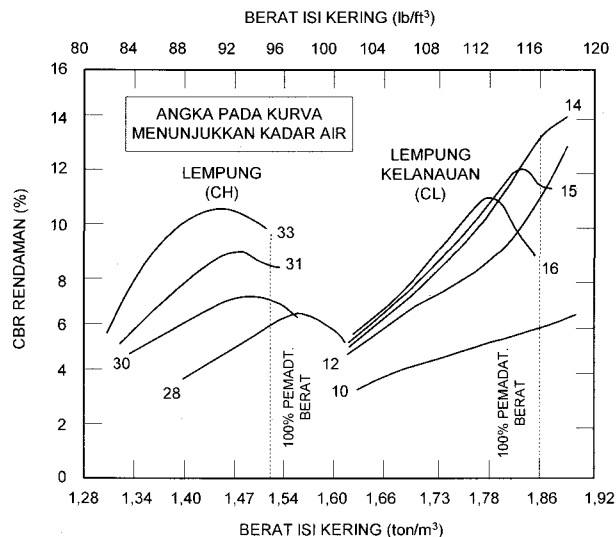
7.4.1. Pengaruh berat isi kering terhadap kekuatan

Pada Gambar 37 ditunjukkan pengaruh berat isi kering dan kadar air terhadap CBR untuk lempung berat yang diperoleh berdasarkan pengujian pemadatan ringan, sedangkan pada Gambar 38 ditunjukkan pengaruh berat isi kering hasil pemadatan dengan cara tumbuk (*impact*) terhadap CBR rendaman.

Gambar 37 menunjukkan bahwa kurva CBR mirip dengan kurva kadar air-berat isi kering, dimana CBR maksimum dicapai pada kadar air di bawah kadar air optimum. Hal tersebut menunjukkan bahwa ditinjau dari kekuatan maksimum, tanah harus dipadatkan pada kadar air di bawah kadar air optimum. Namun demikian, karena rongga udara pada kadar air tersebut relatif lebih besar daripada rongga udara pada kadar air optimum, maka tanah cenderung mudah menyerap air. Oleh karena itu, kondisi akhir tanah dapat lebih jelek daripada kondisi tanah yang dipadatkan pada kadar air optimum.



Gambar 37. Hubungan kadar air dengan berat isi kering dan CBR (Sumber: TRRL, 1952)



Gambar 38. CBR pada berbagai berat isi kering dan kadar air (Sumber: Yoder, 1975)

Pada Gambar 38 terlihat bahwa untuk lempung dengan berat isi kering sama, CBR meningkat sesuai dengan meningkatnya kadar air, sedangkan akibat peningkatan berat isi kering, CBR mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun. Penomena tersebut terkait dengan tegangan air pori pada tanah jenuh dimana tanah dipadatkan dengan cara dinamis. Contoh, pada 28 persen kadar dan 1,60 ton/m³ berat isi kering tanah menjadi tidak stabil, karena sebagian beban dipikul oleh air pori. Situasi yang mirip terjadi pula pada tanah lempung kelanauan, tetapi dengan derajat yang lebih rendah. Untuk tanah yang dipadatkan secara statis (digilas), penomena tersebut tidak terjadi.

7.4.2. Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan penyusutan

Pada Gambar 39 ditunjukkan pengaruh berat isi kering dan kadar air terhadap pemuaian (*swelling*) dan CBR untuk lempung kelanauan tipikal.

Gambar 39 menunjukkan bahwa CBR merupakan fungsi berat isi kering dan kadar air. Dalam hal tersebut, CBR tidak direndam umumnya makin menurun sejalan dengan makin meningkatnya kadar air. Namun demikian, setelah contoh direndam dalam air selama 4 hari kurva CBR mirip dengan kurva berat isi kering. Adanya nilai maksimum CBR rendaman adalah sebagai akibat terjadinya penyerapan air oleh contoh yang kemudian mengakibatkan terjadinya pemuaian. Beberapa jenis tanah yang dipadatkan pada kadar air yang relatif rendah akan memuai lebih besar (yang kemudian mengakibatkan hilangnya kekuatan) daripada tanah yang dipadatkan pada kadar air yang lebih tinggi. Meningkatnya kadar air sampai kira-kira kadar air optimum mengakibatkan menurunnya pemuaian secara cepat, sedangkan meningkatnya kadar air setelah kadar air optimum tidak mengakibatkan penurunan pemuaian yang berarti, bahkan dapat dikatakan tidak terjadi pemuaian. Penomena tersebut menunjukkan bahwa pemadatan tanah yang mempunyai potensi pemuaian perlu dilakukan pada kadar air di sekitar atau sedikit di atas kadar air optimum.

Penyerapan dan pengurangan air oleh tanah kohesif (lempung kepasiran) diilustrasikan pula dengan hasil pengkajian yang ditunjukkan pada Gambar 40 (TRRL, 1952). Pada pengkajian tersebut, dibuat empat pasang benda uji dimana masing-masing pasangan mempunyai berat isi kering dan kadar air yang sama dengan berat isi kering dan kadar air hasil pengujian pemadatan ringan. Untuk masing-masing pasangan, satu buah benda uji dikeringkan dan satu buah lagi dibasahkan. Pada Gambar 40, garis kadar air-berat isi kering hasil pengeringan benda uji ditunjukkan dengan "garis penuh", sedangkan kadar air dan berat isi kering hasil pengeringan benda uji ditunjukkan dengan "garis putus-putus".

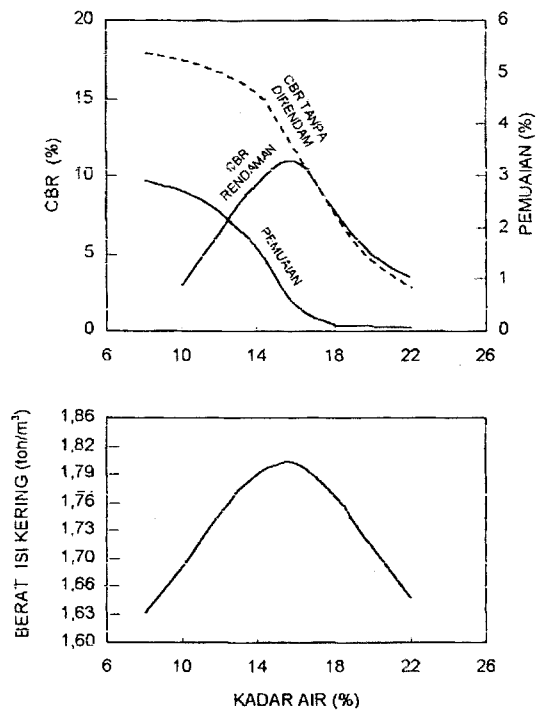
Pada Gambar 40 terlihat bahwa garis kadar air-berat isi kering akibat pengeringan dan pembasahan adalah menerus. Disamping itu, terlihat pula bahwa garis Kadar air-berat isi kering cenderung menurun tajam sejalan dengan makin menurunnya rongga udara. Dari keempat pasang bendas uji, benda uji yang dibuat pada kondisi hampir jenuh mempunyai perubahan volume yang maksimum (ditunjukkan oleh perubahan berat isi kering), meskipun penyerapannya adalah minimum. Meskipun benda uji dengan rongga besar mempunyai perubahan volume yang lebih kecil, namun setelah dijenuhkan, benda uji tersebut mempunyai berat isi kering yang lebih rendah serta kadar air yang lebih besar daripada benda uji dengan rongga kecil.

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari pengkajian di atas adalah, tanah yang pada masa pelayanannya mempunyai potensi menyerap air seyogyanya tidak dipadatkan pada kadar air di bawah kadar air optimum.

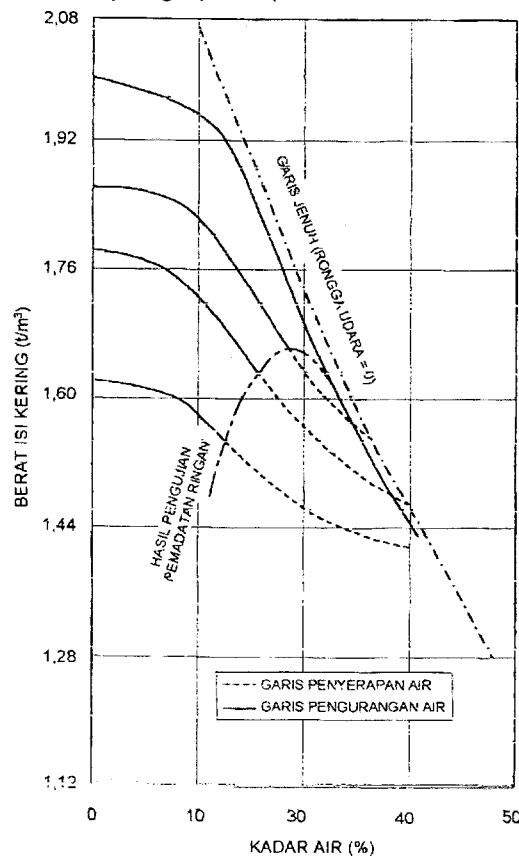
7.4.3. Pengaruh berat isi kering terhadap penurunan

Karena terkait dengan kepadatan, pada butir ini diuraikan kembali pengaruh kepadatan terhadap penurunan (densifikasi).

Derajat kepadatan yang dicapai pada saat pembangunan timbunan akan mempengaruhi terjadinya penurunan di kemudian hari. Hal tersebut diilustrasikan dengan hasil pengukuran beberapa timbunan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 41 (TRRL, 1952).



Gambar 39. Pengaruh berat isi kering terhadap CBR dan pemuaian untuk lempung tipikal (Sumber: Yoder, 1975)



Gambar 40. Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan penyusutan (Sumber: TRRL, 1952)

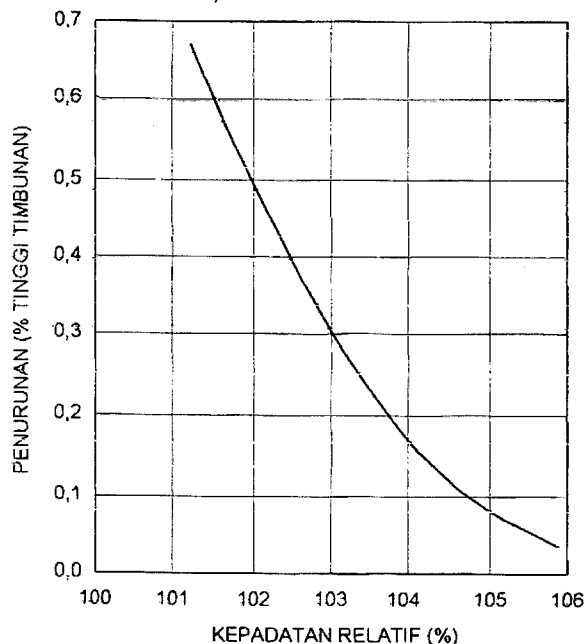
Gambar 41 merupakan hasil pengukuran timbunan yang mempunyai tinggi antara 2 sampai 4,5 m (7 sampai 15 ft), terdiri atas lempung kelanauan (batas cair rata-rata 37% dan batas plastis rata-rata 21%) serta berumur 3 tahun.

Pada saat pembangunan timbunan, kadar air optimum rata-rata adalah 18% dan berat isi kering rata-rata adalah $1,73 \text{ t/m}^3$ (108 lb/ft^3).

Pada Gambar 41 terlihat bahwa penurunan makin mengecil sejalan dengan makin meningkatnya kepadatan relatif (perbandingan antara berat isi kering lapangan dikurangi berat isi kering lepas terhadap berat isi kering maksimum hasil pengujian pemadatan ringan dikurangi berat isi kering lepas).

Kesimpulan kasar (TRRL, 1952) yang diperoleh dari pengkajian penurunan timbunan di lapangan adalah:

- Timbunan yang terdiri atas tanah kapur (*chalk*) dan dipadatkan secara ringan, setelah 5 sampai 7 tahun, mengalami penurunan sekitar 0,4 sampai 1,1% terhadap tinggi awal timbunan. Timbunan yang dipadatkan lebih baik mengalami penurunan sekitar 0,2%.
- Timbunan yang terdiri atas lempung dan dipadatkan secara ringan, setelah 5 sampai 7 tahun, mengalami penurunan sekitar 1,1 sampai 1,9%. Timbunan yang dipadatkan lebih baik mengalami penurunan sekitar 0,2%.

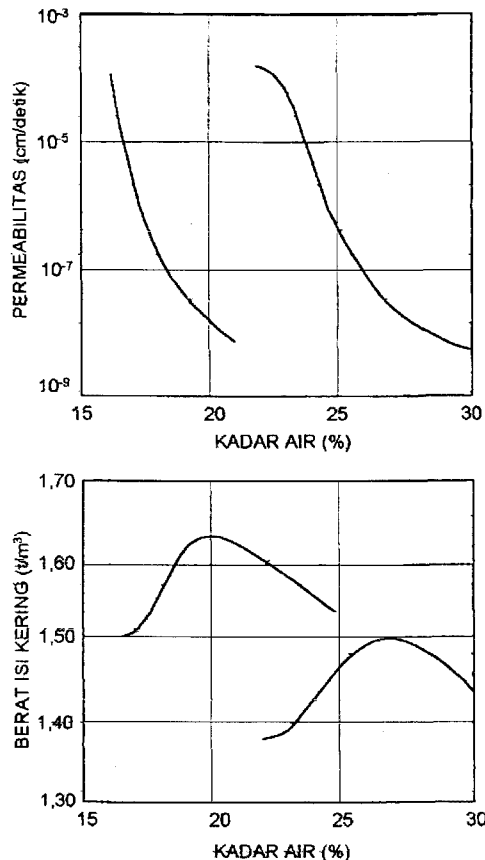


Gambar 41. Pengaruh kepadatan terhadap penurunan
(Sumber: TRRL, 1952)

7.4.4. Pengaruh berat isi kering terhadap permeabilitas

Permeabilitas mempunyai potensi untuk menimbulkan persoalan dalam pembangunan jalan, karena terkait dengan tekanan air pori dan aliran air rembesan (*seepage flow*). Tekanan air pori dapat mengakibatkan longsor pada pekerjaan tanah, sedangkan aliran air rembesan dapat menimbulkan bobolnya tanggul. Disamping itu, di daerah dimana hujan terjadi secara berselang, permeabilitas sering merupakan sumber persoalan pada saat pelaksanaan. Hal tersebut dikarenakan pada lokasi yang tanahnya terdiri atas lempung kedap dapat terbentuk genangan air yang akan menimbulkan persoalan drainase dan penurunan kekuatan tanah. Bagi ahli jalan raya, lapis perkerasan yang permeabilitas rendah dapat mengakibatkan terkelupasnya lapis beraspal.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 42, pemadatan lempung kering yang kurang memadai cenderung mengakibatkan permeabilitas yang tinggi, karena gumpalan tanah kering akan menahan daya pemadatan sehingga antara gumpalan-gumpalan tersebut masih terdapat rongga yang besar. Rongga yang besar dapat terjadinya juga sebagai akibat pembilasan tanah. Permeabilitas yang rendah biasanya terkait dengan tanah yang mempunyai kandungan lempung tinggi. Pemadatan tanah basah akan menghasilkan permeabilitas yang rendah, karena tanah basah mudah berubah bentuk sehingga rongganya menjadi kecil.



Gambar 42. Pengaruh berat isi kering terhadap permeabilitas lempung CH
(Sumber: Ingles, 1972)

7.5. Dasar penentuan spesifikasi pemadatan

Spesifikasi pekerjaan pemadatan dapat ditetapkan berdasarkan dua pendekatan, yaitu berdasarkan kinerja (hasil), metoda, atau gabungan keduanya. Sejauh ini, di Indonesia nampaknya menganut pendekatan gabungan.

7.5.1. Spesifikasi kinerja (*performance specifications*)

Apabila pemadatan harus dilakukan menurut spesifikasi kinerja, maka sampai batas-batas tertentu kontraktor dipersilahkan untuk menetapkan metoda yang akan diterapkan, namun hasil yang dicapai harus memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

Hasil yang harus dicapai biasanya dinyatakan dalam kepadatan atau kandungan udara. Kriteria lain (misal daya dukung) dapat ditambahkan atau sebagai alternatif. Berat isi kering di lapangan untuk timbunan umum biasanya tidak boleh kurang dari 95% berat isi kering maksimum hasil pengujian pemadatan ringan, sedangkan persyaratan kandungan udara biasanya berkisar 5 sampai 10%. Timbunan bahan granular memerlukan kepadatan yang lebih tinggi, yaitu berat isi kering tidak boleh kurang dari 95% berat kering maksimum hasil pengujian pemadatan dengan pemadat getar atau rongga udara tidak boleh lebih dari 5%.

Jenis spesifikasi ini merupakan cara yang efektif untuk mendapatkan timbunan atau lapisan yang konsisten dan sifat-sifatnya diketahui.

Pelaksanaan pekerjaan berdasarkan spesifikasi kinerja menuntut kontraktor untuk mempunyai tanggung jawab yang lebih besar dalam memilih tanah timbunan, peralatan pemadatan, tebal lapisan lepas serta urutan dan jumlah lintasan pemadatan. Agar untuk pemadatan setiap jenis tanah yang dipilih dapat ditentukan kombinasi optimum daripada peralatan dan metoda kerja, ada kemungkinan diperlukan beberapa percobaan. Disamping itu, kontraktor dan pengawas perlu melakukan berbagai pengujian sehingga di lapangan perlu tersedia laboratorium pengujian.

Spesifikasi kinerja biasanya diberlakukan pada proyek-proyek besar, misalnya proyek pembangunan jalan atau proyek pembangunan waduk.

7.5.2. Spesifikasi metoda (*method specifications*)

Spesifikasi metoda untuk pemadatan sejauh ini belum diterapkan secara penuh di Indonesia; karena spesifikasi yang diikuti adalah gabungan antara spesifikasi kinerja dengan spesifikasi metoda. Contoh spesifikasi metoda pada pekerjaan pemadatan ditunjukkan pada Tabel 9.

Spesifikasi metoda biasanya menyangkut jenis peralatan, tebal lapisan dan jumlah lintasan untuk setiap jenis tanah serta parameter-parameter lain yang diperlukan untuk pengendalian. Asalkan kontraktor telah melaksanakan pekerjaan sesuai dengan spesifikasi, maka setiap kegagalan hasil pekerjaan merupakan tanggung jawab pengawas (*engineer*). Sehubungan dengan hal tersebut, maka pengawas benar-benar dituntut untuk memantau metoda yang diterapkan dan hasil yang dicapai.

7.6. Teknik pemadatan

7.6.1. Penyelidikan pendahuluan

Sebelum pemadatan lapangan dimulai, sebaiknya terhadap tanah terlebih dulu dilakukan dua pengujian, yaitu pengujian pemadatan ringan dan pengujian untuk identifikasi (batas cair, batas plastis untuk tanah kohesif dan analisis saringan untuk tanah tidak kohesif).

Sebagaimana telah diuraikan di atas, pengujian pemadatan adalah untuk mendapatkan pedoman mengenai kadar air optimum yang harus diaplikasikan di lapangan. Meskipun demikian, pengujian dapat digunakan juga untuk memilih bahan timbunan terbaik, yaitu tanah yang mempunyai berat isi maksimum paling tinggi. Tujuan pengujian identifikasi adalah untuk klasifikasi tanah. Dengan demikian, maka dapat dilakukan pemilihan jenis alat yang paling cocok dengan tanah yang akan dipadatkan.

7.6.2. Percobaan pemadatan

Sebelum pelaksanaan pemadatan di mulai, sebaiknya terlebih dulu dilakukan percobaan pemadatan skala penuh. Percobaan tersebut dapat dilakukan pada lahan yang panjangnya kira-kira 20 m dan lebarnya kira-kira 15 m perlu disiapkan untuk percobaan pemadatan. Tanah permukaan (*top soil*) pada lahan untuk percobaan perlu dibuang.

Selanjutnya, tanah timbunan dihampar lajur demi lajur yang lebarnya sekitar 5 m, sedangkan tebal lapisan tanah divariasikan sesuai dengan tebal yang akan dikaji; biasanya tebal lapisan berkisar antara 15 sampai 45 cm. Kadar air pemadatan sejauh mungkin dipertahankan sama dengan kadar air asli tanah, kecuali akibat adanya fluktuasi minor.

Tanah kemudian dipadatkan dengan mesin pemadat yang akan digunakan dan setelah 2, 4 dan 8 lintasan, kepadatan rata-rata lapisan pada masing-masing lajur diperiksa (apabila mesin pemadat yang digunakan adalah mesin pemadat kaki kambing, maka pemeriksaan kepadatan dilakukan setelah 4, 8 dan 16 lintasan). Pemeriksaan kepadatan dapat dilakukan dengan salah satu metoda yang berlaku dan disarankan bahwa nilai rata-rata didasarkan pada sekurang-kurangnya lima hasil pemeriksaan.

Tabel 9. Contoh spesifikasi metoda (*Department of Transport, UK dalam Horner, 1988*)

JENIS ALAT	TANAH KOHESIF		TNH KOHESIF KERING & TNH BERBUTIR GRDS. MENERUS		TNH BERBUTIR GRADASI SERAGAM	
	D	N	D	N	D	N
<input type="checkbox"/> SMOOTH WHEEL ROLLER Beban per meter lebar roda (kg) ▪ 2100 - 2700 ▪ 2700 - 5400 ▪ Diatas 5400	125 125 150	7 6 4	125 125 150	10 7 7	125 125 T	10* 7* -
<input type="checkbox"/> GRID ROLLER Beban per meter lebar roda (kg) ▪ 2700 - 5400 ▪ 5400 - 7000 ▪ Diatas 7000	150 150 150	10 7 4	T 125 150	- 12 12	150 T T	10 - -
<input type="checkbox"/> TAMPING ROLLER Beban per meter lebar roda(kg) ▪ Diatas 4000	225	4	150	12	250	4
<input type="checkbox"/> PNEUMATIC TYRED ROLLER Beban per roda (kg) ▪ 1000 - 1500 ▪ 1500 - 2000 ▪ 2000 - 2500 ▪ 2500 - 4000 ▪ 4000 - 6000 ▪ 6000 - 7000 ▪ 7000 - 12000 ▪ Diatas 12000	125 150 175 225 300 350 400 450	6 5 4 4 4 4 4 4	T T 125 125 125 150 150 175	- - 12 10 10 7 7 6	150 T T T T T T T	10* - - - - - - -
<input type="checkbox"/> VIBRATING ROLLER Beban per meter lebar roda (kg) ▪ 270 - 450 ▪ 450 - 700 ▪ 700 - 1300 ▪ 1300 - 1700 ▪ 1700 - 2300 ▪ 2300 - 2900 ▪ 2900 - 3600 ▪ 3600 - 4300 ▪ 4300 - 5000 ▪ Diatas 5000	T T 100 125 150 175 200 225 250 275	- - 12 7 4 4 4 4 4 4	75 75 125 150 150 175 200 225 250 275	16 12 12 7 4 4 4 4 4 4	150 150 150 200 225 250 275 300 300 300	16 12 6 10* 12* 10* 8* 8* 6* 4*
<input type="checkbox"/> VIBRATING PLATE COMPACTOR Beban per satuan luas pelat (kg) ▪ 880 - 1100 ▪ 1100 - 1200 ▪ 1200 - 1400 ▪ 1400 - 1800 ▪ 1800 - 2100 ▪ Diatas 8000	T T T 100 150 200	- - - 6 6 6	T 75 75 125 150 200	- 10 6 6 5 5	75 100 150 150 200 250	6 6 6 4 4 4
<input type="checkbox"/> VIBRO TAMPER [Beban (kg)] ▪ 50 - 65 ▪ 65 - 75 ▪ Diatas 75	100 125 200	3 3 3	100 125 150	3 3 3	150 200 225	3 3 3
<input type="checkbox"/> POWER RAMMER [Beban (kg)] ▪ 100 - 500 ▪ Diatas 500	150 275	4 8	150 275	4 12	T T	- -

Tabel 9. Contoh spesifikasi metoda – lanjutan
(*Department of Transport, UK dalam Horner, 1988*)

JENIS ALAT	TANAH KOHESIF		TNH KOHESIF KERING & TNH BERBUTIR GRDS. MENERUS		TNH BERBUTIR GRADASI SERAGAM	
	D	N	D	N	D	N
<input type="checkbox"/> <i>DROPPING-WEIGHT COMPACTOR</i> Berat penumbuk di atas 500 kg Tinggi jatuh penumbuk (m) <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 - 2 ▪ Diatas 2 	600 600	4 2	600 600	8 4	450 T	8 -

D = tebal maksimum lapisan (mm); N = jumlah lintasan atau tumbukan; T = tidak cocok

* mesin pemadat harus ditarik dengan *tractor* beroda rantai

Apabila memungkinkan, percobaan di atas diulangi pada dua lahan lain yang masing-masing dengan kadar air yang berbeda; satu kadar air kira-kira sama dengan kadar air optimum menurut pengujian pemadatan ringan dan satu kadar air antara kadar air optimum menurut pengujian pemadatan ringan dan kadar air asli. Apabila kadar air asli sama dengan kadar air optimum menurut pengujian pemadatan ringan, maka percobaan pemadatan tambahan dilakukan pada kadar air 3 persen di bawah dan di atas kadar air optimum.

Percobaan di atas biasanya dapat diselesaikan dalam tempo sekitar satu minggu dan sebaiknya dilakukan secepatnya setelah mesin pemadat tiba di lapangan.

Percobaan di atas akan dapat menentukan cara pemadatan yang paling ekonomis. Disamping itu, pengendalian pekerjaan pada saat pelaksanaan akan menjadi lebih sederhana.

7.6.3. Manfaat percobaan pemadatan

Selama pelaksanaan pemadatan tanah, pengendalian pekerjaan perlu selalu dilakukan, agar hasil yang memadai dapat diperoleh. Tingkat pengendalian tergantung pada ukuran proyek, dimana masing-masing proyek harus ditangani sesuai dengan kondisinya.

Pada proyek yang kecil, pengendalian dipandang cukup apabila dipastikan bahwa tanah dihampar lapis demi lapis dengan tebal tidak lebih dari 22,5 cm, dipadatkan pada kadar air yang cukup (cukup basah sehingga tanah dapat dibentuk) dengan 8 lintasan mesin pemadat roda besi dan kadar air. Proyek yang lebih besar memerlukan pengendalian yang lebih ketat. Dalam hal tersebut, percobaan pemadatan lapangan dapat menghemat biaya yang cukup besar, yaitu dengan diperolehnya kepastian tentang cara paling ekonomis dalam penghamparan dan pemadatan.

Contoh aplikasi teknik pemadatan

Sebagai ilustrasi aplikasi teknik pemadatan, telah dilakukan pengkajian pada pemadatan timbunan tanah kapur (*chalk embankments*) dengan mesin pemadat roda besi berat. Bagian atas lapisan kapur adalah lunak dan mengandung batu api (*flint*). Pada saat digali, kapur terdiri atas bongkah-bongkah berukuran sekitar 60 cm, namun dipadatkan, bongkah-bongkah tersebut dipecah menjadi butiran berukuran 15 cm.

▪ Pengujian pendahuluan

Terhadap tanah dilakukan pengujian pemadatan ringan. Dengan menggunakan contoh tanah yang lolos saringan 20 mm ($\frac{3}{4}$ in), hubungan nyata antara berat isi kering dengan kadar air sulit diperoleh, tetapi dengan contoh yang lolos saringan 2,42 mm (No. 8) dapat

diperoleh hubungan yang jelas. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa berat isi kering maksimum adalah $1,60 \text{ ton/m}^3$ dan kadar air optimum adalah 23%.

Kadar air asli kapur ternyata hampir tetap sekitar 25 persen. Oleh karena itu, maka terjadinya variasi kadar air dabaikan. Disamping itu, meskipun akibat hujan, kadar air kapur adalah sekitar 25 ± 2 persen.

- Percobaan pemadatan

Mesin pemadat roda besi yang digunakan mempunyai bobot $11\frac{1}{2}$ ton, yang menimbulkan tekanan pada roda belakang sebesar 195 kg per cm (430 lb per in) lebar roda. Tebal lapisan lepas adalah 15 dan 22,5 cm (6 dan 9 in) dan penghamparan dilakukan secara manual dan dengan menggunakan *dozer (angle-dozer)*.

Kapur dihampar di atas permukaan kapur asli (tanah penutup sudah dibuang) dan di atas permukaan yang sebelumnya telah dipadatkan. Pada kedua kasus tersebut, pengujian kepadatan dilakukan pada daerah yang telah dipadatkan 1, 2, 4 dan 8 lintasan roda belakang.

Untuk pengujian kepadatan digunakan tabung (*drive cylinder*), karena alat tersebut dipandang yang paling cocok. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat isi kapur padat adalah $1,47 \text{ ton/m}^3$ (92 lb/ft^3).

- Hasil percobaan

- Jumlah lintasan

Untuk masing-masing tebal lapisan dan cara penghamparan, hubungan antara berat isi kering lapisan kapur dengan jumlah lintasan digambar, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 43.

Pada gambar terlihat bahwa setelah 4 lintasan hanya terjadi peningkatan yang tidak mencolok.

- Tebal lapisan

Gambar 43 memperlihatkan bahwa setelah empat lintasan, berat isi kering lapisan yang dihampar secara manual dengan tebal 15 cm adalah $0,040 \text{ ton/m}^3$ ($2\frac{1}{2} \text{ lb/ft}^3$) lebih tinggi daripada lapisan yang tebalnya 22,5 cm. Dalam lapisan yang dihampar dengan dozer, perbedaannya adalah $0,056 \text{ ton/m}^3$ ($3\frac{1}{2} \text{ lb/ft}^3$).

- Cara penghamparan

Pada Gambar 43 terlihat bahwa penghamparan dengan dozer dapat meningkatkan secara nyata berat isi kering dari $0,96 \text{ ton/m}^3$ (60 lb/ft^3) menjadi $1,34 \text{ ton/m}^3$ (84 lb/ft^3). Disamping itu, terlihat pula bahwa berat isi kering setelah pemadatanpun cukup meningkat. Hal tersebut nampaknya diakibatkan oleh adanya aksi penghancuran (*crushing action*) oleh bilah-bilah rantai dozer bersama-sama dengan vibrasi mesin. Pengaruh pemadatan oleh dozer terlihat nyata sampai kedalaman 12,5 cm (5 in), sedangkan untuk kedalaman lebih dari 12,5 cm hal tersebut kurang nampak.

- Penafsiran data hasil percobaan

Menurut hasil percobaan di atas, disarankan agar penghamparan dilakukan dengan dozer, tebal hamparan 15 cm (6 in), kadar air pemadatan sama dengan kadar asir asli, pemadatan dilakukan sebanyak 4 lintasan dengan mesin pemadat roda besi.

7.6.4. Kepadatan relatif dan efisiensi pemadatan

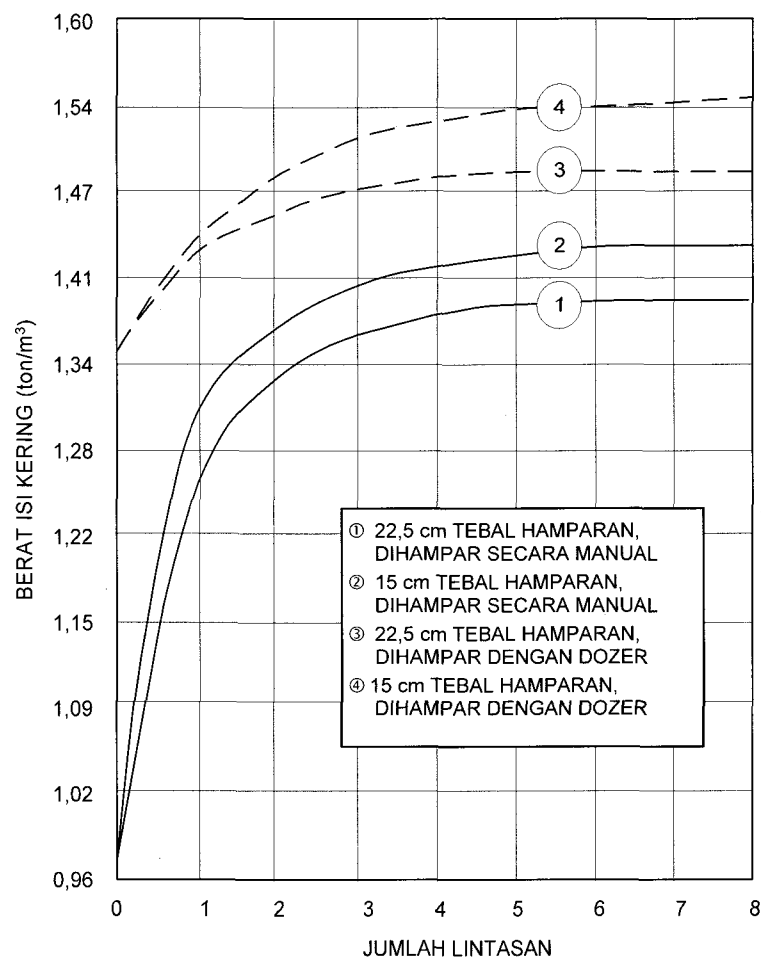
Tingkat kepadatan yang diperoleh di lapangan diukur oleh "kepadatan relatif", yaitu perbandingan antara berat isi kering di lapangan dengan berat isi kering maksimum yang diperoleh pada pengujian pemadatan di laboratorium, yang dinyatakan dalam persen.

Kepadatan tanah lepas biasanya berkisar antra 75 sampai 80 persen berat isi kering maksimum pada pengujian pemadatan ringan, sedangkan kepadatan hasil pemadatan yang seksama dapat mencapai 100 persen berat isi kering maksimum pada pengujian pemadatan ringan.

Untuk mengetahui efisiensi berbagai jenis mesin pemadat, dapat digunakan skala dari 0 sampai 100 persen, dimana nilai 0 persen untuk tanah lepas yang belum dipadatkan, sedangkan nilai 100 persen adalah sama dengan 100 persen kepadatan relatif yang disebutkan di atas.

Rumus yang dapat digunakan untuk menggambarkan efisiensi mesin pemadat adalah:

$$\frac{\text{Berat isi kering lapangan} - \text{berat isi kering lepas}}{\text{Berat isi kering maks. hasil pengujian pemadatan ringan} - \text{berat isi kering lepas}} \dots\dots\dots 68$$



Gambar 43. Hubungan jumlah lintasan mesin pemadat roda besi 11½ ton dengan berat isi kering.

7.7. Pengendalian kepadatan dan pengujian berat isi di lapangan

7.7.1. Umum

Pemadatan tanah biasanya dikendalikan dengan cara pengamatan visual dan derajat kepadatan berdasarkan hasil pengukuran berat isi basah dan kandungan air di lapangan. Derajat kepadatan biasa dinyatakan dalam persen hasil perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Derajat kepadatan} = \frac{\text{berat isi kering di lapangan}}{\text{berat isi kering maks. hasil pengujian di laboratorium}} \times 100\% \quad \dots 69$$

Empat metoda yang dapat digunakan untuk pengujian berat isi di lapangan adalah:

- a. Metoda tabung (*drive cylinder method*).
- b. Metoda corong-pasir (*sand-cone method*).
- c. Metoda balon (*rubber-balloon method*).
- d. Metoda nuklir (*nuclear method*).

Kadar air dan berat jenis tanah dapat ditentukan melalui pengujian di laboratorium terhadap contoh tanah yang diambil pada saat pengujian kepadatan. Apabila memungkinkan, pengujian kepadatan tidak dilakukan pada lapisan teratas, karena pemadatan lapisan bagian atas akan memadatkan lebih jauh lapisan-lapisan di bawahnya. Oleh karena itu, pengujian lapisan bagian atas cenderung menghasilkan kepadatan yang rendah.

Pada daerah kerja yang luas, seringkali dijumpai banyak jenis tanah yang masing-masing mempunyai karakteristik pemadatan sendiri-sendiri. Sehubungan dengan hal tersebut, terhadap masing-masing jenis tanah perlu dilakukan pengujian di laboratorium dan pengujian kepadatan lapangan.

Pengujian di laboratorium terhadap tanah berbutir dilakukan terhadap contoh yang mempunyai ukuran butir lebih kecil dari 20 mm atau 37,5 mm. Agar hasil pengujian laboratorium tanah yang mengandung butir-butir kasar dapat dibandingkan secara lebih teliti dengan hasil pengujian lapangan, maka pada pengujian di laboratorium mungkin diperlukan penyesuaian gradasi.

Untuk menentukan kombinasi peralatan yang optimum, tebal lapisan dan jumlah lintasan pemadatan, mungkin diperlukan beberapa percobaan pemadatan. Percobaan awal dapat dilakukan di lokasi husus yang idealnya mempunyai panjang 20-25 m, ketebalan sekurang-kurangnya 1 m dan lebarnya empat kali lebar peralatan terbesar.

Selama pelaksanaan sering kali dilakukan juga percobaan dan apabila hasilnya memuaskan, maka hasil percobaan tersebut dapat dimasukkan sebagai bagian pekerjaan.

Pengawasan pemadatan harus dikonsentrasikan untuk memastikan bahwa peralatan yang dipilih benar-benar sedang digunakan pada pemadatan tanah yang mempunyai tebal lapisan yang telah ditentukan dengan jumlah lintasan yang telah ditentukan pula. Hal lain yang penting adalah mengecek bahwa pemadatan benar-benar terjadi pada seluruh lapisan.

Cukup-tidaknya pemadatan dapat dilihat melalui besarnya penurunan yang terjadi pada saat permukaan tanah dilintasi alat pemadat. Namun demikian, pemadatan berlebih pada jenis-jenis tanah tertentu (pasir seragam, lempung lunak dan *chalk*), sering mengakibatkan kerusakan timbunan. Untuk mengetahui telah dicapai-tidaknya kepadatan perlu dilakukan pengujian kepadatan, terutama pada lokasi-lokasi yang dicurigai belum padat atau telah dipadatkan secara berlebih. Berdasarkan hasil pengujian atau pengamatan visual, daya pemadatan dapat disesuaikan.

7.7.2. Pengujian berat isi dengan metoda tabung pemotong

Pengujian berat isi tanah dengan metoda tabung pemotong diuraikan lebih rinci dalam SNI 03-6792-2002 (AASHTO T 204-90), sedangkan secara ringkas diuraikan di bawah.

7.7.2.1. Peralatan

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 44, peralatan utama yang digunakan pada pengujian dengan metoda tabung terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut:

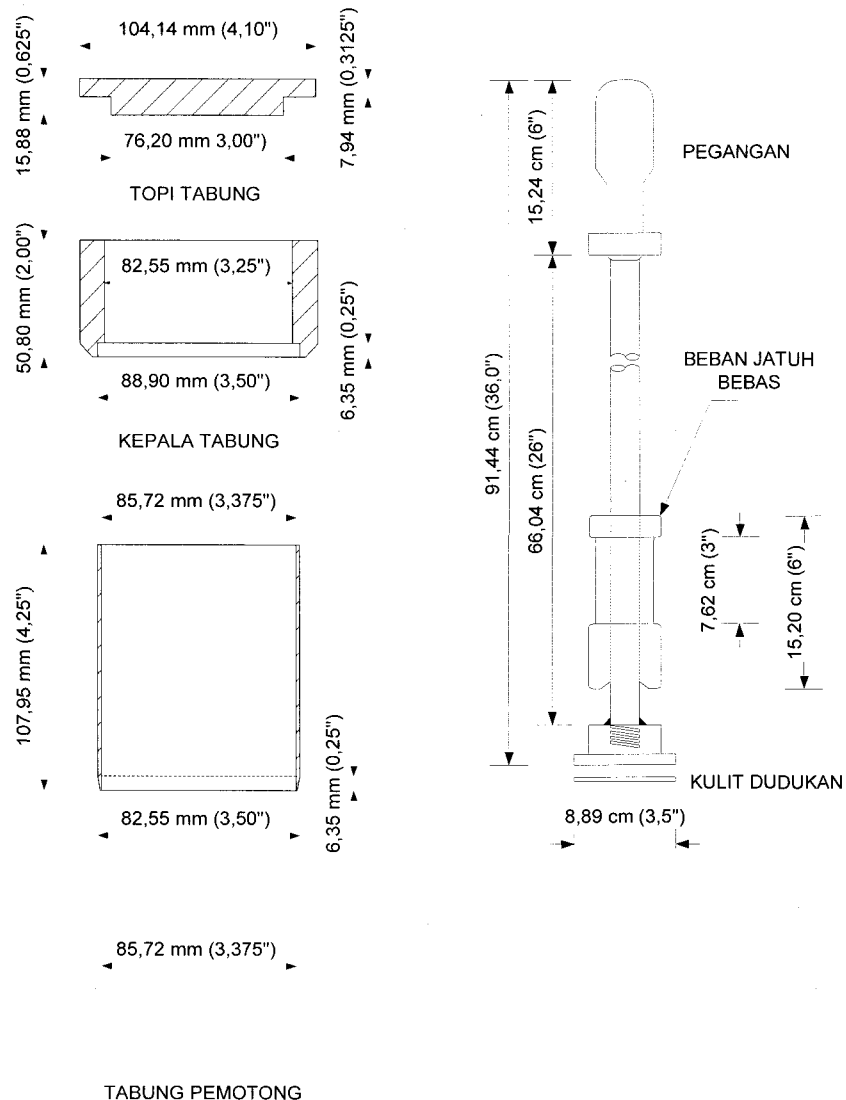
- Penumbuk
- Topi tabung
- Kepala tabung
- Tabung pemotong yang mempunyai volume = 620 cm^3 ($0,220 \text{ ft}^3$)

Peralatan lain yang diperlukan diantaranya adalah timbangan, alat untuk mengeringkan contoh (tungku, oven atau alat lain yang sejenis), mangkok contoh, peralatan gali (pahat) dan mistar pemotong tanah.

7.7.2.2. Prosedur pemeriksaan

Langkah-langkah yang dilakukan pada pemeriksaan berat isi dengan metoda tabung adalah:

- Ratakan dan bersihkan permukaan tanah yang akan diperiksa.
- Lumasi tabung pemotong dengan oli encer.
- Letakkan tabung pemotong pada permukaan tanah.
- Pasang kepala dan topi tabung.
- Letakkan penumbuk pada topi tabung (batang penumbuk harus benar-benar vertikal).
- Lakukan penumbukan beberapa kali sehingga tabung pemotong masuk ke dalam tanah kira-kira 1,27 cm ($\frac{1}{2}$ in) di bawah permukaan.
- Lepaskan topi dan kepala tabung.
- Lakukan penggalian tanah di sekeliling tabung pemotong sampai kedalaman beberapa cm di bawah dasar tabung pemotong.
- Angkat tabung pemotong serta potong dan ratakan permukaan tanah dalam tabung.
- Timbang tabung pemotong dan tanah di dalamnya, yaitu untuk mengetahui berat tanah basah dalam tabung.
- Keluarkan tanah dari tabung dan lakukan pemeriksaan kadar air.



Gambar 44. Peralatan pengujian berat isi dengan metoda tabung

7.7.2.3. Perhitungan

Berat isi kering (γ_d) dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\gamma_d (\text{ton/m}^3) &= \frac{0,016 \times K \times \text{Berat contoh tanah, dalam gram}}{1 + \frac{\text{Kadar air}}{100}} \\ &= \frac{0,016 \times K \times W_b}{1 + \frac{w}{100}} \dots\dots\dots 70\end{aligned}$$

dimana :

K adalah faktor volume tabung, dimana untuk volume tabung = 620 cm³ (0,220 ft³), nilai K = 0,100.

Derajat kepadatan selanjutnya dihitung dengan membandingkan berat isi kering lapangan terhadap berat isi kering yang ditetapkan dan dinyatakan dalam persen.

7.7.2.4. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pemeriksaan

- Tebal dinding tabung pemotong
Pengkajian pada dua lokasi mengenai penggunaan beberapa tabung pemotong yang mempunyai tebal yang berbeda (10 cm diameter dan 12,5 tinggi) menunjukkan hasil sebagai berikut:

TEBAL DINDING	BERAT ISI KERING (ton/m ³)	
	LOKASI 1	LOKASI 2
6,35 mm (1/4")	1,643	1,570
4,76 mm (3/16")	1,648	1,568
3,17 mm (1/8")	1,651	1,597
1,58 mm (1/16")	1,683	1,605

Hasil di atas menunjukkan bahwa tebal dinding tabung pemotong mempengaruhi berat isi, dimana makin tebal dinding, cenderung menghasilkan berat isi yang makin kecil. Sehubungan dengan hal tersebut, maka disarankan agar tabung pemotong yang digunakan mempunyai dinding yang tipis.

- Diameter-dalam tabung pemotong
Sejauh ini tidak ada perbedaan nyata mengenai hasil pemeriksaan yang menggunakan beberapa tabung dengan diameter-dalam yang berbeda.

7.7.3. Pengujian berat isi dengan metoda corong pasir

Pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda corong pasir diuraikan lebih rinci dalam SNI 03-2828-1982 (AASHTO T 191-90), sedangkan secara ringkas diuraikan di bawah.

7.7.3.1. Peralatan dan bahan

Peralatan utama yang digunakan pada pemeriksaan dengan metoda corong-pasir terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut:

- Botol sebagai wadah pasir (leher botol diberi ulir untuk menyambungkan dengan corong).
- Corong yang dapat dipasang pada botol dan pada lehernya dilengkapi dengan katup untuk membuka dan menutup aliran pasir
- Alas yang dibagian tengahnya mempunyai lubang berbentuk lingkaran.

Peralatan di atas ditunjukkan pada Gambar 45a. Peralatan lain pada pengujian dengan metoda ini adalah sama dengan yang digunakan pada pengujian dengan metoda tabung.

Sebagai media untuk mengukur volume lubang, pada metoda ini digunakan pasir (lolos saringan 2 mm, tertahan saringan 0,075 mm) yang berat isinya diketahui atau diperiksa. Pasir harus bersih dan kering agar pada saat turun dari corong, pasir tersebut dapat mengalir secara lancar.

7.7.3.2. Penentuan berat isi pasir

Sebelum pemeriksaan berat isi dilakukan, terlebih dulu periksa berat isi pasir dengan cara sebagai berikut:

- Tentukan volume botol sesuai dengan volume air yang dapat ditampung di dalamnya (penentuan volume botol sebaiknya didasarkan pada hasil sekurang-kurangnya dua kali pemeriksaan, dan lakukan koreksi volume botol sebagai akibat pengaruh suhu terhadap volume air sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 10).
- Letakkan botol (yang telah dipasang corong) pada permukaan yang datar.
- Tutup katup dan isikan pasir ke dalam corong.

- Buka katup sehingga pasir mengisi botol (selama pengisian botol, pertahankan agar corong terisi pasir kira-kira setengahnya).
- Tutup katup dan buang pasir yang masih terdapat dalam corong.
- Timbang botol-corong berisi pasir, sehingga berat pasir dalam botol dapat diketahui.
- Tentukan berat isi pasir dengan membagi beratnya oleh volume botol (pemeriksaan berat isi pasir sebaiknya dilakukan lebih dari satu kali).

7.7.3.3. Penentuan volume corong

Karena volume corong diperlukan untuk menentukan volume lubang pengujian, maka volume corong perlu ditentukan terlebih dulu dengan cara sebagai berikut:

- Isi penuh botol dengan pasir dan tutup katup.
- Letakkan botol-corong secara terbalik pada permukaan yang datar dan rata.
- Buka katup sehingga pasir mengalir.
- Tutup katup setelah aliran pasir berhenti.
- Timbang botol-corong yang berisi pasir sisa.
- Tentukan berat pasir dalam corong dengan cara mengurangi berat botol-corong berisi penuh pasir oleh berat botol-corong berisi pasir sisa.
- Tentukan volume corong dengan cara membagi berat pasir dalam corong oleh berat isi pasir.

7.7.3.4. Prosedur pengujian

Pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda corong-pasir dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- Ratakan dan bersihkan permukaan tanah yang akan diperiksa.
- Letakkan botol-corong secara terbalik dan beri tanda permukaan yang tanahnya akan diuji sesuai dengan bentuk lingkaran mulut corong.
- Angkat botol-corong.
- Lakukan penggalian tanah pada bagian yang telah diberi tanda dan masukkan tanah galian pada wadah yang sudah disediakan (ukuran lubang disesuaikan dengan ukuran maksimum butir tanah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 11).
- Letakkan botol-corong secara terbaik, buka corong dan biarkan pasir mengalir sampai berhenti.
- Tutup katup setelah aliran pasir berhenti.
- Timbang botol-corong-pasir (berat pasir dalam lubang dan corong dapat diketahui).
- Tentukan volume pasir dalam lubang dan corong, berdasarkan berat isi pasir.
- Tentukan volume lubang, berdasarkan volume lubang dan pasir serta volume corong.
- Timbang berat tanah galian (berat isi basah dapat diketahui).
- Tentukan kadar air tanah (sesuaikan berat contoh dengan ukuran maksimum butir tanah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 11).
- Tentukan berat isi kering tanah berdasarkan berat isi basah, volume lubang dan kadar air.

7.7.3.5. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pemeriksaan

- Pengaruh ketinggian pasir dalam botol terhadap berat isi pasir
Berat isi pasir dapat menurun sekitar 1 persen untuk setiap penurunan 5 cm ketinggian pasir dalam botol. Oleh karena itu, maka ketinggian pasir dalam botol pada saat pengujian harus dipertahankan tetap sebagaimana ketinggian pada saat penentuan berat isi pasir.
- Pengaruh kebersihan, kekeringan dan gradasi pasir
Pasir yang digunakan untuk pengujian harus bersih dan kering, jika tidak, maka berat isi pasir akan berubah-ubah. Disamping itu, pasir harus mempunyai gradasi yang tetap. Secara ringkas dapat dikatakan bahwa pasir yang baik adalah pasir yang berat isinya tetap.

7.7.4. Pengujian berat isi dengan metoda balon

Pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda balon diuraikan dalam SNI 19-6413-2000 (AASHTO T 205-90) dimana ringkasannya diuraikan di bawah.

7.7.4.1. Peralatan

Peralatan untuk pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda balon terdiri atas tabung berskala yang dilengkapi dengan pompa tekan dan isap serta bagian bawahnya ditutup dengan membran kenyal (balon karet), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 45b. Peralatan lain yang digunakan adalah sama dengan peralatan pada metoda terdahulu.

7.7.4.2. Pengecekan skala tabung

Untuk memastikan bahwa skala tabung sesuai dengan volume air dalam tabung, maka skala tersebut perlu dicek (kalibrasi). Dalam pengecekan tersebut diperlukan wadah yang volumenya sudah diketahui, misal silinder untuk pengujian pemadatan (diameter 11 dan 15 cm). Pengecekan dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Letakkan tabung yang telah diisi air dan dipasang balon pada permukaan yang datar dan rata (agar balon tidak pecah pada saat tabung dipindahkan, maka air perlu diberi tekanan isap).
- Baca angka pada garis skala (pembacaan pertama).
- Letakkan tabung di atas wadah yang volumenya sudah diketahui.
- Lakukan pemompaan tekanan terhadap air kira-kira 5 psi (49 kPa). Untuk mencegah kemungkinan terangkatnya tabung, maka tabung dapat dibebani secukupnya.
- Baca angka pada garis skala (selisih angka pembacaan pertama dengan angka pembacaan ke dua harus menunjukkan volume air yang masuk ke dalam wadah).
- Lakukan kalibrasi dengan menggunakan wadah yang volumenya berbeda.

7.7.4.3. Prosedur pemeriksaan

Pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda balon dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- Ratakan dan bersihkan permukaan tanah yang akan diperiksa.
- Letakkan tabung secara vertikal, beri tekanan secukupnya dan baca angka pada skala.
- Angkat tabung.
- Beri tanda permukaan tanah yang akan diperiksa sesuai dengan bentuk dan ukuran lingkaran tabung.
- Lakukan penggalian tanah dan masukkan tanah galian dalam wadah yang sudah disediakan.
- Letakkan tabung di atas lubang dan lakukan pemompaan sehingga air dapat mengisi penuh lubang.
- Baca angka pada skala (selisih angka pembacaan pertama dan pembacaan ke dua merupakan volume lubang).
- Timbang contoh tanah.
- Tentukan kadar air tanah.
- Lakukan perhitungan berat isi kering tanah berdasarkan berat isi basah, volume lubang dan kadar air.

7.7.5. Pengujian berat isi dengan metoda nuklir

Pemeriksaan berat isi tanah dengan metoda nuklir makin populer, meskipun harga alat tersebut jauh lebih mahal daripada peralatan lain untuk pemeriksaan yang sama.

Salah satu bentuk peralatan yang digunakan pada pemeriksaan berat isi dengan metoda nuklir ditunjukkan pada Gambar 45c.

Alat nuklir dilengkapi dengan pembangkit dan penangkap (*detector*) sinar gamma dan partikel alpha.

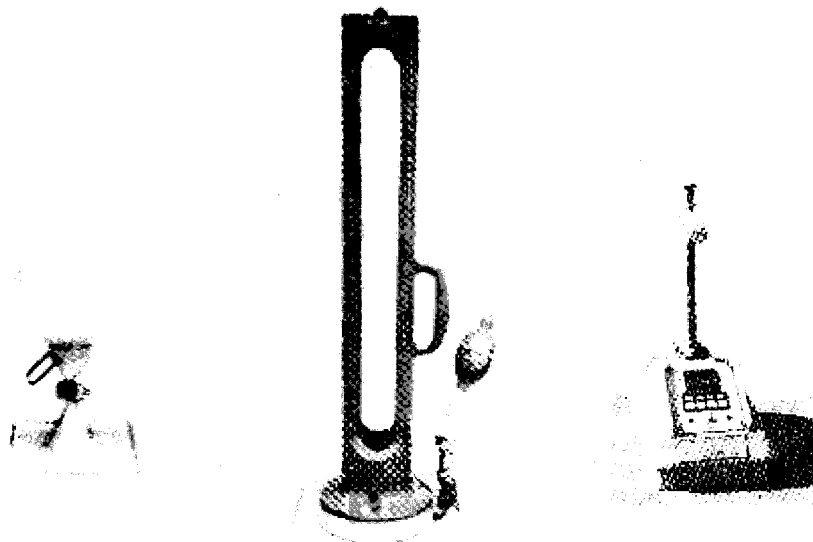
Prinsip kerja alat nuklir adalah, berat isi tanah sebanding dengan sinar gamma yang diserap tanah sedangkan kadar air sebanding dengan penurunan kecepatan partikel alpha yang diakibatkan oleh adanya atom hidrogen dalam molekul air. Jumlah sinar gamma yang tersisa dan kecepatan akhir partikel alpha di catat oleh penangkap.

Untuk menentukan berat isi dan kadar air dengan alat nuklir diperlukan nilai standar berat isi dan kadar air. Disamping itu diperlukan pula hubungan antara perbandingan pembacaan (*count ratio*) dengan berat isi total serta perbandingan pembacaan dengan berat air. Nilai-nilai tersebut dapat diperoleh dari pabrik pembuat alat atau melalui kalibrasi.

Pengoperasian alat nuklir harus mengacu pada pedoman yang diterbitkan oleh pabrik pembuatnya.

Contoh hasil pemeriksaan dengan metoda nuklir

- Standar berat isi dan kadar air alat nuklir adalah 3130 dan 660
- Hasil pemeriksaan lapangan menunjukkan bahwa
 - Angka kadar air = 111
 - Angka berat isi = 867
- Perbandingan pembacaan
 - Angka kadar air = $111/660 = 0,168$
 - Angka berat isi = $867/3130 = 0,277$
- Dari tabel hubungan perbandingan pembacaan-berat isi total dan perbandingan pembacaan-berat air, diperoleh:
 - Berat air = 124 kg/m^3
 - Berat isi total = 2155 kg/m^3
- Maka,
 - Berat isi kering = $2155 - 124 = 2031 \text{ kg/m}^3 = 2,031 \text{ ton/m}^3$
 - Kadar air = $124/2031 \times 100 = 6,1\%$



a. Corong-pasir

b. Balon

c. Nuklir

Gambar 45. Alat pemeriksaan berat isi tanah

7.7.6. Keunggulan dan kelemahan masing-masing metoda pemeriksaan

Beberapa keunggulan dan kelemahan masing-masing metoda pemeriksaan berat isi yang diuraikan di atas ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 10. Volume air per gram menurut suhu

SUHU ($^{\circ}\text{C}$)	VOLUME (cm^3/gram)
18	1,00138
20	1,00177
22	1,00221
24	1,00268
26	1,00320
28	1,00375
30	1,00435
32	1,00497

Tabel 11. Volume lubang uji dan berat contoh minimum

UKURAN MAKS. BUTIR (mm)	UKURAN MIN. LUBANG ¹⁾		BERAT MIN. CONTOH ²⁾ (gram)
	VOLUME (cm^3)	KEDALAMAN (cm)	
4,75	708	14	4,75
12,5	1416	17	12,5
25	2124	41	25
50	2831	54	50
63	42475	82	63

¹⁾ Pada pengujian berat isi dengan metoda corong-pasir dan balon

²⁾ Untuk penentuan kadar air

Tabel 12. Keunggulan dan kelemahan masing-masing metoda pengujian berat isi lapangan

METODA PEMERIKSAAAN	KEUNGGULAN	KELEMAHAN
▪ Tabung pemotong	• Pengoperasian sederhana dan relatif cepat	• Pisau pemotong mudah tumpul • Tidak bisa digunakan untuk tanah mengandung kerikil/agregat atau tanah tidak kohesif
▪ Corong-pasir	• Dapat digunakan untuk semua jenis tanah	• Pengoperasian agak lambat
▪ Balon	• Pengoperasian sederhana dan relatif cepat	• Hasil pemeriksaan mungkin tidak tetap (<i>not reproducible</i>), karena kesulitan mengendalikan tekanan udara dan memastikan bahwa balon benar-benar memenuhi lubang
▪ Nuklir	• Pengoperasian sederhana dan cepat (± 1 menit/titik setelah permukaan disiapkan)	• Memerlukan kehati-hatian yang tinggi • Memerlukan kalibrasi tiap hari

7.7.7. Jumlah titik pemeriksaan kepadatan dan variabilitas hasil pemeriksaan yang diijinkan

Berat isi hasil pemeriksaan lapangan biasanya bervariasi antara satu titik dengan titik lainnya. Variasi tersebut sebagian mungkin sebagai akibat ketidakseragaman pemadatan atau sebagai akibat variasi jenis tanah dan kadar air pemadatan; sedangkan sebagian lagi

sebagai akibat penyimpangan yang melekat pada metoda pemeriksaan serta sebagai akibat kesalahan penguji.

Sehubungan dengan hal di atas, maka pengendalian kepadatan sebaiknya tidak didasarkan pada hasil satu pemeriksaan saja. Dalam hal tersebut perlu dilakukan pemeriksaan pada beberapa titik dan hasilnya dianalisis secara statistik.

Sebagai dasar analisis, maka pemeriksaan sebaiknya dilakukan pada 10 titik dimana masing-masing titik mewakili 1000 m^2 (1000 yd^2) tanah yang telah dipadatkan. Jumlah titik pemeriksaan per satuan luas sudah barang tentu tergantung pada karakteristik pekerjaan serta tingkat ketelitian yang dikehendaki dari hasil pemeriksaan.

Untuk sebagian besar pekerjaan, maka deviasi standar yang diijinkan adalah $0,08 \text{ ton/m}^3$ (5 lb./ft^3) untuk tanah berbutir halus dan $0,16 \text{ ton/m}^3$ (10 lb./ft^3) untuk tanah berbutir kasar dimana nilai rata-rata berat isi kering harus sekurang-kurangnya sama dengan berat isi kering yang ditetapkan.

7.7.8. Pemilihan berat isi kering dan kadar air untuk acuan pemadatan lapangan

Sebagaimana disebutkan di atas bahwa terjadinya variabilitas hasil pemeriksaan kepadatan tidak bisa dihindarkan. Terdapat banyak faktor yang menyebabkan terjadinya variabilitas tersebut, diantara yang penting adalah kecilnya contoh (diameter 10 sampai 15 cm) untuk dapat mewakili permukaan yang luas. Disamping itu, kontraktor dipandang tidak mungkin dapat menghasilkan produk yang benar-benar seragam, terlepas dari kecepatan dan biaya pelaksanaan.

Faktor lain yang menyebabkan terjadinya variabilitas adalah kesalahan pengujian, dimana penguji tidak mungkin mendapatkan hasil yang sama dari pengujian beberapa kali terhadap benda uji yang sama. Salah satu faktor paling penting dalam hal tersebut adalah faktor manusia yang menilai (*judge*) cukup-tidaknya nilai rata-rata kepadatan.

Sejauh menyangkut pemeriksaan kepadatan lapangan, faktor utama yang memberikan sumbangan terhadap terjadinya variabilitas adalah pemilihan hasil pengujian laboratorium yang dapat dijadikan acuan untuk pengendalian.

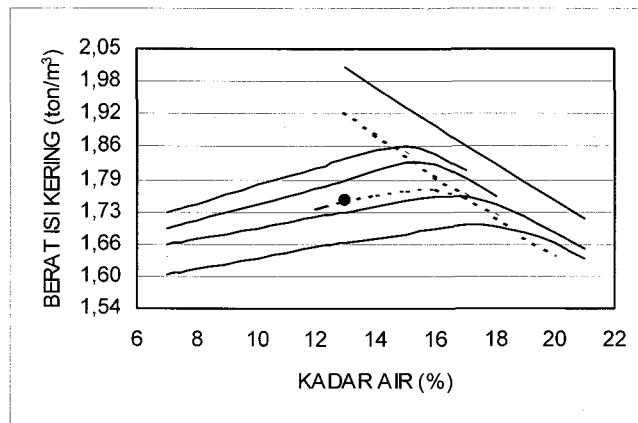
Sebagai ilustrasi kasus di atas, pada Gambar 46 ditunjukkan beberapa seri hasil pengujian pemadatan ringan untuk suatu proyek. Pengujian dilakukan di laboratorium terhadap beberapa contoh tanah yang dipandang mewakili tanah dari suatu sumber. Pada gambar terlihat bahwa tanah cukup bervariasi dimana berat isi kering maksimum tanah berkisar antara sekitar $1,69$ sampai $1,87 \text{ ton/cm}^3$, sedangkan kadar air optimumnya berkisar antara 15 sampai 17 persen.

Karena seseorang yang terlatih dan berpengalaman sekalipun akan sangat kesulitan dalam menetapkan secara tepat kurva yang mewakili tanah yang diambil dari lubang pengujian, maka terdapat dua kemungkinan yang dapat dilakukannya. Kemungkinan pertama adalah melakukan pengujian klasifikasi terhadap jumlah contoh yang banyak dan melakukan pengujian pemadatan terhadap beberapa contoh serta kemudian mengkorelasikan berat isi hasil dengan salah satu indeks klasifikasi, sebelum pelaksanaan dimulai. Dengan perlunya melakukan pengujian terhadap contoh yang banyak, maka pendekatan tersebut dipandang sangat tidak menguntungkan.

Pada Gambar 46 terlihat bahwa kurva kepadatan mempunyai pola/bentuk yang mirip, dimana berat isi kering maksimum meningkat sejalan dengan penurunan kadar air optimum.

Kemungkinan ke dua adalah merata-ratakan kurva-kurva dalam suatu kelompok serta memanfaatkan pola hubungan berat isi kering maksimum dengan kadar air optimum sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 46.

Dari dua kemungkinan di atas, kemungkinan ke dua tentunya lebih sederhana, cepat dan murah, sebagaimana yang akan terlihat pada contoh di bawah.



Gambar 46. Pola kurva hasil pengujian pemadatan

Kurva tipikal dari kemungkinan ke dua ditunjukkan pada Gambar 47, yaitu hasil merata-ratakan kurva pengujian pemadatan ringan terhadap sejumlah besar jenis tanah yang terdapat di Ohio.

Pada Gambar 47 terlihat bahwa di sebelah kanan, semua kurva mendekati garis jenuh dan hampir semua puncak melewati garis rongga 5% (perhatikan bahwa kurva merupakan hubungan antara "berat isi basah" dengan kadar air).

Untuk menggunakan kurva tipikal pada Gambar 47, terhadap tanah yang diambil dari lubang pengujian perlu dilakukan pengujian pemadatan (dengan menggunakan silinder dan penumbuk satandar) sehingga dihasilkan "kurva kepadatan satu titik". Pengujian tersebut dilakukan pada kadar air lapangan, meskipun kadar air tersebut dapat disesuaikan dengan kadar air optimum.

Contoh penggunaan kurva tipikal

Pemeriksaan di lapangan dengan metoda corong-pasir menunjukkan bahwa tanah mempunyai berat isi basah $1,99 \text{ ton/m}^3$ dan kadar air $17,4\%$. Dengan kadar air tersebut, berat isi kering tanah adalah $1,70 \text{ ton/m}^3$. Penilaian visual menunjukkan bahwa tanah yang digali dari lubang tidak mengandung butir yang lebih besar dari $4,76 \text{ mm}$ (saringan No. 4); disamping itu, kadar lapangan dinilai mendekati kadar air optimum.

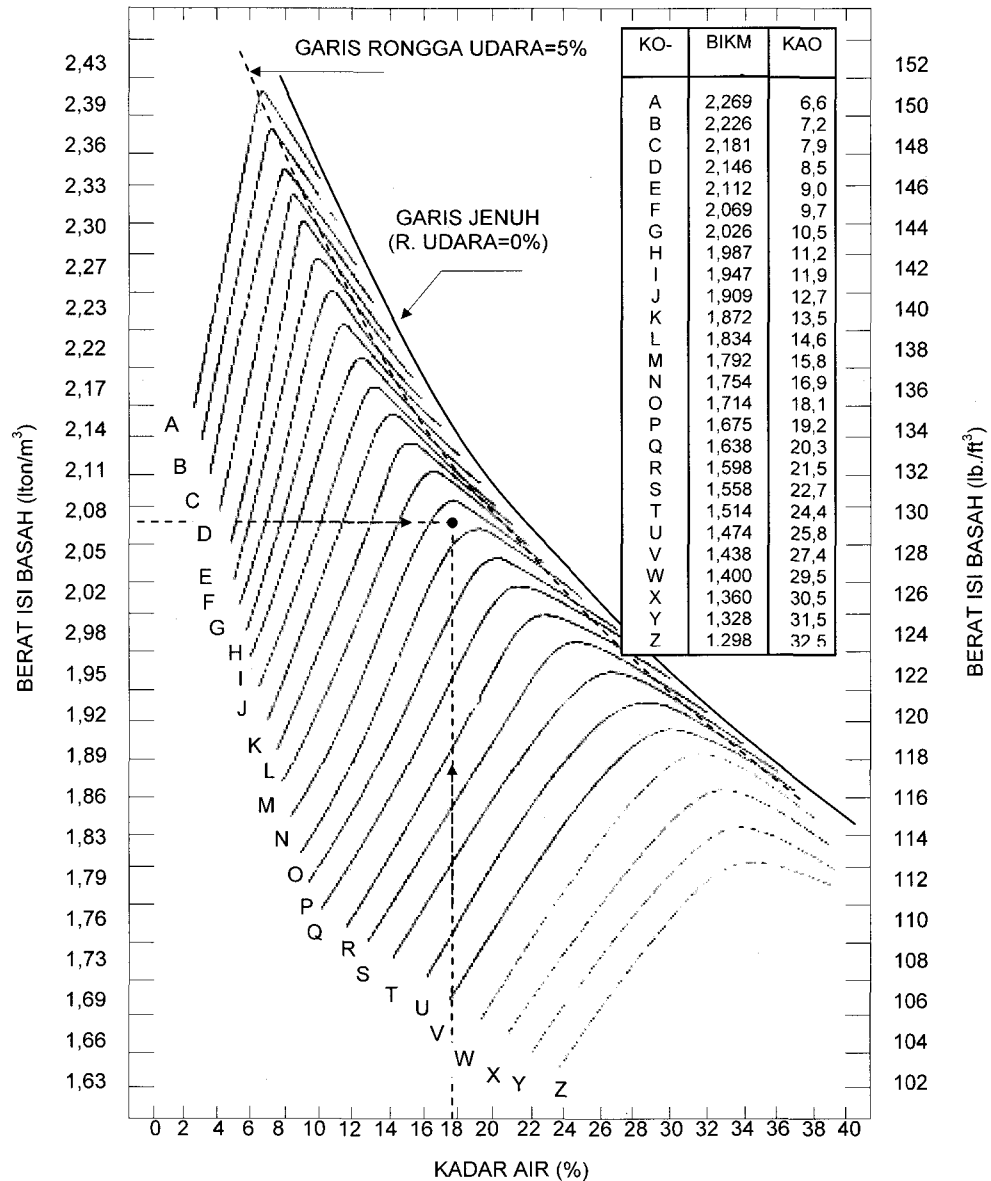
Sesuai dengan hasil pengujian pemadatan dengan prosedur standar, berat isi basah tanah adalah $2,03 \text{ ton/m}^3$ dan kadar airnya adalah 17% .

Apabila diplot pada Gambar 47, titik di atas terletak antara kurva N dan O. Dengan demikian, maka kurva kepadatan tanah yang diperiksa akan mirip dengan kurva N atau O.

Dengan menggunakan tabel pada Gambar 47, diperoleh bahwa berat isi kering maksimum tanah adalah $1,73 \text{ ton/m}^3$ dan kadar air optimumnya adalah $17,5\%$.

Berdasarkan pengujian berat isi lapangan serta data pengujian pemadatan “satu titik”, diperoleh nilai-nilai sebagai berikut:

- Berat isi kering lapangan = $1,70 \text{ ton/m}^3$
- Derajat kepadatan = $\frac{\text{berat isi kering lapangan}}{\text{berat isi kering maksimum}} = \frac{1,70}{1,73} = 98\%$
- Kadar air lapangan hampir sama dengan kadar air optimum



Keterangan: BIKM = Berat Isi Kering Maksimum; KAO = Kadar Air Optimum

Gambar 47. Kurva kepadatan tipikal tanah Ohio
(Sumber: Yoder, 1975)

7.8. Peralatan pemadatan di lapangan

Meskipun setiap peralatan pemindahan tanah dapat memadatkan tanah, namun untuk mendapatkan kepadatan yang memadai, umumnya masih diperlukan satu atau lebih peralatan yang khusus untuk pemadatan.

Peralatan pemadatan dapat dibagi menjadi tiga kelompok sebagai berikut:

- a. Mesin pemadat roda (*rollers*): *smooth-wheeled, pneumatic-tyred and tamping rollers*, dan peralatan pembangunan (pemindahan tanah).
- b. Mesin pemadat getar (*vibrators*): *rollers and paltes*.
- c. Mesin pemadat tumbuk (*rammers*): *power rammers, tampers and falling weights*.

Gambar-gambar peralatan yang ditunjukkan pada butir ini bersumber dari Horner (1988).

7.8.1. Mesin pemadat roda (*rollers*)

Alat ini bekerja dengan menekan tanah sambil bergerak maju dan mundur.

7.8.1.1. Mesin pemadat roda besi halus (*smooth-wheeled rollers*)

Alat ini memiliki mesin sendiri dan terdiri atas tiga atau dua roda besi. Berat mati alat berkisar antara 1,7 sampai 17 ton dimana berat tersebut dapat dinaikkan dengan cara mengisi air atau pasir ke dalam roda atau dengan cara meletakkan beban pada rangka roda.

Tekanan alat yang bekerja pada tanah terkait dengan beban per satuan lebar roda. Oleh karena itu, besaran tersebut perlu diketahui, disamping berat total alat. Apabila alat mempunyai lebih dari satu sumbu, biasanya diperlukan beban per satuan lebar roda yang lebih besar. Kecepatan optimum alat umumnya antara 2,5 sampai 5 km/jam.

7.8.1.2. Mesin pemadat roda karet (*pneumatic-tyred rollers*)

Alat ini dapat ditarik atau mempunyai mesin sendiri dan dapat terdiri dari satu atau dua sumbu (Gambar 48). Pada alat yang terdiri atas dua sumbu, jumlah roda pada salah satu sumbu umumnya satu buah lebih sedikit daripada jumlah roda pada sumbu yang lain. Roda-roda pada kedua sumbu dipasang sedemikian rupa sehingga pada setiap lintasan, seluruh permukaan tanah terinjak roda. Berat alat dapat dinaikkan dengan cara meletakkan beban pada badan alat. Daya pemadatan dapat ditingkatkan dengan cara menambah tekanan roda. Agar dapat menyesuaikan dengan permukaan yang tidak rata, biasanya roda dapat naik-turun dalam batas tertentu. Kecepatan optimum biasanya berkisar antara 1,6 sampai 24 km/jam. Agar daya tekan alat terhadap tanah lebih besar, terdapat jenis mesin gilas yang rodanya dapat dimiringkan ke samping (*wobble from side to side*).

7.8.1.3. Mesin pemadat roda besi grid (*grid rollers*)

Unit pemadatan alat ini terdiri atas roda besi yang permukaannya berbentuk segmen-segmen (*mesh*) serta dapat dibebani dengan blok beton (Gambar 49). Alat ini umumnya ditarik dan dapat beroperasi pada kecepatan 5 sampai 24 km/jam; berat bersih alat adalah sekitar 5,5 ton, berat setelah dibebani sekitar 15 ton.

7.8.1.4. Mesin pemadat roda berduri (*tamping rollers*)

Mesin pemadat kaki kambing (*sheep's-foot rollers*) dan mesin pemadat bantalan (*pad rollers*) merupakan jenis-jenis mesin pemadat roda berduri yang dilengkapi dengan kaki (Gambar 50). Alat ini dapat ditarik atau mempunyai mesin sendiri dan terdiri atas satu atau beberapa sumbu serta dapat ditambahi beban sesuai dengan keperluan. Kaki mempunyai bentuk yang

bermacam-macam (lingkaran, bujur sangkar atau empat persegi panjang); demikian juga panjang dan keruncingannya. Kecepatan optimum alat berkisar antar 4 sampai 10 km/jam. Pada permukaan roda dipasang tonjolan-tonjolan (duri). Bentuk duri antara satu roda dengan roda yang lain berbeda-beda; dapat berbentuk lingkaran, bujur sangkar atau empat persegi panjang; demikian pula ukuran dan keruncingannya.

7.8.1.5. Peralatan pelaksanaan (*construction traffic*)

Efektifitas peralatan pemindahan tanah hampir sama dengan efektifitas mesin pemadat roda karet. Namun demikian, pemadatan dengan alat pembangunan sulit dijamin kepadatan dan kerataannya, karena peralatan tersebut tidak bisa dioperasikan pada kecepatan di bawah kecepatan normal.

Sehubungan dengan hal di atas, pemadatan oleh peralatan pembangunan seringkali dianggap sebagai bonus. Alat yang operasinya terkonsentrasi pada daerah tertentu saja dapat mengakibatkan pemadatan berlebih (*over compaction*), terjadinya alur atau kerusakan timbunan.

7.8.2. Mesin pemadat getar (*vibrating compactors*)

Daya pemadatan alat ini diperoleh dalam bentuk energi tekanan dan getaran, baik yang disalurkan melalui roda maupun pelat.

7.8.2.1. Mesin pemadat roda getar (*vibrating rollers*)

Alat ini dapat ditarik atau mempunyai mesin sendiri (Gambar 51) atau dikendalikan secara manual (Gambar 52); berat statis alat berkisar antara 0,5 sampai 17 ton. Alat yang ditarik dan yang mempunyai mesin sendiri umumnya beroperasi pada kecepatan antara 1,5 sampai 2,5 km/jam, sedangkan alat yang dikendalikan secara manual mempunyai kecepatan antara 0,5 sampai 1 km/jam.

Efektifitas alat pada kecepatan tinggi umumnya lebih rendah daripada efektifitas alat pada kecepatan rendah, meskipun jumlah lintasan pada kecepatan tinggi lebih banyak daripada jumlah lintasan pada kecepatan rendah.

Frekwensi getar umumnya ditetapkan oleh pabrik dan berkisar antara 20 sampai 30 Hz untuk alat yang berat dan antara 45 sampai 75 Hz untuk alat yang lebih ringan, meskipun dewasa ini telah dikembangkan alat pemadat yang getarannya dapat diatur. Apabila getaran tidak dioperasikan, maka kinerja alat dianggap berdasarkan berat mati saja.

Permukaan roda biasanya halus, meskipun ada pabrik yang membuat roda dengan permukaan yang diberi tonjolan.

7.8.2.2. Mesin pemadat pelat getar (*vibrating plate compactors*)

Alat ini mempunyai berat yang berkisar antara 100 kg sampai 2 ton dengan luas pelat antara 0,16 sampai 1,6 m². Alat yang berukuran kecil dikendalikan secara manual dan dioperasikan untuk memadatkan tanah pada daerah-daerah berukuran kecil atau pada daerah-daerah dimana alat-alat berukuran besar sulit dioperasikan (Gambar 53). Kecepatan operasi alat adalah sekitar 0,7 km/jam.

7.8.2.3. Mesin pemadat getar (*vibrotampers*)

Alat ini mempunyai berat yang berkisar antara 50 sampai 100 kg. Daya pemadatan diperoleh melalui vibrasi pelat yang dilengkapi dengan pegas. Pengoperasian alat umumnya

dikendalikan secara manual dan tidak cocok untuk pemadatan berat, meskipun cocok untuk pemadatan pada daerah yang tertutup (*confined areas*).

7.8.3. Mesin pemadat tumbuk (*compaction by impact*)

Terdapa tiga jenis alat pemadat tumbuk untuk tanah dan batuan, yaitu penumbuk bermesin (*power rammers*), penumbuk dijatuhkan (*weight dropping rammers*) dan konsolidasi dinamis (*dynamic consolidation*).

7.8.3.1. Mesin pemadat tumbuk bermesin (*power rammers*)

Alat ini mempunyai berat sekitar 100 kg dan digunakan untuk pemadatan tanah pada daerah-daerah kecil atau daerah-daerah sulit. Ledakan dalam ruang pembakaran mengakibatkan mesin terdorong ke atas dan selanjutnya terjadi benturan pelat terhadap tanah sehingga mengakibatkan pemadatan. Dewasa ini terdapat pula alat khusus yang berukuran lebih besar.

7.8.3.2. Mesin pemadat dijatuhkan (*weight dropping rammers*)

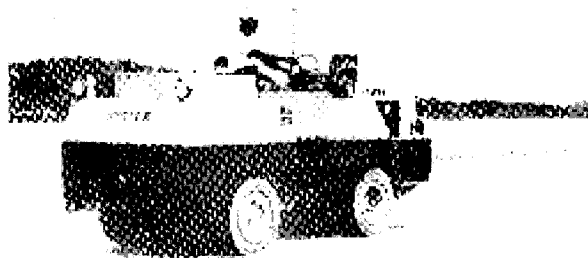
Alat ini terdiri dari beban seberat 180 kg atau lebih yang dijatuhkan melalui tiang pengarah dari ketinggian sekitar 3 m.

7.8.3.3. Mesin pemadat konsolidasi dinamis (*dynamic consolidation*)

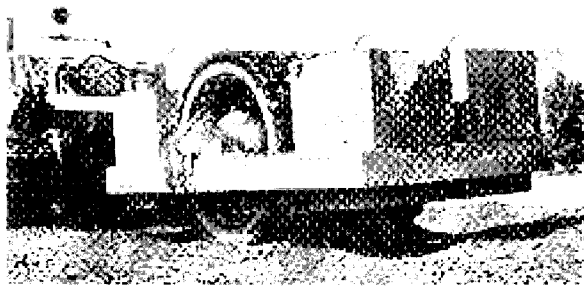
Alat terdiri atas beban yang dijatuhkan dari ketinggian sekitar 15 sampai 40 m sehingga pada saat membentur tanah mempunyai daya tumbuk yang berkisar antara 150 sampai 500 ton-meter.

Pengoperasian alat dilakukan dengan menggunakan kran dan beban berukuran besar serta menyangkut pemantauan permukaan air, kepadatan, kekuatan dan daya dukung tanah sebelum dan sesudah pemadatan.

Alat biasanya digunakan oleh kontraktor husus (*specialist*) untuk pemadatan tanah yang mudah memadat (*compressible*), mempunyai kedalaman sampai 30 m dan mencakup daerah yang luas.



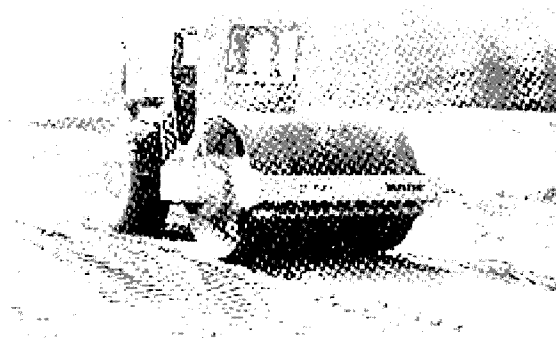
Gambar 48. Hyster C5330A pneumatic-tyred compactor



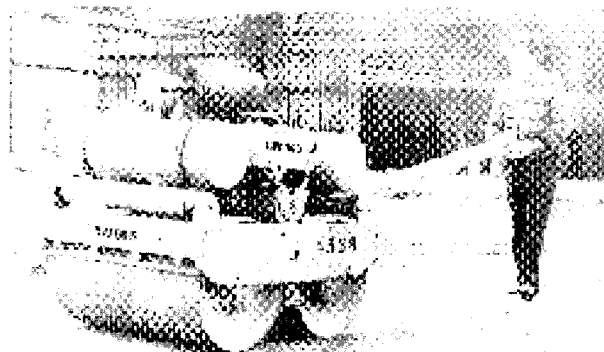
Gambar 49. *Hyster model D towed grid roller*



Gambar 50. *Bomag K300 self-propelled tamping roller*



Gambar 51. *Bomag BW 212S self propelled vibrating roller*



Gambar 52. *Bomag BW 90S manually guided vibrating roller*



Gambar 53. Bomag P2000 vibrating plate compactor

7.8.4. Kinerja peralatan pemadatan

Secara ringkas, kinerja beberapa jenis peralatan diuraikan di bawah.

- Mesin pemadat roda besi (*smooth-wheel rollers*)
 - Mesin pemadat cocok untuk pemadatan kerikil, pasir dan batu pecah.
 - Pengendalian kadar air adalah kritis untuk mendapatkan stabilitas mekanis kerikil dan pasir (kadar air tersebut perlu disesuaikan dengan kadar air optimum pada pemadatan ringan).
 - Tebal lapis yang dipadatkan tergantung pada bobot mesin pemadat, namun secara umum berkisar antara 15 cm (6 in) sampai 45 cm (18 in).
- Mesin pemadat roda karet (*pneumatic-tyred rollers*)
 - Mesin pemadat roda karet paling cocok untuk memadatkan tanah berbutir halus, terutama pasir bergradasi seragam.
 - Untuk pemadatan tanah kohesif, kinerja mesin pemadat roda karet paling baik apabila pemadatan dilakukan pada kadar air 2-4 persen di bawah batas plastis tanah. Namun demikian, kadar air optimum akan turun apabila beban dan tekanan ban meningkat.
 - Secara umum, tebal lapis yang dipadatkan sebaiknya tidak lebih dari 22,5 cm (9 in). Kepadatan yang lebih tinggi dapat dicapai apabila tebal lapisan kurang dari 22,5 cm.
- Mesin pemadat kaki kambing (*sheepfoot rollers*)
 - Paling cocok untuk memadatkan tanah kohesif.
 - Pemadatan perlu dilakukan pada kadar air yang kira-kira sama dengan kadar air optimum pada pengujian berat.
 - Untuk mendapatkan kepadatan yang cukup diperlukan sekurang-kurangnya 24 lintasan.
 - Lapis yang dipadatkan sebaiknya tidak lebih dari 5 cm lebih tebal dari panjang kaki.
 - Rongga udara tanah yang dipadatkan dengan mesin pemadat kaki kambing adalah lebih besar daripada rongga udara tanah yang dipadatkan dengan mesin pemadat roda besi atau mesin pemadat roda karet. Hal tersebut dapat mempunyai pengaruh jelek terhadap tanah dasar, karena rongga udara yang besar cenderung menyerap air.

- Mesin pemadat getar (*vibrators*)
Mesin pemadat getar dipandang cocok untuk pemadatan pasir atau kerikil-pasir yang harus mempunyai kepadatan tinggi. Mesin pemadat getar berukuran kecil sangat berguna untuk pemadatan pada lokasi dimana penggunaan mesin pemadat lain tidak memungkinkan (misal karena ruang yang terbatas).
- Mesin pemadat tumbuk (*rammers*)
 - Dapat memadatkan tanah tidak kohesif lapisan yang relatif tebal.
 - Tabal lapisan lempung yang dipadatkan sebaiknya tidak lebih dari 22,5 cm (9 in).
 - Untuk mendapatkan kepadatan yang memadai, tebal lapisan yang dipadatkan tergantung pada diameter mesin pemadat.
 - Kadar air tanah yang dipadatkan dengan mesin pemadat tumbuk (*rammers*) yang berat sebaiknya dipertahankan agak di bawah kadar air optimum menurut pengujian pemadatan ringan.
 - Karena keterbatasan produknya, mesin pemadat tumbuk hanya digunakan untuk lokasi-lokasi husus dimana mesin pemadat lain tidak praktis; misal untuk pemadatan tanah urugan pada parit, pemadatan tanah urugan di sekitar oprit jembatan.
- Kesimpulan umum
Secara umum, kinerja mesin pemadat dapat dirangkum sebagai berikut:
 - Kinerja mesin pemadat tergantung pada jenis tanah, gradasi dan kadar air.
 - Pemilihan mesin pemadat yang cocok harus mempertimbangkan faktor-faktor di atas.
 - Tingkat kecocokan berbagai mesin pemadat dengan berbagai jenis tanah adalah:
 - Mesin pemadat roda besi paling cocok untuk pemadatan batu pecah, kerikil dan pasir.
 - Mesin pemadat roda karet cocok untuk pemadatan pasir bergradasi seragam dan tanah kohesif (dipadatkan pada kadar air yang mendekati batas plastisnya).
 - Mesin pemadat kaki kambing cocok untuk pemadatan tanah kohesif (dipadatkan pada kadar air yang berkisar antara 7 dan 12 persen di bawah batas plastisnya).
 - Mesin pemadat getar cocok untuk pemadatan tanah berbutir.
 - Berat isi kering makin menurun sesuai dengan kedalaman. Dengan mesin pemadat normal, pemadatan lapisan lepas yang tebalnya sampai 22,5 cm (9 in) tidak menunjukkan penurunan berat isi kering yang besar, tetapi apabila lapisan lepas tebalnya lebih dari 22,5 cm (9 in), maka penurunan berat isi kering cukup nyata.
 - Apabila lapisan yang dipadatkan lebih tipis, maka usaha yang sedikit dapat mengeluarkan udara dalam tanah jauh lebih cepat.
 - Pemadatan tanah (mulai dari lempung berat sampai pasir) dengan mesin pemadat getar jenis pembakaran internal dan udara bertekanan (*internal combustion and pneumatic types*) dapat memberikan hasil yang berlipat apabila tebal lapisan berkurang dari 20 cm (8 in) menjadi 10 cm (4 in).

7.9. Dasar pemilihan peralatan pemadatan lapangan

Agar pemadatan efisien, pemilihan peralatan dan kombinasinya yang tepat merupakan faktor yang penting. Empat faktor utama yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan peralatan pemadatan adalah sebagai berikut:

- a. Faktor tanah (*material factors*): jenis, sifat dan keseragaman
- b. Faktor setempat atau ruang (*spatial factors*): volume, luas, posisi dan waktu yang tersedia
- c. Faktor peralatan (*plant factors*): jenis, karakteristik operasi, produk (*output*) dan satuan biaya
- d. Faktor lain (*other factors*): batasan-batasan dalam kontrak dan peraturan yang mungkin mempengaruhi pemilihan dan penggunaan alat

7.9.1. Faktor bahan (*material factors*)

Faktor-faktor bahan yang sangat mempengaruhi pemadatan tanah dan batuan adalah jenis, kadar air, kekuatan dan gradasi. Disamping itu, variabilitas jenis dan sifat juga merupakan faktor yang perlu diperhitungkan.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 9, bahan timbunan dikelompokkan menjadi 'tanah kohesif', 'tanah berbutir dan tanah kohesif kering', 'tanah berbutir gradasi seragam' dan 'batuan'. Tebal lapisan tanah yang dipadatkan tergantung pada jumlah lintasan serta jenis dan ukuran peralatan pemadatan.

Dalam menentukan kombinasi peralatan dan usaha pemadatan yang dapat mencapai hasil yang ditetapkan dalam spesifikasi, kontraktor diberi hak untuk melakukan beberapa percobaan. Hubungan antara jenis dan ukuran peralatan pemadatan dengan jenis bahan ditunjukkan pada Tabel 13.

Apabila di lapangan dijumpai beberapa jenis tanah yang mempunyai sifat yang berbeda, idealnya pemadatan dilakukan dengan beberapa jenis alata. Untuk proyek yang besar, hal tersebut akan ekonomis, tapi untuk proyek yang kecil akan terjadi hal yang sebaliknya. Dalam praktek, kedua aspek tersebut perlu dikompromikan; dimana beberapa jenis alat yang terbatas digunakan secara efisien sehingga masa menganggur peralatan dapat diminimumkan. Pengembangan mesin pemadat getar ahir-ahir ini telah memungkinkan digunakannya alat tersebut untuk berbagai jenis tanah.

Mesin pemadat roda besi halus, baik yang tidak bergetar maupun yang bergetar, dapat dikombinasikan dengan mesin pemadat lain; misal, pada memadatkan/ meratakan permukaan tanah yang sebelumnya telah dipadatkan dengan mesin pemadat kakai kambing.

Tabel 13. Peralatan pemadatan yang dipandang sesuai dengan jenis tanah
(Sumber: Horner, 1988)

JENIS PERALATAN	TANAH KOHEISIF		TANAH BERBUTIR				BATUAN	
	BASAH	KERING	GRADASI MENERUS		GRADASI SERAGAM		LUNAK	KERAS
			KSR	HLS	KSR	HLS		
▪ <i>Smooth wheeled roller</i>		✓	✓	✓			✓	
▪ <i>Pneumatic-tyred roller</i>	✓		✓	✓	✓	#	#	#
▪ <i>Tamping roller</i>	✓	✓	#	✓	#		#	
▪ <i>Grid roller</i>		✓	✓	✓	✓	#	✓	#
▪ <i>Vibrating roller</i>	#	✓	✓	✓	✓	✓	#	✓
▪ <i>Vibrating plate</i>		#	✓	✓	✓	✓	#	✓
▪ <i>Vibro-tamper</i>		✓	✓	✓	✓	✓	#	✓
▪ <i>Power rammer</i>	#	✓	✓	✓			#	#
▪ <i>Dropping weight</i>		✓	✓	✓			✓	✓
▪ <i>Dynamic consolidation</i>	#	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Keterangan: ✓ = sangat cocok; # = dapat digunakan tapi kurang efektif

Pada pemadatan batuan lunak (*chalk, marl, mudstone dan shales*) seringkali dialami kesulitan, terutama apabila batuan tersebut merupakan batuan lapuk. Ketidakstabilan timbunan biasanya diakibatkan oleh penghancuran struktur batuan pada saat penggalian, pengangkutan dan pemadatan serta peningkatan tegangan air pori pada saat pemadatan. Persoalan menjadi tambah parah apabila batuan merupakan batuan lapuk yang bongkahan-bongkahannya hancur, baik sebagian ataupun seluruhnya. Kehancuran struktur batuan dapat diminimumkan melalui penggunaan alat yang dipandang sesuai (*back-acters* atau *face shovel* untuk penggalian, *dump truck* untuk pengangkutan dan *grid* atau *deadweight roller*

untuk pemadatan) serta mengatur peralatan pembangunan sedemikian rupa sehingga seluruh permukaan timbunan terlewati secara merata.

7.9.2. Faktor ruang (*spatial factors*)

Secara umum, mesin pemadat yang mempunyai ukuran lebih berat mempunyai produktifitas yang lebih tinggi daripada mesin pemadat ukuran kecil, karena alat yang lebih besar dapat memadatkan lapisan yang lebih tebal dengan jumlah lintasan yang lebih sedikit.. Namun demikian, alat berukuran besar kurang lincah dan kurang cocok beroperasi pada daerah tertutup (*confined areas*).

Sehubungan dengan hal di atas, seringkali perlu dilakukan penghitungan volume masing-masing jenis tanah yang akan dipadatkan serta waktu yang diperlukan untuk pemadatan. Disamping itu, diperlukan pemahaman mengenai topografi dan bentuk daerah kerja, agar dapat dipilih jenis alat yang cocok. Pemadatan pada daerah kerja yang luas biasanya dilakukan dengan alat berukuran besar, baik yang ditarik atau yang mempunyai mesin sendiri (misal, mesin pemadat beroda besi halus, grid, karet atau mesin pemadat getar). Pada daerah yang sempit (misal pada daerah yang banyak bangunan atau pada pekerjaan drainase), pemadatan biasanya dilakukan dengan mesin pemadat berukuran kecil, misal mesin pemadat pelat atau tumbuk getar, atau *power rammers*.

7.9.3. Faktor peralatan (*plant factors*)

Berdasarkan faktor bahan dan faktor setempat telah dapat ditentukan jenis dan ukuran alat umum. Penentuan jenis, ukuran dan kombinasi alat yang paling efisien dilakukan sangat tergantung pada faktor peralatan. Produktifitas (*output rates*) pemadatan dapat diperoleh berdasarkan informasi yang dikeluarkan pabrik alat, percobaan, atau pengalaman.

Faktor peralatan yang dipandang penting menyangkut waktu yang diperlukan untuk pemadatan (*t*), jumlah alat (*N*) dan biaya pemadatan.

- Waktu pemadatan yang diperlukan oleh satu buah alat (*t*)

$$t = \frac{\text{volume tanah yang akan dipadatkan}}{\text{produktifitas}} \dots\dots\dots 71$$

- Jumlah alat (*N*) yang diperlukan dalam waktu yang tersedia (*T*)

$$N = \frac{\text{waktu yang diperlukan oleh satu alat}}{\text{waktu yang tersedia}} = \frac{t}{T} \dots\dots\dots 72$$

- Biaya total untuk pengoperasian satu jenis alat (*C*)

$$\begin{aligned} C &= \text{jumlah alat} \times \text{biaya satuan operasi alat (c)} \times \text{waktu yang tersedia} \\ &= N \times c \times T = c \times t \dots\dots\dots 73 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan di atas mungkin perlu disesuaikan, apabila ternyata alat tidak tersedia pada saat diperlukan atau diperlukannya beberapa jenis alat.

Apabila volume tanah yang dipadatkan kecil atau apabila pemadatan harus dilakukan dalam waktu yang tidak menerus, maka dalam jangka panjang, alat dapat digunakan pada efisiensi yang lebih kecil daripada efisiensi puncaknya. Hal tersebut dilakukan terutama apabila pada saat tidak diperlukan untuk pekerjaan tanah, alat digunakan untuk pekerjaan lain (misal pemadatan lapis pondasi perkerasan). Pertimbangan tersebut merupakan faktor yang meningkatkan popularitas mesin pemadat getar, karena alat tersebut dapat digunakan untuk

berbagai jenis keperluan; contoh, untuk pemadatan volume kecil, mesin pemadat getar yang sama dapat digunakan untuk tanah curah, batuan dan lapis pondasi.

7.9.4. Faktor kontraktual (*contractual factors*)

Pada situasi tertentu, pemilihan peralatan mungkin dibatasi oleh ketentuan dalam spesifikasi. Kasus di atas ditunjukkan oleh contoh spesifikasi yang menetapkan bahwa tebal setiap lapisan batuan lepas tidak boleh lebih dari 450 mm, penghamparan dan perataan harus dilakukan dengan *crawler tractor* yang mempunyai berat sekurang-kurangnya 15 ton, pemadatan harus dilakukan sebanyak 12 lintasan dengan mesin pemadat roda getar yang mempunyai berat sekurang-kurangnya 180 kg/m lebar roda. Apabila batuan digunakan sebagai timbunan umum, ketentuan tersebut tidak berlaku dan batuan harus dipadatkan sebagaimana halnya dengan tanah berbutir gradasi menerus.

8. Keselamatan kerja dan pengendalian lingkungan pada pelaksanaan pekerjaan tanah

8.1. Keselamatan kerja

Kecelakaan akan mengakibatkan rasa sakit, penderitaan, kehilangan semangat dan kehilangan sumber daya. Kehilangan waktu akibat kecelakaan dalam industri, termasuk industri konstruksi, lebih besar daripada yang diperkirakan. Sebagian besar kecelakaan disebabkan oleh kecerobohan sesaat atau kurang hati-hati dalam pelaksanaan tugas.

Sehubungan dengan hal di atas, untuk menjamin keselamatan kerja (termasuk kesehatan) dalam pelaksanaan pekerjaan tanah, perlu diikuti ketentuan dan peraturan yang berlaku, disamping memasang rambu-rambu dan perlengkapan pengamanan.

Beberapa aspek keselamatan yang biasanya dijumpai pada saat pelaksanaan pekerjaan tanah diuraikan di bawah, termasuk cara mengatasinya.

8.1.1. Keselamatan pada saat pembangunan dan pemeliharaan jalan secara umum

Selama pembangunan atau pemeliharaan jalan, umumnya para pekerja dan alat-alat pelaksanaan harus bekerja pada lajur lain, di samping atau menyebrang jalan yang ada. Meskipun telah dilengkapi dengan rambu-rambu peringatan sementara di sekitar lokasi pekerjaan, namun pengemudi kadang-kadang tidak memperlambat laju kendaraannya, karena mungkin dipandang tidak menyangkut keselamatan dirinya. Penyebab lain adalah pengabaian pesan yang tercantum pada rambu-rambu, yaitu sebagai akibat seringnya rambu-rambu dibiarkan di tempatnya, meskipun tidak ada kegiatan.

Pemberian perlindungan kepada pekerja pada saat pembangunan dan pemeliharaan jalan merupakan upaya yang sulit. Namun demikian, beberapa upaya yang dapat dilakukan adalah, pengaturan lalu-lintas yang ada, penggunaan jaket (berwama oranye) dan helm pengaman serta pemberian instruksi dan pelatihan tentang keselamatan kerja. Pada beberapa jenis kendaraan dan peralatan dapat dipasang alat penyerap energi (*energy-absorbing devices*).

8.1.2. Bahaya pada saat pelaksanaan pekerjaan tanah

Beberapa bahaya yang perlu dihindarkan selama pelaksanaan pekerjaan tanah adalah:

- a. Runtuhnya lereng sementara merupakan penyebab yang biasanya menimbulkan kecelakaan. Lereng sementara yang runtuh dapat terjadi pada galian, timbunan atau parit. Apabila potensi terjadinya keruntuhan besar, maka perlu dilakukan pengkajian/

penghitungan stabilitas Lereng; apabila dipandang perlu, lereng dibuat selandai mungkin atau ditahan dengan bangunan penahan tanah. Perhatian khusus perlu diberikan apabila ditemukan air tanah, dimana hal tersebut akan mengurangi stabilitas.

- b. Alat berat tidak boleh ditempatkan atau beroperasi dekat lereng, kecuali apabila pada disain sudah ditunjukkan secara khusus bahwa penempatan alat tersebut aman.
- c. Penggalian tanah pada tebing perlu dipastikan bahwa tebing tidak menggantung (*overhang*) atau terlalu tinggi. Operator perlu bekerja sangat hati-hati, agar apabila tebing runtuh, tanah tidak menimpa operator.
- d. Penggalian tebing bertangga perlu dilakukan secara hati-hati sehingga dipastikan bahwa dari tebing bagian atas tidak terjadi guguran tanah.
- e. Galian yang dibiarkan terbuka pada malam hari perlu diberi penghalang dan bila memungkinkan, dipasang lampu peringatan tanda bahaya.
- f. Bahan peledak harus ditangani oleh tenaga yang benar-benar berpengalaman dan harus disimpan sesuai dengan peraturan yang berlaku.
- g. Pada saat peledakan, setiap orang harus berada di luar daerah berbahaya. Peledakan yang mengakibatkan berterbangannya tanah harus ditinjau kembali dan apabila diperlukan dilakukan dengan memasang jaring.

8.1.3. Bahaya pada saat pengoperasian peralatan

Pada saat pengoperasian peralatan pekerjaan tanah, beberapa bahaya yang perlu dihindarkan adalah:

- a. Peralatan harus dioperasikan di sepanjang jalan kerja, disamping di lokasi pekerjaan. Sebaiknya jalan kerja dibuat terpisah dengan jalan bagi pejalan kaki dan lalu-lintas.
- b. Jalan kerja harus terpelihara dengan baik, mempunyai jarak pengereman minimum, mempunyai kelandaian serendah-rendahnya dan pada waktu panas, permukaannya harus disiram air agar tidak berdebu.
- c. Jarak pandang dari peralatan besar biasanya terbatas, sehingga daerah di sekitar alat tersebut sebaiknya dibuat bebas penghalang pandangan. Apabila hal tersebut sulit dilakukan, misal pada saat pengukuran atau pengujian, maka para operator harus diingatkan secara lisan atau melalui tanda-tanda peringatan. Penempatan kendaraan di daerah kerja sebaiknya dihindarkan, karena ada kemungkinan kendaraan tersebut tertabrak alat berat yang dikemudikan oleh operator yang kurang hati-hati.
- d. Penghalang yang terletak di atas (misal kabel, jembatan atau bangunan-bangunan sementara) yang dipandang akan mengganggu, harus diberi tanda yang jelas.
- e. Pada saat bergerak horizontal di tebing, alat berat biasanya kurang stabil. Oleh karena itu, pergerakan alat perlu diupayakan menaik atau menurun tebing.
- f. Posisi alat yang menuangkan tanah harus cukup jauh dari tepi timbunan; selanjutnya tanah didorong ke tepi timbunan dengan dozer. Apabila penuangan tanah perlu dilakukan dekat tepi timbunan, maka pada tepi timbunan harus dipasang ganjal.
- g. Peralatan yang menggunakan jalan umum harus mengikuti peraturan yang berlaku. Apabila pada saat menggunakan jalan umum terjadi tumpahan tanah, maka untuk mencegah kecelakaan, jalan harus dibersihkan. Pada saat memasuki jalan umum, roda peralatan berat harus bersih. Hal tersebut sangat penting, terutama pada musim hujan.

8.2. Pengendalian lingkungan

8.2.1. Umum

Meskipun idealnya setiap pembangunan jalan tidak boleh mengganggu lingkungan, tetapi memperbaikinya, namun pada kenyataannya hal tersebut sulit dihindarkan. Oleh karena itu, dampak pembangunan terhadap lingkungan perlu menjadi kepedulian semua pihak serta perlu mendapat perhatian dan upaya pencegahan semaksimal mungkin.

Dua persoalan dampak lingkungan yang mendapat perhatian dunia adalah pencemaran dan pengurangan sumber daya alam; sedangkan beberapa dampak lingkungan yang langsung berpengaruh terhadap masyarakat di sekitar proyek adalah polusi udara, kebisingan dan pengerasan permukaan tanah.

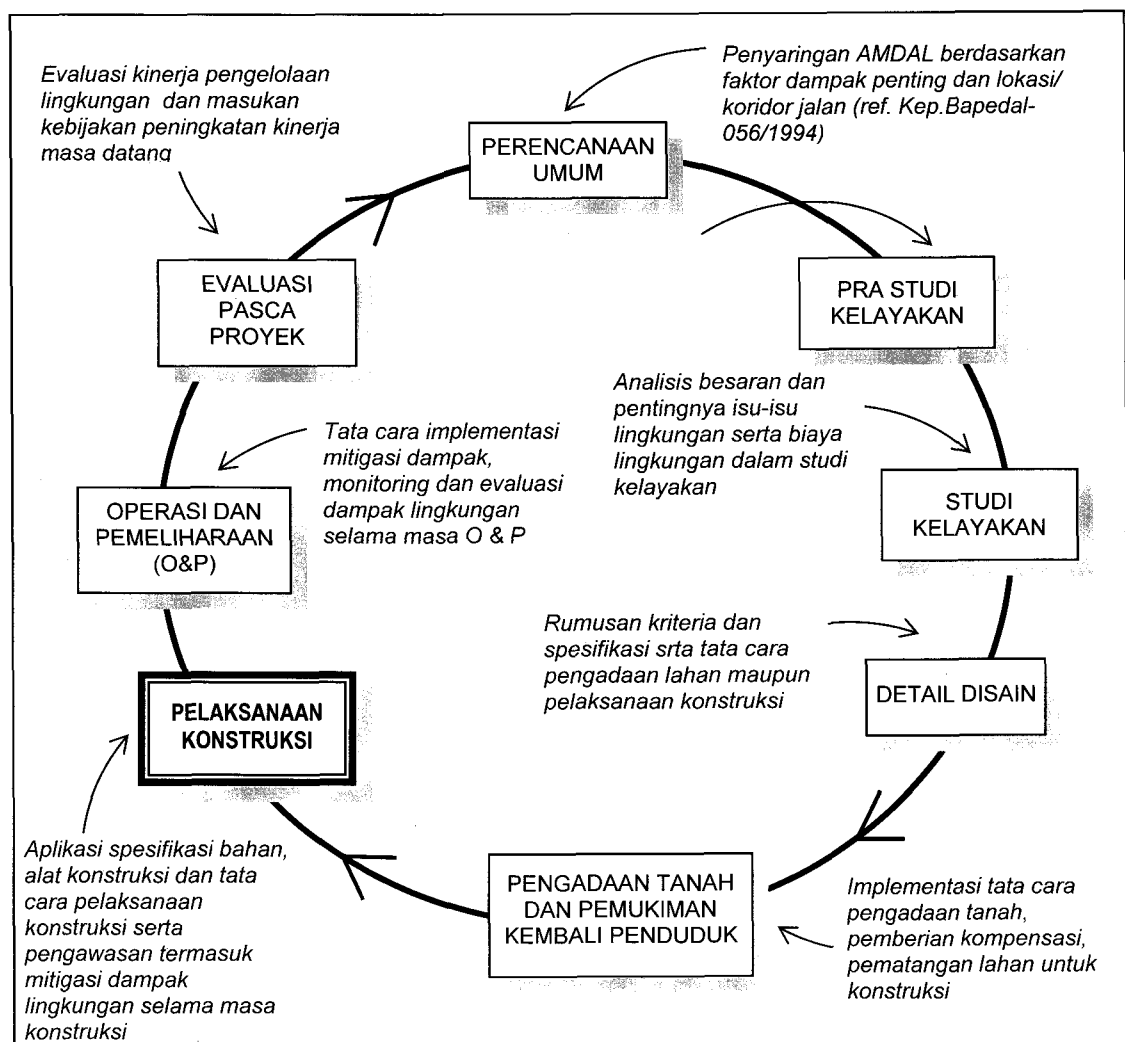
Dalam rangka mengurangi dampak lingkungan; maka pembangunan, pengoperasian dan pemeliharaan jalan perlu mengikuti peraturan dan perundang-undangan yang berlaku, baik yang diterbitkan oleh daerah maupun yang diterbitkan oleh pusat.

Pedoman pengendalian lingkungan yang telah disusun oleh Departemen Pekerjaan Umum, diantaranya adalah:

- 1) Pedoman Umum Pengelolaan Lingkungan Hidup Bidang Jalan.
- 2) Pedoman Perencanaan Pengelolaan Lingkungan Hidup Bidang Jalan.
- 3) Pedoman Pelaksanaan Pengelolaan Lingkungan Hidup Bidang Jalan.
- 4) Prosedur Penanganan Dampak Lingkungan Hidup Bidang Jalan dan Jembatan.

Secara umum, pengendalian lingkungan pada setiap tahap pembangunan, pengoperasian dan pemeliharaan jalan ditunjukkan pada Gambar 54.

Sesuai dengan lingkup pedoman ini, pada butir ini diuraikan beberapa dampak serta upaya pengendalian lingkungan yang seyogyanya dilakukan pada pelaksanaan pekerjaan tanah.



Gambar 54. Siklus pengelolaan dan pemantauan lingkungan

8.2.2. Koordinasi dengan instansi dan masyarakat

Karena pelaksanaan pekerjaan tanah mencakup berbagai aspek, terutama yang terkait dengan lingkungan, maka sebelum memulai pelaksanaan sebaiknya dilakukan koordinasi dengan instansi dan masyarakat yang dipandang akan terkait dengan pelaksanaan pekerjaan tanah. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindari terjadinya hambatan pelaksanaan.

8.2.3. Perlindungan terhadap masyarakat serta lahan dan tempat khusus

Pelaksanaan pekerjaan tanah harus menjamin setiap saat keselamatan dan kenyamanan masyarakat di sekitar lokasi pekerjaan serta melindungi harta benda masyarakat.

Lahan dan tempat khusus, antara lain, alam yang indah, taman dan tempat rekreasi, cagar alam dan cagar budaya serta peninggalan arkeologi perlu dilindungi. Oleh karena itu, pelaksanaan pekerjaan tanah perlu menghindari terjadinya gangguan terhadap lahan dan tempat tersebut. Apabila "terpaksa" tidak dapat dihindarkan, maka harus dapat dibuktikan bahwa tidak ada alternatif lain yang layak dan telah dilakukan berbagai kemungkinan perencanaan untuk meminimumkan dampak negatif terhadap lingkungan.

8.2.4. Pemeliharaan kelancaran lalu-lintas dan lingkungan

Apabila selama pelaksanaan pekerjaan digunakan jalan umum, maka perlu dilakukan pengaturan sedemikian rupa sehingga gangguan terhadap lalu-lintas yang ada menjadi sekecil mungkin. Pada kondisi tertentu, mungkin perlu membangun jalan kerja tersendiri. Disamping itu, perlu dilakukan upaya untuk memastikan bahwa masyarakat di sekitar jalan tetap merasa nyaman dan aman. Pengendalian debu (misal dengan cara menyiram permukaan jalan dengan air) di daerah permukiman di sekitar jalan merupakan upaya yang perlu dilakukan. Ketentuan mengenai pemeliharaan lalu-lintas yang ada biasanya dicantumkan dalam spesifikasi.

8.2.5. Mobilisasi dan demobilisasi peralatan

Dua aspek utama yang perlu diperhatikan pada saat mobilisasi dan demobilisasi peralatan adalah kekuatan jalan (terutama jembatan) yang akan dilalui serta gangguan terhadap lalu-lintas yang ada.

Aspek yang pertama mungkin memerlukan penguatan jembatan dan jalan yang ada, bahkan mungkin perlu membangun jembatan dan jalan sementara; sedangkan aspek yang kedua dapat dikurangi, antara lain, melalui penggunaan kendaraan khusus untuk mengangkut peralatan, yang dilengkapi dengan peralatan tanda perhatian, misal lampu (*rotary lamps*).

8.2.6. Pengangkutan bahan

Untuk penyiapan tanah dasar, kemungkinan besar perlu mendatangkan bahan dari luar lokasi proyek. Hal tersebut tentunya akan meningkatkan lalu-lintas pada jalan lokal, apabila tidak disediakan jalan khusus.

Beberapa dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkan oleh kendaraan pengangkut bahan adalah: gangguan terhadap kelancaran lalu lintas yang ada, kebisingan, pengotoran udara; pengotoran lingkungan oleh tanah yang berjatuh, bahkan mungkin dapat menimbulkan kecelakaan. Disamping itu, ada kemungkinan jembatan yang ada tidak mampu melayani kendaraan yang mengangkut bahan.

Upaya untuk mengurangi dampak lingkungan akibat pengangkutan bahan, diantaranya adalah:

- 1) Membangun jalan khusus untuk pengangkutan bahan. Apabila penyediaan jalan khusus tidak memungkinkan, maka dapat diatur agar kendaraan pengangkut bahan diijinkan menggunakan jalan umum hanya pada rute-rute atau waktu-waktu tertentu saja. Disamping itu, pada lokasi dimana kendaraan bahan memasuki atau keluar dari jalan umum perlu ditempatkan tenaga pengatur lalu-lintas.
- 2) Menutup rapat bak kendaraan atau mengatur muatan sedemikian rupa sehingga bahan tidak berjatuh atau berterbangan, atau tidak mengakibatkan beban berlebih.
- 3) Menggunakan kendaraan yang laik pakai, terutama dalam kaitannya dengan gas buang serta kebisingan.
- 4) Pada saat memasuki jalan umum, terutama musim hujan, roda kendaraan harus bersih.
- 5) Apabila bahan yang diangkut berjatuh pada permukaan jalan sehingga menimbulkan bahaya bagi pengguna jalan lain atau menimbulkan debu, maka bahan tersebut harus secepatnya disingkirkan, atau apabila menyangkut debu, maka permukaan jalan dapat disemprot air.

8.2.7. Pembersihan lapangan (*clearing and grubbing*)

- 1) Apabila pemusnahan hasil pembersihan lapangan diijinkan dengan cara membakar, maka pembakaran harus diawasi oleh tenaga yang kompeten dan harus dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak merusak tumbuhan, harta benda dan benda-benda lain yang harus tetap berada di tempatnya. Disamping itu, pembakaran harus dapat berjalan cepat dan tanpa menimbulkan banyak asap. Pada akhir setiap masa pembakaran, nyala api harus dipastikan benar-benar padam dan tidak ada sisa-sisa bahan yang masih membara.
- 2) Benda-benda yang tidak dapat dimusnahkan dengan cara membakarnya harus dibuang dengan cara dan di tempat yang terpilih, baik di dalam maupun di luar proyek. Apabila pemusnahan dilakukan dengan cara mengubur, maka bahan buangan harus diletakkan secara berlapis dan diratakan, yaitu untuk menghindarkan terjadinya penumpukan (*nesting*). Setiap lapisan harus ditutup atau dicampur dengan tanah sehingga tidak terdapat rongga yang besar. Lapisan paling atas bahan buangan harus ditutup dengan sekurang-kurangnya 30 cm tanah atau bahan lain yang sesuai dan kemudian dipadatkan dan dibentuk sehingga mempunyai penampilan yang baik (*pleasing appearance*).

8.2.8. Penggalian (*excavation*)

- 1) Penggalian tanah harus memperhatikan "penyelamatan" tanah penutup (*top soil*) yang mungkin dapat digunakan untuk keperluan lain, misal untuk penyubur rumput pada lereng atau pohon-pohonan untuk lanskap. Sebelum digunakan, tanah penutup harus diangkut dan disimpan di tempat yang ditentukan.
- 2) Apabila dipandang akan mengganggu pohon dan benda tertentu atau batuan lapuk, atau untuk menyelaraskan dengan lanskap yang ada, maka kemiringan dan bentuk lereng galian perlu disesuaikan. Hal lain yang perlu diperhatikan tentang lereng galian dan timbunan adalah, ditinjau dari segi estetika, bidang lengkung (*naturally flowing planes*) adalah lebih baik daripada bidang lurus.
- 3) Penggalian tanah di sumber bahan harus dilakukan pada daerah yang paling layak (baik dari segi kehilangan sumber alam maupun dampak negatif terhadap lingkungan) dan diprioritaskan pada sumber bahan yang sudah dibuka. Apabila penggalian dilakukan pada atau dekat daerah aliran air, maka selama dan sesudah operasi penggalian harus dilakukan pengendalian agar erosi seminimum mungkin dan tidak terjadi sedimentasi pada daerah aliran air. Dalam hal tersebut, mungkin perlu memisahkan daerah galian (misal dengan membuat parit), menyaring bahan sedimen atau membuat kolam pengendapan. Setelah operasi penggalian selesai, daerah galian harus direhabilitasi

sehingga mempunyai kondisi yang tidak memungkinkan air tergenang, mempunyai lanskap yang baik (*pleasing appearance*) dan kesuburan tanah yang tetap terjaga.

8.2.9. Pengendalian erosi

Aliran air permukaan sering kali menimbulkan erosi yang dapat mengakibatkan berbagai gangguan, diantaranya, mencemarkan air, merusak kesuburan tanah, merusak keindahan alam dan menyumbat gorong-gorong dan sistem drainase lain. Erosi juga dapat mengganggu stabilitas lereng, baik pada galian maupun timbunan.

Pada pembangunan jalan, pengendalian erosi dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu pengendalian erosi pada bahu dan lereng samping jalan serta pengendalian erosi di daerah sekitar jalan.

Beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi erosi pada bahu dan lereng samping adalah:

- 1) Penanaman rumput. Salah satu cara yang paling sederhana dan paling efektif untuk mengurangi erosi pada lereng dan bahu adalah melalui penanaman rumput.
- 2) Pemasangan kerb berbibir (*lip curbs*) dan bangunan sejenis. Pada jalan di luar kota yang terdiri atas beton semen, pemasangan kerb berbibir dimaksudkan agar air yang berasal dari lajur lalu-lintas tidak melimpah ke bahu sehingga tidak mengerosi bahu dan lereng samping jalan. Kerb dipasang tidak menerus sepanjang tepi perkerasan, agar air dapat dibuang melalui celah antara kerb dan selanjutnya disalurkan ke saluran samping atau saluran pembuang melalui pipa atau saluran diperkeras. Untuk menampung air yang berasal dari perkerasan dapat digunakan juga tanggul (*dike*) atau talang (*gutter*).
- 3) Pembuatan saluran pencegat. Masuknya air ke lereng dapat dicegah melalui parit yang dibuat di sebelah atas lereng. Pada setiap interval jarak tertentu, air pada saluran pencegat dialirkan (melalui saluran searah lereng) ke saluran samping/pembuang.
- 4) Erosi berat pada lereng dapat dicegah antara lain dengan cara pemasangan batu kosong (*riprap*) atau penyemprotan dengan pasta semen-pasir. Pada kasus dimana timbunan terletak sejajar dengan aliran air yang cukup deras, erosi/penggerusan dapat dikurangi dengan memperlambat aliran (misal dengan memasang tiang-tiang kayu), disamping melindungi lereng.

Pengurangan erosi di sekitar jalan, di luar yang diuraikan diatas, menyangkut upaya-upaya sebagai berikut:

- 1) Membatasi sekecil mungkin luas permukaan tanah (yang potensial tererosi) yang terbuka akibat pembersihan lapangan (*clearing and grubbing*), penggalian, pengambilan bahan dan penimbunan.
- 2) Sebagai pelengkap atau alternatif upaya di atas, pada daerah terbuka yang potensial tererosi perlu segera membuat (baik sementara maupun permanen) bangunan pengendali erosi. Bangunan pengendali erosi dapat terdiri atas drainase lereng, tanggul, bendungan, kolam pengendapan atau bangunan lain yang mempunyai fungsi sama.
- 3) Melakukan pembersihan lapangan secara bertahap, yaitu disesuaikan dengan kemajuan pembuatan bangunan pengendali erosi.

8.2.10. Penempatan tanah buangan

Bahan buangan harus ditempatkan pada lokasi dan dengan cara yang tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, antara lain, pencemaran air dan udara, gangguan terhadap flora, fauna, keindahan alam dan kesuburan tanah. Ditinjau dari kepentingan teknis, penempatan bahan buangan pada lereng akan memperbesar potensi longsor.

Pada Gambar 55 ditunjukkan contoh penempatan tanah buangan yang tidak seksama sehingga terjadi longsor, erosi dan kerusakan pada tanaman. Disamping itu, lumpur yang terbawa air ada kemungkinan mencemari air yang ada di hilir.



Gambar 55. Contoh penempatan tanah buangan yang tidak seksama

8.2.11. Pengembangan lingkungan dan estetika daerah samping

Yang dimaksud dengan daerah samping adalah daerah milik jalan tanpa lajur lalu-lintas. Lahan yang berbatasan dengan daerah samping mungkin dapat dimasukkan juga sebagai daerah samping.

Pengembangan daerah samping dapat diartikan sebagai penciptaan keindahan dan kondisi alami daerah samping yang dilakukan setelah pembangunan utama selesai. Disain lingkungan daerah samping diantaranya menyangkut saluran samping yang dangkal tapi lebar, lereng galian dan timbunan yang relatif datar, bentuk permukaan lereng yang alami, daerah milik jalan yang lebar. Estetika dan kondisi alami daerah samping tidak saja memberikan keindahan bagi pengguna jalan tapi juga dipandang dapat menurunkan biaya pemeliharaan jalan (akibat berkurangnya erosi, biaya untuk membersihkan sistem drainase menjadi berkurang pula) dan meningkatkan keamanan (*safety*), bahkan ada pendapat (*claim*) yang menyatakan dapat meningkatkan kapasitas jalan.

Lebar daerah milik jalan merupakan aspek yang penting dalam pengembangan daerah samping. Di daerah luar perkotaan, daerah milik jalan yang lebar akan memungkinkan untuk mempersatukan/menyelaraskan (*blending*) jalan dengan panorama alam (antara lain melalui penanaman pohon). Di daerah perkotaan, daerah milik jalan yang lebar dapat menyediakan ruang untuk menanam pohon atau membangun penghalang kebisingan.

Dewasa ini ada pendapat kontroversial yang menyatakan bahwa pengendalian lingkungan tidaklah penting sehingga uang yang digunakan untuk hal tersebut akan lebih bermanfaat apabila digunakan untuk menambah panjang jalan. Namun demikian, telah diterbitkannya berbagai peraturan dan perundang-undangan tentang lingkungan hidup serta telah terjadinya beberapa bencana alam akibat kerusakan lingkungan menunjukkan bahwa lingkungan hidup merupakan aspek yang perlu menjadi kepedulian dan perhatian semua pihak, termasuk pihak-pihak yang terkait pada pembinaan jalan.

8.2.12. Pembersihan daerah kerja (*final cleaning*)

Sebelum penyerahan akhir, daerah milik jalan, daerah sumber bahan dan daerah-daerah lain yang terkait dengan pekerjaan harus dibersihkan dari sampah, sisa-sisa bahan, bangunan sementara dan peralatan serta benda-benda lain yang dipandang akan mengganggu masyarakat dan lingkungan. Apabila terdapat barang milik masyarakat yang rusak akibat pekerjaan tanah, maka barang tersebut perlu diperbaiki. Disamping itu, semua bagian pekerjaan harus dalam kondisi yang layak (*acceptable condition*).

LAMPIRAN A

(Informatif)

Permasalahan pekerjaan tanah

1. Tanah dasar

1.1. Pemompaan pada perkerasan kaku

Pemompaan diartikan sebagai terdorongnya air bersama-sama dengan butir-butir tanah dasar (atau lapis pondasi) melalui sambungan, retak atau tepi perkerasan kaku. Terjadinya pemompaan merupakan akibat adanya lendutan pelat beton oleh beban kendaraan sehingga air yang terakumulasi di bawah pelat tertekan dan terdorong melalui celah pada pelat atau tepi perkerasan. Pemompaan umumnya mengakibatkan retak-retak di sekitar sambungan pelat.

Pemompaan dapat dikurangi dengan melalui penggunaan lapis pondasi yang mudah mengalirkan air atau tahan erosi.

1.2. Tanah jelek

Meskipun adanya variasi pada tanah dasar dapat diperhitungkan, namun perhatian khusus perlu diberikan apabila pada suatu seksi dijumpai tanah yang jelek.

Beberapa jenis tanah tidak cocok sebagai tanah dasar sehingga penggunaannya harus dihindarkan. Tanah yang mengandung banyak mika dan/atau bahan organik mempunyai sifat yang sangat elastis dan cenderung melendut balik setelah beban lepas. Akibat hal tersebut, perkerasan akan mengalami kelelahan dan selanjutnya mengalami kerusakan. Disamping itu, beban pada tanah yang mengandung banyak bahan organik akan menimbulkan konsolidasi, meskipun setelah dipadatkan secara khusus.

1.3. Tanah yang mempunyai pemuaian besar

Faktor yang paling menentukan terhadap terjadinya pemuaian tanah adalah kadar air. Oleh karena itu, kadar air perlu dikendalikan agar tidak terjadi penurunan (mengakibatkan penyusutan) dan tidak terjadi pengingkatan (mengakibatkan pemuaian). Perhatian khusus perlu diberikan pada lokasi-lokasi yang memungkinkan tanah menjadi jenuh, misal di sekitar gorong-gorong.

Apabila dijumpai tanah yang mudah memuai, maka tanah tersebut perlu dipadatkan pada kadar air di sekitar kadar air optimum (sedikit di bawah atau di atas). Stabilisasi tanah dengan kapur dipandang dapat mengurangi pemuaian, meskipun tidak efektif apabila diterapkan untuk lapisan tanah yang tebal.

Sebagaimana telah diuraikan pada Butir Sifat Alami Tanah, Buku Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar Untuk Pekerjaan Jalan, potensi pemuaian tanah biasanya ditunjukkan oleh "aktifitas" (perbandingan antara indeks plastis dengan berat butir yang lebih kecil dari 0,002 mm). Dalam hal tersebut, lempung yang mempunyai aktifitas kurang dari 0,75, antara 0,75 dan 1,25 serta lebih dari 1,25 berturut-turut biasa disebut lempung tidak aktif, lempung normal dan lempung aktif.

1.4. Tanah laterit

Suatu jenis tanah “unik” yang dikenal dengan “laterit” banyak dijumpai di beberapa daerah tropis. Tanah jenis ini biasanya mengandung banyak besi dan almunium. Dari segi teknik, tanah laterit mempunyai berat isi yang sangat rendah dan dalam keadaan aslinya mempunyai kandungan air yang tinggi. Sehubungan dengan hal tersebut, apabila terganggu, tanah laterit sering kali mudah berubah menjadi bubur sehingga sulit dikerjakan.

Di beberapa daerah kadang-kadang dijumpai deposit tanah laterit yang umumnya berwarna merah serta mempunyai berbagai kandungan butir-butir lanau dan lempung. Kerikil laterit sering digunakan sebagai lapis pondasi atas dan pondasi bawah, terutama apabila distabilisasi dengan kapur atau semen.

Dalam keadaan aslinya, sebagian besar tanah laterit mempunyai kekutan yang sangat kokoh, namun apabila diangkut dari sumber bahan atau daerah galian dan kemudian digunakan sebagai timbunan atau tanah dasar, tanah tersebut kadang-kadang sangat peka dan mempunyai daya dukung yang sangat rendah. Namun demikian, apabila ditangani dengan seksama, tanah laterit akan memperoleh kembali sebagian kekuatannya sehingga cocok untuk tanah dasar.

Persoalan utama mengenai tanah laterit menyangkut teknik pelaksanaan pada saat pemadatan, baik untuk timbunan maupun untuk tanah dasar. Dalam hal tersebut sering kali diperlukan pencampuran tanah laterit dengan bahan yang lebih kering atau diterapkan “konstruksi berlapis”, dimana tanah yang lebih stabil dihampar secara berselang dengan tanah laterit. Hal yang perlu diingat adalah, tanah laterit merupakan tanah yang dapat digunakan, asalkan ditangani secara tepat.

Di atas disebutkan bahwa kerikil laterit yang dijumpai di beberapa daerah, dapat digunakan sebagai lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah yang mutunya tergantung pada beberapa faktor. Dengan menambahkan sedikit kapur atau semen, sifat-sifat tanah laterit dapat diperbaiki. Kelayakan penambahan bahan stabilisasi terhadap tanah laterit dapat dikaji dengan sederhana di laboratorium.

1.5. Zona transisi

Untuk mencegah terjadinya kerusakan perkerasan yang dibangun melewati timbunan atau galian batuan, maka antara dua bagian jalan tersebut perlu dibuat zona transisi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.4 Buku Pedoman Pekerjaan Tanah Dasar Untuk Pekerjaan Jalan.

Disamping itu, zona transisi perlu dibuat juga di daerah berbukit dimana perkerasan dibangun di atas horizon “B” dan pada lokasi dimana kondisi tanah dan/atau drainase diperkirakan berubah secara mendadak. Sebagai pedoman umum, zona transisi perlu dibangun dengan kedalaman sekitar 1 sampai 1,5 meter dan makin menipis ke kedua arah luarnya sejauh 6 sampai 10 meter. Zona transisi juga perlu dibuat dalam arah melintang di bagian timbunan arah lereng.

1.6. Kepadatan dan CBR

Apabila dijumpai kasus dimana setelah dipadatkan, tanah memenuhi persyaratan kepadatan tetapi CBR-nya lebih kecil dari CBR disain, maka tanah tersebut perlu diganti dan dipadatkan sehingga memenuhi persyaratan kepadatan dan CBR. Alternatif lain untuk mengatasi hal tersebut adalah melakukan disain ulang tebal perkerasan; meskipun kemungkinan besar perkerasan menjadi lebih tebal.

2. Drainase dan air kapiler

2.1. Drainase

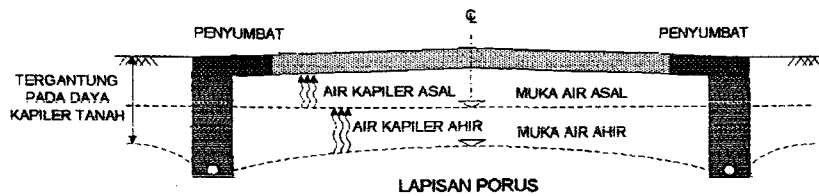
Permeabilitas menunjukkan kemampuan tanah untuk mengalirkan air. Kerikil dan pasir merupakan contoh jenis tanah yang mudah mengalirkan air, sedangkan lempung dan tanah berbutir halus hampir kedap. Tanah yang mudah mengalirkan air umumnya cocok sebagai tanah dasar. Namun demikian, pada jenis tanah tersebut dapat terjadi air rembesan dan menimbulkan persoalan serius stabilitas, karena akan menjadi sumber air kapiler, atau menimbulkan tekanan air pori pada bidang longsor, atau menimbulkan rembesan pada lereng galian. Disamping itu, aliran air rembesan dapat membawa butir-butir halus tanah sehingga menimbulkan rongga yang cukup besar dan selanjutnya dapat mengakibatkan amblesnya tanah timbunan di bagian atas.

Pada Gambar 56 ditunjukkan dua situasi cara “pembuangan” air dari lapisan porus. Pada Gambar 56a, muka air tanah yang tinggi akan menjadi sumber air kapiler yang akan mengakibatkan jenuhnya tanah dasar dan lapis pandasi dan selanjutnya melemahkannya. Pada kasus tersebut, pemasangan drainase bawah permukaan dapat menurunkan muka air tanah sehingga air kapiler tidak akan naik sampai pada ketinggian yang menimbulkan persoalan. Pada Gambar 56b ditunjukkan cara pemasangan drainase bawah permukaan untuk mencegah air rembesan (apabila tidak dkegah akan menimbulkan longsor).

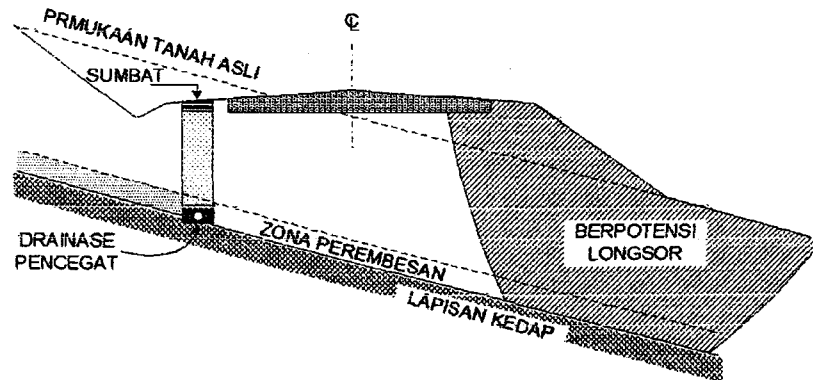
Drainase bawah permukaan tidak akan efektif apabila dipasang pada tanah kedap (misal, tanah A-4 sampai A-3) dimana aliran air sangat lambat. Disamping itu, drainase bawah permukaan tidak akan mengurangi air yang telah terkandung dalam tanah kedap.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam disain drainase bawah permukaan adalah:

- ① Untuk mengalirkan air yang terkumpul harus digunakan pipa yang dindingnya berlubang (*perforated*), misal, pipa baja gelombang, pipa beton atau pipa tanah. Namun demikian, dalam hal tersebut dapat digunakan juga pipa yang dindingnya tidak berlubang, asalkan sambungannya dibuat renggang (*gap*). Air yang dialirkan pipa selanjutnya harus dialirkan melalui saluran pembuang (*gravity outlet*).
- ② Bahan penyaring (*filter material*) harus cukup halus agar butir-butir tanah di sekeliling drainase tidak terkuras dan masuk ke dalam pipa drainase; misal, apabila drainase dipasang pada tanah lanau, maka bahan pengisi harus mempunyai gradasi yang kira-kira sama dengan gradasi pasir beton. Bahan yang lebih kasar dapat dipasang di bagian inti parit (*core*).
- ③ Bagian atas drainase harus disumbat dengan tanah/bahan kedap; yaitu untuk mencegah masuknya air permukaan (kemungkinan membawa butir-butir halus) ke dalam drainase.
- ④ Agar lebih efektif, bagian bawah drainase pencegat (Gambar 56b) harus masuk pada lapisan yang kedap.
- ⑤ Pipa drainase harus dipasang pada kedalaman sekurang-kurangnya 120 cm di bawah permukaan akhir dan diletakkan secara hati-hati pada kerikil atau bahan penyaring.



a. Pemasangan drainase untuk kondisi muka air datar



b. Pemasangan drainase bawah permukaan tipikal

Gambar 56. Pemasangan drainase bawah permukaan tipikal

2.2. Air kapiler

Daya kapiler dapat mengakibatkan Bergeraknya air bebas melalui pori-pori dalam tanah. Pada tanah berbutir kasar, perilaku air bebas hampir sepenuhnya dipengaruhi oleh gravitasi dimana air akan mencari keseimbangan sebagaimana halnya pada saluran terbuka. Apabila ukuran butir tanah menjadi lebih halus dan diameter tabung pori makin menurun, interaksi tanah-air akan mempengaruhi perilaku air; contoh, apabila pori dalam tanah tidak terisi penuh oleh air dan terdapat air bebas, maka daya kapiler akan menarik air bebas melalui tanah sampai rongga terisi penuh. Pergerakan air tersebut dapat terjadi ke semua arah dan pergerakan ke arah atas biasanya menimbulkan persoalan serius. Daya kapiler yang paling nyata dijumpai pada "kerikil kotor" atau tanah yang terdiri atas campuran pasir halus, lanau atau lanau kelepungan, karena tanah tersebut cukup porus dan mempunyai tabung pori yang memungkinkan air melewatinya. Secara praktis, lempung dan tanah koloidal adalah kedap dan hampir tidak dipengaruhi daya kapiler.

Akibat daya kapiler, air dapat naik sampai ketinggian yang besar. Apabila permukaan tanah terbuka dan air menguap sebanding dengan penambahannya, maka pada kasus tersebut tidak akan terjadi persoalan. Apabila penguapan berlangsung lambat atau permukaan tanah tertutup oleh perkerasan atau lapisan lain yang kedap, maka air kapiler akan terakumulasi pada permukaan tanah sehingga dapat menjenuhkan tanah tersebut.

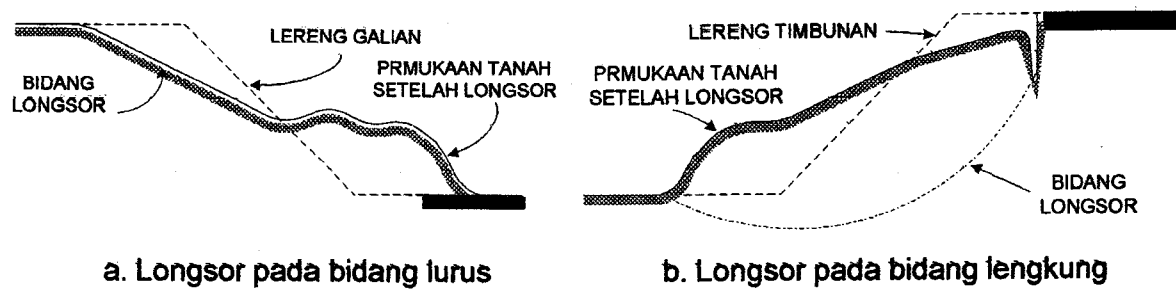
3. Stabilitas lereng

3.1. Kasus longsor

Ada kemungkinan, lereng galian longsor ke jalan dan badan jalan pada timbunan longsor ke arah luar jalan. Pada daerah-daerah tertentu, longsor tersebut dapat sering terjadi dan menimbulkan gangguan yang serius sehingga perlu mendapat perhatian intensif.

Pada Gambar 57 ditunjukkan contoh longsor yang mungkin terjadi pada lereng galian dan lereng timbunan, dimana pada Gambar 57a, longsor terjadi pada bidang lurus yang lemah, sedangkan pada Gambar 57b, longsor terjadi pada bidang lengkung. Bidang longsor yang

lengkung biasa terjadi pada timbunan atau galian yang terdiri luas tanah kohesif yang seragam.



Gambar 57. Ilustrasi longsor sebagai akibat gelincir (*slipout*)

Longsor dapat terjadi pada saat pelaksanaan atau beberapa saat kemudian setelah jalan dioperasikan. Pada kondisi tertentu, ada kemungkinan menanggung risiko lereng untuk longsor (mengakibatkan bertambahnya biaya pemeliharaan) lebih baik daripada membuat lereng yang landai. Pada saat penetapan lokasi (rute) jalan, daerah-daerah yang berpotensi selalu longsor perlu dihindarkan. Longsor dapat terjadi dalam bentuk pelelehan (*flow*) lumpur atau akibat pemotongan lereng, aliran air tanah atau pemotongan bagian bawah (*undercutting*) lapisan batuan.

Longsor cenderung terjadi apabila tanah bagian bawah yang terdiri atas lapisan serpih (*shale*), batu lunak (*soapstone*), lempung, atau tanah sejenis mempunyai bidang lapisan yang miring dan kemudian terlumasi oleh air rembesan. Pada musim hujan, lapisan tanah tersebut menjadi lemah sehingga tanah di atasnya dapat bergerak. Longsor pada kasus tersebut dapat diatasi dengan membuang seluruh atau sebagian besar tanah di atas bidang longsor atau dengan membuat sistem drainase yang memungkinkan bidang longsor bebas tidak dimasuki air. Apabila bidang longsor terlumasi oleh air permukaan yang berasal dari lereng di bagian atas lereng galian, maka masuknya air permukaan ke bidang longsor dapat dkegah dengan saluran pencegat, atau dengan mengedapkan permukaan lereng. Apabila air berasal dari lapisan porus yang terletak cukup dangkal dari permukaan (misal 3 m atau kurang), maka masuknya air dapat dkegah dengan drainase bawah permukaan. Apabila lapisan tanah yang berpotensi longsor tebal sehingga pemasangan drainase bawah permukaan akan dalam, maka aliran air kadang-kadang dapat dkegah dengan menggali parit drainase (*drainage tunnel*) dan kemudian mengurugya dengan pasir kasar. Pada daerah tersebut, pelurusan lereng atau pemasangan bangunan penahan tanah sering kali mengalami kegagalan.

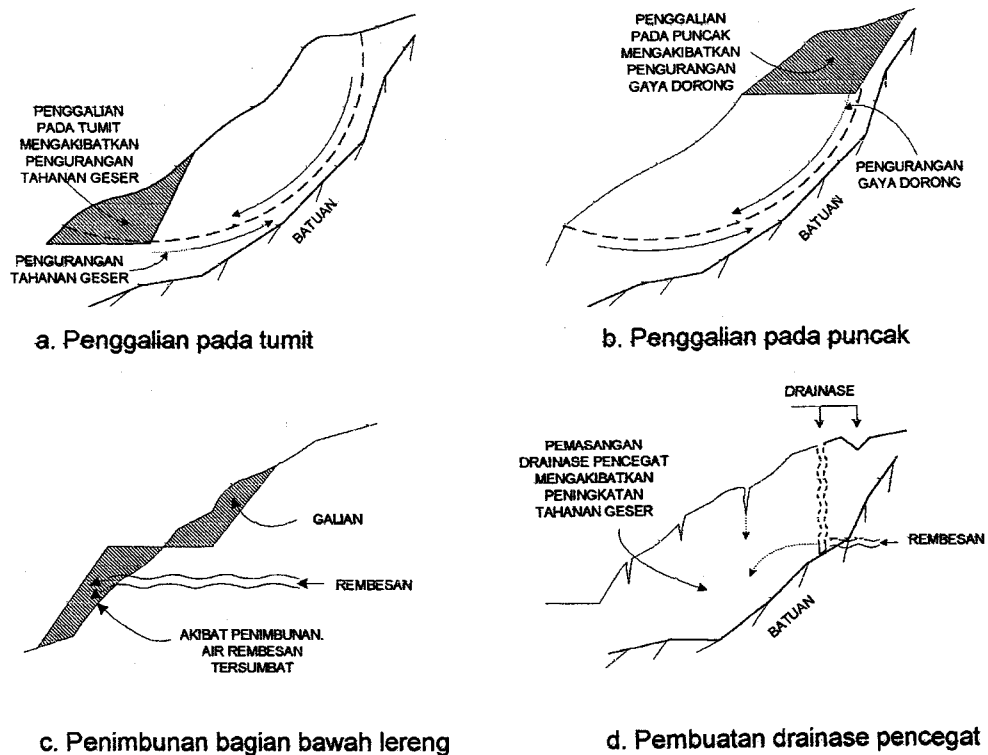
Jatuhnya batuan lepas atau bongkah yang kadang-kadang terjadi dapat dkegah dengan menutup lereng dengan anyaman kawat, atau dengan menyuntik dengan air semen (*cement grout*), atau dengan memasang pagar yang kuat di sepanjang tepi jalan.

3.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng

Ketahanan masa tanah untuk bergerak berasal dari tahanan geser tanah. Sebagian besar tahanan geser alami merupakan sifat yang melekat (*inherent*) dimana untuk mempengaruhinya, manusia mempunyai kesempatan yang lebih kecil daripada kesempatan untuk mempengaruhi gaya dorong. Salah satu kesempatan untuk mempengaruhi tahanan geser adalah melalui pemasangan sistem drainase. Pada Gambar 58 ditunjukkan beberapa pengaruh turun tangan manusia terhadap stabilitas lereng.

Pada Gambar 58d ditunjukkan bahwa dengan membuat saluran pencegat, air permukaan yang akan masuk melalui retak akan berkurang. Dengan demikian, maka tekanan hidrostatik dalam tanah akan menjadi berkurang dan selanjutnya tahanan geser tanah meningkat. Pada

Gambar 58c ditunjukkan bahwa penimbunan bagian bawah lereng akan menyumbat air rembesan alami sehingga akan meningkatkan tekanan hidrostatik.



Gambar 58. Beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng
(Sumber: Baker)

3.3. Metoda penanganan longsor

Terdapat beberapa metoda yang dapat diterapkan untuk menangani longsor. Metoda tersebut dapat dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu metoda eliminasi dan metoda pengendalian. Pada metoda yang pertama, pergerakan tanah sama sekali dihilangkan; sedangkan pada metoda yang ke dua, pergerakan dikendalikan dengan menyeimbangkan gaya tahanan. Secara lebih rinci, metoda penanganan longsor dapat dibagi menjadi lima kelompok sebagai berikut:

- 1) Penghindaran (*avoidance*): relokasi dan pembangunan jembatan.
- 2) Penggalian.
- 3) Pembuatan sistem drainase: permukaan dan bawah permukaan.
- 4) Pemasangan konstruksi penahan.
- 5) Lain-lain: stabilisasi dan peledakan.

Penanganan longsor melalui pencegahan (*prevention*) adalah lebih murah daripada penanganan melalui perbaikan (*correction*) bagian yang longsor.

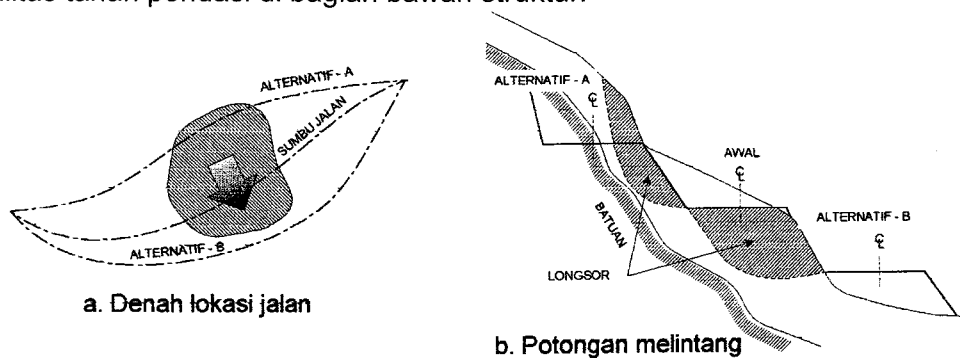
Pemilihan prosedur pengendalian longsor tidak perlu memperhatikan keterkaitannya dengan pencegahan atau perbaikan, atau dengan penyelidikan longsor yang potensial atau yang sudah terjadi. Namun demikian, karena pencegahan biasanya dilakukan pada saat pelaksanaan, beberapa prosedur dalam hal tersebut adalah lebih murah. Penanganan longsor melalui perbaikan biasanya dilakukan sebagai pekerjaan pemeliharaan dan pembiayaannya kemungkinan merupakan persoalan utama. Oleh karena itu, untuk mengurangi biaya pemeliharaan, telah dikembangkan berbagai metoda unik dan murah.

3.3.1. Metoda relokasi

Karena kemungkinannya yang bersifat permanen, relokasi untuk menghindari persoalan longsor merupakan cara yang harus selalu dipertimbangkan. Biaya awal yang relatif tinggi dan pengaruhnya terhadap alinyemen dan elevasi, metoda tersebut akan menimbulkan beberapa persoalan yang terkait dengan bahan. Dua pilihan perubahan alinyemen dan elevasi ditunjukkan pada Gambar 59.

Kelayakan relokasi tergantung pada faktor-faktor sebagai berikut:

- Kesesuaian dengan bangunan jalan, terutama dalam kaitannya dengan alinyemen, elevasi dan drainase.
- Kestabilan tanah di atas (atau di bawah) lokasi awal rencana, atau kemungkinan timbulnya persoalan baru.
- Adanya alasan kuat perlunya relokasi.
- Stabilitas tanah pondasi di bagian bawah struktur.



Gambar 59. Metoda relokasi

Pada penerapan metoda relokasi tidak diperlukan analisis stabilitas lereng; kecuali apabila lereng perlu dikendalikan. Penyelidikan dan analisis diarahkan untuk memilih tanah yang stabil dan estimasi biaya. Meskipun penerapan metoda relokasi dipandang tidak ada persoalan pelaksanaan, namun, penempatan bahan buangan harus memperhatikan kemungkinan timbulnya bahaya longsor.

3.3.2. Metoda pembangunan jembatan

Pembangunan jembatan adalah "melangkahi" (*spanning*) lokasi yang longsor dengan suatu bangunan. Metoda ini dipandang kurang praktis, karena memerlukan biaya yang tinggi. Untuk longsor yang terjadi pada lereng yang terjal (lebih besar dari 2:1) dan pada lokasi dimana relokasi tidak layak atau tidak diperlukan, pembangunan jembatan mungkin layak. Pembangunan jembatan umumnya dilakukan pada longsor yang kecil, setidaknya-tidaknya dalam dimensi yang sejajar dengan sumbu jembatan.

Meskipun dari segi panjangnya layak, namun apabila diperlukan tiang, maka pembangunan jembatan juga dipengaruhi oleh kedalaman dan volume tanah yang longsor. Tiang jembatan dapat pada tanah yang longsor, apabila (1) tanah penutup (*overburden*) dangkal, kurang dari 3 m (10 ft) dan (2) tanah longsor yang terletak di bagian atas lereng mempunyai volume yang tidak menimbulkan daya dorong besar terhadap tiang jembatan. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah, perlu dihindarkannya penempatan kepala jembatan pada tanah yang mungkin akan tergerus (*undermining*) oleh pergerakan tanah yang terus menerus. Sehubungan dengan hal tersebut, maka kemungkinan adanya daya dorong terhadap tiang jembatan dan penggerusan kepala jembatan perlu diperhitungkan.

Lokasi tipikal untuk pembangunan jembatan adalah daerah sempit yang panjang dimana jalan harus melintasinya. Perlunya penanganan yang permanen dan mempertahankan

alinyemen dan elevasi, kadang-kadang pembangunan jembatan merupakan pilihan yang bermanfaat.

3.3.3. Metoda penggalian

Penggalian mempengaruhi stabilitas melalui pengurangan gaya yang mendorong tanah. Konsep penggalian adalah penghilangan masa tanah yang bergerak (longsor), baik sebagian atau seluruhnya. Enam teknik penggalian untuk menangani longsor ditunjukkan pada Gambar 60, kecuali penggalian sebagian pada tumit (Gambar 60f) perlu dilakukan dengan perhatian khusus.

Penggalian pada bagian atas lereng mengakibatkan pengurangan tegangan yang besar, terutama pada bidang longsor yang lengkung, karena sebagian besar gaya tangensial atau gaya dorong terdapat pada bagian atas lereng. Dengan demikian, penggalian pada bagian atas lereng sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 60a mempengaruhi gaya yang cenderung mengakibatkan pergerakan tanah. Penggalian bagian atas pada kasus longsor dengan bidang lurus tidak banyak membantu, karena semua bagian tanah mempunyai berat yang sama bahayanya.

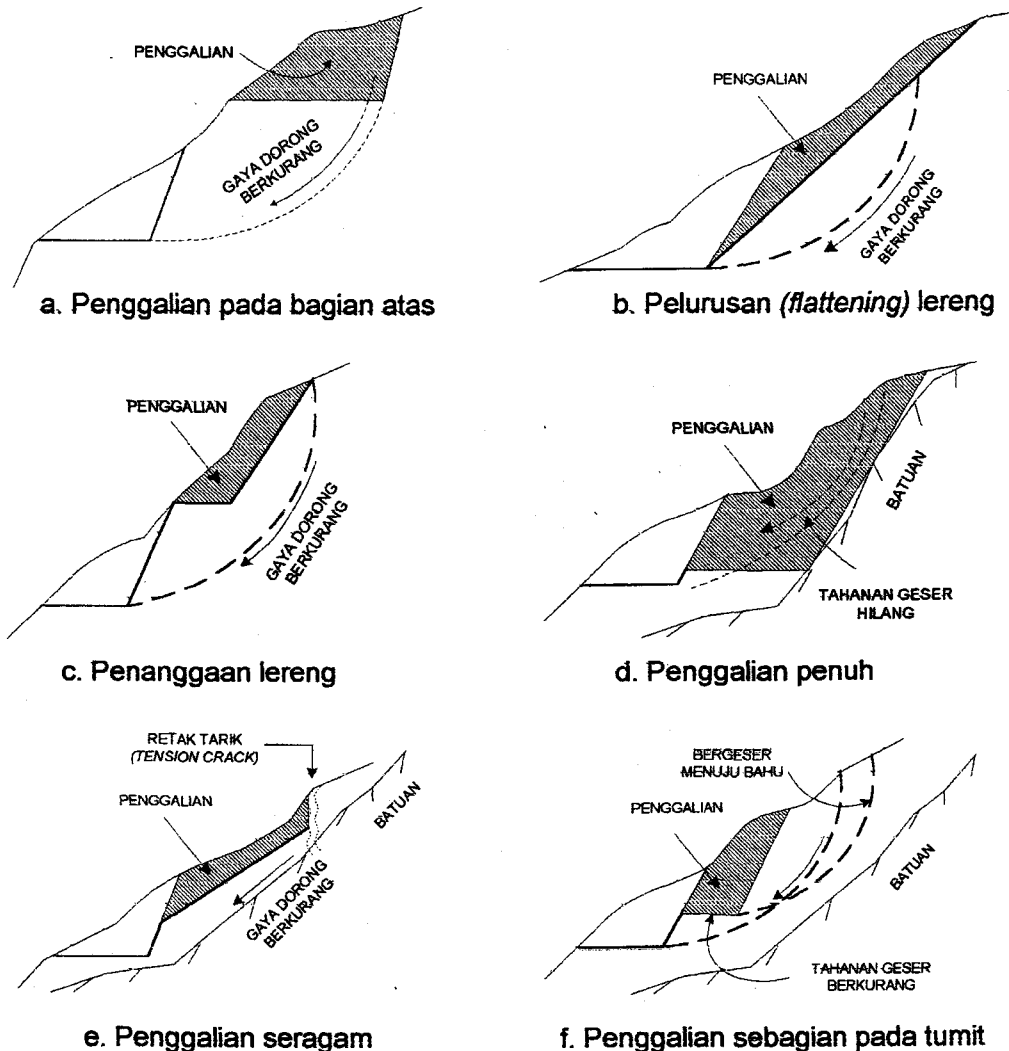
Metoda penggalian terutama berguna untuk mengatasi longsor yang mengarah ke jalan, sedangkan untuk mengatasi longsor yang mengakibatkan penggerusan (*undermine*) struktur atau daerah kritis kurang bermanfaat. Kiranya perlu diingat bahwa manfaat metoda penggalian adalah dalam pengurangan tegangan, dimana hal tersebut dapat diwujudkan hanya dengan membuang bagian masa bergerak yang menghasilkan gaya yang lebih besar dari tahanan geser. Oleh karena itu, penggalian pada tumit akan mengurangi tahanan geser daripada mengurangi gaya.

Kelayakan metoda penggalian tergantung pada besarnya longsor, dimana penggalian penuh (Gambar 60d) hanya dipandang layak untuk longsor yang relatif kecil. Metoda penggalian tidak untuk longsor yang besar, karena alasan biaya. Untuk keperluan pencegahan, metoda pelurusan lereng (Gambar 60b) atau penanggaan (Gambar 60c) lereng yang baru dipotong dapat meningkatkan stabilitas pada tumit.

Pengalaman akan membantu penetapan metoda penggalian. Disamping itu, berdasarkan volume tanah yang harus dibuang untuk mengurangi gaya dorong, biaya metoda penggalian dapat dibandingkan dengan metoda lain.

Keuntungan utama yang diperoleh dengan metoda penggalian adalah kelanggengan pemecahan, sesuai dengan ketelitian analisis stabilitas. Umumnya metoda penggalian lebih sering diterapkan untuk pencegahan daripada untuk perbaikan, karena pekerjaan tanah biasanya lebih murah pada pelaksanaan dibandingkan dengan pada operasi pemeliharaan. Metoda penggalian sering dapat menghasilkan lanskap yang lebih baik serta memungkinkan pemanfaatan lahan yang semula kurang berguna (misal lahan berbukit, berlumpur), sebagaimana yang sering dijumpai pada daerah yang rawan longsor. Disamping itu, metoda penggalian juga dapat menghasilkan drainase permukaan yang lebih baik, bahkan akan memudahkan pemasangan drainase bawah permukaan.

Kelemahan utama metoda penggalian adalah pembiayaan pada pembuangan tanah skala besar. Sebagian besar tanah galian pada metoda galian umumnya harus dibuang, sehingga akan menambah biaya, terutama pada daerah yang sulit mendapatkan lokasi pembuangan. Kelemahan lain adalah, penggalian yang harus dimulai dari bagian atas dan bergerak menuju bagian bawah lereng. Cara tersebut biasanya akan memerlukan biaya yang lebih besar daripada biaya pada penggalian normal.



Gambar 60. Beberapa teknik penggalian untuk menangani longsor

Dalam penyelidikan longsor yang mungkin ditangani dengan metoda penggalian, beberapa hal yang perlu ditentukan adalah:

- 1) Jenis pergerakan: Apakah keruntuhan (*fall*), gelincir (*slide*) atau pelelehan (*flow*)? Serta jenis bidang longsor: Apakah lengkung (*circular*) atau rata?
- 2) Status longsor: Apakah longsor telah mencapai tumit penggalian (atau longsor lama) dan menyebar di bagian atas, atau apakah longsor dimulai dari tumit dan bagian atas secara simultan?

Apabila longsor adalah keruntuhan (*fall*) dimana bahan bergerak menuju jalan, maka metoda penanggaan atau pelurusan merupakan pilihan yang dipandang layak. Namun demikian, apabila bahan lepas terbentuk pada bagian permukaan, terlepas dan besarnya kemiringan lereng, maka metoda pelurusan mungkin tidak banyak membantu.

Untuk longsor yang termasuk pelelehan (*flow*) atau bidang permukaan atau bidang longsor lurus, maka penggalian pada bagian atas tidak perlu termasuk yang dipertimbangkan. Penggalian seragam, pelurusan lereng dan penanggaan merupakan metoda yang dipandang cocok untuk mengatasi keruntuhan atau pelelehan. Metoda penggalian umumnya tidak dianjurkan untuk mengatasi longsor jenis pelelehan, kecuali apabila dikombinasikan dengan pemasangan sistam drainase. Pembuatan tangga dekat jalan (Gambar 60f) mungkin sangat bermanfaat dalam mengatasi longsor pelelehan. Dalam hal tersebut, stabilitas tidak akan

terjadi sebelum pelepasan mencapai tangga dan gaya gravitasi menghasilkan lereng yang landai. Kecuali apabila pembuatan tangga diikuti dengan pembentukan permukaan (*grading*) yang terus menerus (untuk memperlancar aliran permukaan), longsor akan terus terjadi, sampai seluruh tanah yang longsor mencapai tangga. Metoda penggalian seragam pada longsor pelepasan akan menyangkut pembuangan tanah yang volumenya besar (sekitar 25 sampai 54% volume tanah yang longsor) dan harus disertai dengan penanganan stabilitas di bagian atas daerah yang longsor. Metoda pelurusan lereng akan berhasil apabila longsor telah terjadi pada tumit lelehan dan bergerak ke bagian atas secara bertahap atau penggerusan. Pada kasus tersebut, pengamatan terhadap lereng stabil di sekitar lokasi longsor dapat menunjukkan perlu tidaknya pelurusan lereng. Metoda pelurusan lereng tidak akan layak apabila tidak disertai dengan pemasangan fasilitas drainase.

Penanganan longsor blok (permukaan atau bidang longsor lurus) hampir sama dengan penanganan longsor pelepasan. Namun demikian, karena pada longsor blok terdapat tahanan geser alami yang lebih besar daripada tahanan geser pada longsor pelepasan, maka tanah yang harus dibuang lebih sedikit (sekitar 15 sampai 25% volume tanah yang longsor); demikian juga, tangga dekat jalan dapat berukuran lebih kecil (kira-kira 50% ukuran yang diperlukan pada longsor pelepasan).

Untuk mengatasi longsor merosot (*slump*) atau longsor lain dengan bidang gelincir lengkung, metoda penggalian pada bagian atas lereng akan cocok; metoda penggalian seragam umumnya tidak cocok, sedangkan metoda pelurusan lereng dapat merupakan pemecahan yang cocok, apabila longsor dimulai dari tumit dan menyebar ke arah bukit. Meskipun pembuatan tangga pada elevasi jalan dapat merupakan metoda yang paling praktis, namun karena diperlukan pekerjaan lebih lanjut mengenai operasi pembentukan permukaan serta nilai bahan di atasnya, menjadikan pembuatan tangga tersebut tidak diperlukan. Penanganan mungkin diperlukan dalam pelurusan lereng baru pada tumit, yaitu apabila lereng yang lurus mempunyai ketinggian yang terlalu besar. Pada penggalian bagian atas lereng, tanah yang harus dibuang adalah sekitar satu sampai dua kali lipat volume tanah yang digali pada tumit (lihat Gambar 60a). Apabila volume tanah yang digali dari tumit sulit diperkirakan, maka sekitar 15 sampai 25% volume tanah yang longsor harus digali sedemikian rupa sehingga bagian atas lereng mempunyai kemiringan yang relatif landai (15:1, horizontal:vertikal). Keberhasilan penerapan metoda penggalian pada bagian atas lereng tergantung pada kondisi daerah di atas bagian yang longsor, dimana setelah penggalian (*undercutting*), stabilitas daerah tersebut perlu mendapat perhatian.

Apabila jalan terletak pada bagian atas daerah longsor, cara perbaikan yang sangat efektif adalah menurunkan elevasi permukaan. Cara ini merupakan penerapan metoda penggalian bagian atas lereng. Namun demikian, hal tersebut akan memerlukan biaya untuk mengganti perkerasan, karena seluruh perkerasan lama akan terbongkar. Sebagai pedoman umum, elevasi permukaan jalan harus diturunkan sekitar 14 sampai 20% jarak vertikal dari puncak sampai tumit lereng.

Metoda penanganan lereng yang paling sering diterapkan dalam pemeliharaan adalah penggalian pada tumit bidang longsor (Gambar 60f). Tuntutan agar jalan segera dibuka untuk lalu lintas atau keharusan untuk segera menghilangkan bahaya sering menghambat disain yang rasional. Dalam hal tersebut, pejabat yang mendapat tugas untuk menyiapkan operasi tidak perlu mengharapkan stabilitas, tetapi perlu menyetujui biaya yang relatif besar untuk mengatasi keadaan darurat. Namun demikian, penggalian pada tumit kadang-kadang didisain sebagai upaya perbaikan. Pada kasus tersebut, stabilitas tidak dapat diantisipasi; sampai pergerakan telah berlangsung cukup sehingga menghasilkan lereng yang stabil (lebih landai). Adapun alasannya adalah, stabilitas akan terwujud melalui pembentukan tahanan geser tumit yang berasal dari bahan yang longsor.

Pendekatan "pemotongan disengaja" ("*deliberate-undercutting*") telah diterapkan untuk mengatasi longsor gelincir dan pelepasan serta merupakan salah satu pendekatan untuk memperbaiki batuan yang runtuh. Meskipun sebagian besar longsor biasanya tidak diatasi melalui pemotongan disengaja, namun apabila hal tersebut diperlukan, maka pembuatan bahu pada tumit merupakan cara yang dipandang paling ekonomis. Metoda penggalian pada tumit bidang longsor paling cocok apabila struktur yang harus dilindungi terletak pada tumit bidang longsor dan lahan di atasnya tidak mempunyai fungsi atau tidak berharga. Keuntungan utama penggalian pada tumit, disamping untuk mengatasi keadaan darurat, adalah biayanya yang rendah. Untuk mencegah bahan yang akan memasuki parit, perlu dibuat bahu. Kelemahan utama penggalian pada tumit adalah kesulitan dalam memperkirakan luas dan lebar bahu yang diperlukan untuk kondisi keseimbangan. Untuk memudahkan pegaliran air dan mengurangi pergerakan sampai jarak minimum, permukaan tanah yang longsor perlu dibentuk.

Karena pemotongan disengaja didasarkan pada teori yang menyatakan bahwa pergerakan lebih lanjut tidak dapat dihindarkan, maka pada bahu yang baru harus dibiarkan sebanyak mungkin bahan. Karena pergerakan awal akan memulai pembentukan tahanan geser tumit, maka kemiringan maksimal $\frac{1}{2}:1$ (horizontal:vertikal) untuk lereng yang tingginya sekitar 9 m (30 ft) merupakan pendekatan paling baik.

Tingkat stabilitas dan volume bahan yang harus dibuang menurut berbagai metoda penggalian dapat diperoleh berdasarkan analisis stabilitas lereng, melalui cara coba-coba (*trial-and-error*). Melalui beberapa perkiraan volume bahan yang harus digali serta penetapan faktor keamanan yang diperlukan, akan diperoleh perkiraan disain lereng. Namun demikian, beberapa asumsi yang digunakan perlu ditetapkan dengan hati-hati.

Dalam rangka menghindarkan penempatan tanah yang menimbulkan tekanan yang lebih besar dari tekanan yang diantisipasi, maka prosedur pelaksanaan merupakan aspek yang kritis. Contoh (lihat Gambar 60a); pelurusan tumit lereng sebelum penggalian pada bagian atas lereng akan mengakibatkan tekanan pada lereng lebih besar dari tahanan geser yang diperkirakan. Dengan demikian, penggalian yang akan mengurangi tekanan harus diselesaikan lebih dulu, atau setidaknya-tidaknya bersamaan dengan penggalian yang akan meningkatkan tegangan.

3.3.4. Metoda drainase

Penerapan metoda drainase untuk memperbaiki tanah longsor telah sering dinyatakan sebagai penanganan yang paling memuaskan. Pernyataan tersebut dihubungkan dengan pengaruh jelek air terhadap stabilitas lereng, beberapa diantaranya adalah:

- 1) Meningkatkan tegangan geser melalui peningkatan berat tanah yang longsor.
- 2) Meningkatkan tegangan geser sebagai akibat tambahan gaya rembesan.
- 3) Mengurangi tahanan geser tanah sepanjang bidang longsor.
- 4) Menurunkan tahanan geser melalui tekanan hidrostatik atau tekanan air pori.
- 5) Perubahan secara geoteknik dan fisik pada tanah yang longsor.

Air yang terdapat dalam masa tanah dipandang cukup untuk menjadi pelumas pada bidang longsor. Beberapa pendapat menyatakan bahwa pengaruh gaya rembesan, peningkatan berat tanah dan pengurangan tahanan geser terhadap terjadinya longsor dipandang kurang menonjol; tekanan hidrostatik umumnya disepakati sering mempunyai pengaruh yang nyata; sedangkan perubahan secara geoteknik dan fisik pada bahan yang longsor dipandang penting pada kondisi spesifik.

Ditinjau dari segi pembiayaan, metoda drainase dipandang paling cocok untuk mengatasi longsor berskala besar, bila dibandingkan dengan metoda lain. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa air tidak mudah mengalir melalui tanah lempung. Oleh karena itu,

pemasangan sistem drainase saja tidak cukup, kecuali apabila sistem drainase tersebut mencapai sumber air.

Keuntungan utama metoda drainase adalah kemampuannya untuk mengurangi sebagian besar pengaruh yang menimbulkan longsor. Pembuatan drainase permukaan pada setiap lokasi longsor sangat diperlukan, karena biayanya yang relatif rendah. Disamping itu, untuk meningkatkan stabilitas mungkin diperlukan juga beberapa jenis drainase khusus, terutama pada lokasi yang mengalami longsor pelelehan. Kelemahan utama metoda drainase, adalah biaya yang cukup besar untuk memasang drainase bawah permukaan pada daerah longsor yang relatif kecil. Untuk mengatasi longsor berskala kecil, pembuangan seluruh masa tanah ada kemungkinan lebih murah daripada pemasangan drainase permukaan. Kelemahan lain metoda drainase adalah kemungkinan kurang efektifnya drainase bawah permukaan yang dipasang pada tanah kedap, karena kesulitan untuk mencapai sumber air. Agar selalu berfungsi, drainase bawah permukaan perlu dipelihara. Lokasi yang sering mengalami erosi (*silting*) perlu diinspeksi terus menerus, agar dapat dilakukan penanganan yang segera apabila terjadi penyumbatan. Kondisi dimana longsor tidak dapat diatasi hanya melalui pemasangan sistem drainase saja dapat ditelusuri melalui besarnya penggalian pada tumit yang dapat mengakibatkan pengurangan tahanan geser alami. Apabila volume tanah yang harus digali pada tumit adalah sekitar seperempat sampai sepertiga volume tanah yang longsor; maka hanya dengan memasang sistem drainase saja tidak akan efektif untuk mencegah longsor.

Metoda drainase pada dasarnya menyangkut pengendalian air permukaan dan air bawah permukaan. Dua cara untuk mengendalikan air permukaan adalah membuat saluran pencegat, menangani permukaan lereng dan menyumbat retak; sedangkan beberapa diantara pengendalian air bawah permukaan adalah: pembuatan drainase horizontal, pembuatan terowongan dan pembuatan drainase vertikal.

Pembuatan saluran terbuka (saluran pencegat) pada daerah di atas lokasi rawan longsor sangat efektif untuk pencegat aliran permukaan agar tidak memasuki lokasi rawan longsor. Penanganan permukaan lereng pada dasarnya didisain untuk mempercepat aliran air permukaan sehingga dihasilkan lereng yang stabil. Beberapa diantara teknik tersebut adalah penanaman rumput, pemberian minyak, pemasangan karung pasir dan pembuatan pasangan batu kosong. Disamping itu, penyumbatan retak juga dapat memperbaiki drainase permukaan. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara pembentukan kembali permukaan (*reggrading*) serta menyumbat retak (secara manual) dengan lempung, aspal atau semen. Penyumbatan retak sering kali dapat mengurangi pergerakan tanah, yaitu melalui pencegahan masuknya air permukaan sehingga tidak menimbulkan tekanan hidrostatik. Penyumbatan retak sebaiknya dilakukan secepatnya, meskipun pada umumnya masih diperlukan upaya penanganan lain.

Keberhasilan pemasangan drainase bawah permukaan tergantung pada dua faktor utama, yaitu dicapai-tidaknya sumber air oleh sistem drainase serta tingkat permeabilitas tanah. Drainase bawah permukaan perlu dipasang pada tanah pondasi yang stabil (di bawah bidang longsor), yaitu agar tidak mudah mengalami perubahan bentuk yang mungkin akan mengganggu kelancaran pengaliran air. Pengurangan air dari masa tanah dapat dilakukan melalui drainase bawah permukaan horizontal yang dipasang/dibuat sedemikian rupa sehingga mencapai sumber air atau kolam, atau dengan menurunkan muka air tanah. Pemasangan/pembuatan drainase bawah permukaan horizontal dapat dilakukan melalui pengeboran horizontal yang menembus tanah. Efektifitas penurunan muka air tanah tergantung pada permeabilitas tanah. Untuk mengetahui keberadaan air tanah dan bisa-tidaknya air tanah dibuang diperlukan pengeboran yang ekstensif. Hal yang pertama relatif mudah, sedangkan hal yang kedua dapat diperkirakan berdasarkan pengalaman atau berdasarkan pengamatan kecepatan masuknya air ke dalam lubang uji (*trial drill holes*). Pengeboran untuk mengetahui lapisan porus sangat berguna dalam rangka menentukan

dapat-tidaknya air segera dibuang. Untuk menentukan lokasi lapisan porus dapat diterapkan teori "perbedaan permeabilitas" ("*differential permeability*"), yaitu, air akan terakumulasi di atas lapisan kedap. Pemasangan drainase horizontal kadang-kadang dapat dipasang bersama-sama dengan metoda perbaikan yang lain, terutama metoda penggalian. Dalam hal tersebut, volume tanah yang digali dapat seminimum mungkin.

Pembuatan drainase pencegat mempunyai tujuan yang sama dengan dengan pemasangan drainase horizontal. Namun demikian, karena pertimbangan biaya, pembuatan drainase pencegat umumnya terbatas pada kondisi dimana air dapat dkegat dengan parit yang digali sampai kedalaman sekitar 3 sampai 4,5 m. Daerah longsor kadang-kadang sangat luas sehingga penggalian parit pencegat perlu dilakukan dengan peralatan berat.

Pembuatan terowongan dilakukan untuk mencegah aliran air di bawah tanah. Karena alasan biaya, pembuatan terowongan umumnya jarang dilakukan. Namun demikian, cara tersebut sangat bermanfaat apabila bangunan yang harus dilindungi dari bahaya longsor mempunyai nilai yang sangat tinggi.

Drainase vertikal biasanya dipasang bersama-sama dengan drainase horizontal atau menghubungkan lapisan atas yang kedap dengan lapisan bawah yang porus. Metoda tersebut sangat cocok pada lokasi longsor yang mempunyai lensa pasir porus. Untuk mengetahui kemungkinan masih adanya kantung-kantung bahan porus yang terisolasi setelah sistem drainase berfungsi, mungkin diperlukan pengamatan terus menerus serta pemboran.

Keberhasilan penerapan metoda drainase dapat diperkirakan melalui perkiraan faktor keamanan. Dalam menganalisis pengaruh pemasangan sistem drainase, beberapa parameter (asumsi) yang perlu ditetapkan adalah: letak permukaan air tanah, tekanan hidrostatik potensial dan gaya rembesan. Pengurangan berat tanah akibat pengurangan air dapat diabaikan, karena tidak akan mempunyai pengaruh yang besar terhadap hasil yang diperoleh. Analisis dilakukan dengan cara coba-ooba, yaitu menurut beberapa alternatif lokasi dan jarak pemasangan sistem drainase (horizontal dan vertikal). Untuk mengetahui ketepatan asumsi, setelah sistem drainase terpasang perlu dilakukan pengamatan periodik selama masa tertentu (misal 1 tahun) serta pada periode terjadinya aliran maksimum. Apabila ternyata sistem drainase tidak mencukupi (*underdesign*), maka untuk mendapatkan lereng yang stabil, sistem drainase perlu di tambah.

Pembuatan sistem drainase dalam bentuk parit terbuka dan terowongan adalah kritis, kecuali apabila penggalian dilakukan di luar lokasi longsor. Apabila parit terletak di atas bagian vertikal (bagian atas) bidang longsor, besar kemungkinan akan terjadi penggerusan (*undermining*). Jangka waktu antara penggalian, pemasangan sistem drainase dan pengurangan kembali harus diupayakan seminimum mungkin. Pemasangan instalasi drainase yang tegak lurus dengan arah pergerakan tanah harus dilakukan per segmen, agar tidak terjadi bahaya pada seluruh masa tanah. Fasilitas drainase tidak mutlak harus terdiri dari pipa. Untuk mencegah erosi (*silting*), bahan urugan harus terdiri atas bahan berbutir halus (misal pasir beton). Di luar pemboran dan penempatan pipa, pembangunan drainase horizontal umumnya tidak sulit. Apabila digunakan, pipa berdiameter 5 cm umumnya sudah dipandang memadai.

3.3.5. Metoda konstruksi penahan

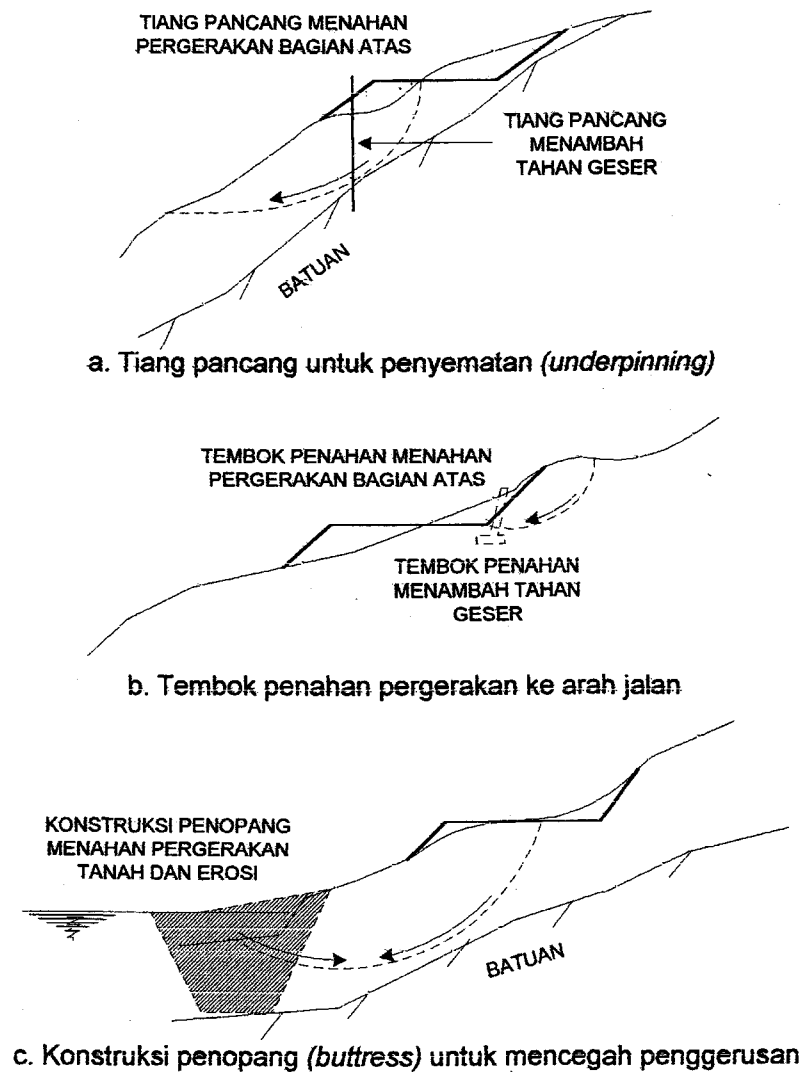
Sesuai dengan namanya, konstruksi penahan adalah bangunan penghalang yang ditempatkan pada jalur longsor sehingga memperbesar tahanan geser, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 61. Konstruksi penahan ditempatkan sedemikian rupa sehingga dapat melindungi jalan dari hal-hal sebagai berikut:

- 1) Penggerusan (*undermining*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 61a.

2) Pergerakan ke arah fasilitas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 61b.

Pada kasus yang ke dua, penanganan menyangkut pengendalian pergerakan tanah, sedangkan pada kasus yang pertama, konstruksi penahan hanya melindungi dimana longsor (di bagian bawah) mungkin dibiarkan terus terjadi.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 61, tiga jenis konstruksi penahan yang biasa digunakan adalah: tiang pancang (*pile*), tembok penahan dan konstruksi penopang (*buttress*). Pada kasus-kasus tertentu, dapat digunakan kombinasi ketiga konstruksi tersebut.



Gambar 61. Konstruksi penahan tipikal

Berdasarkan prinsip teknik penahanan, beberapa hal yang perlu diperhatikan adalah :

- 1) Konstruksi penopang biasanya jarang digunakan, kecuali pada tumit longsoran (untuk mengendalikan pergerakan).
- 2) Krib, tembok penahan dan tiang pancang digunakan, baik pada tumit (untuk mengendalikan pergerakan) maupun penyematan (*underpinning*) langsung di bawah jalan (untuk mencegah penggerusan).

Penggunaan konstruksi yang pertama biasanya hanya cocok untuk mengendalikan longsor kecil, sedangkan untuk mencegah runtuhnya bangunan (jalan), konstruksi tersebut dapat digunakan pada daerah longsor yang cukup luas, tetapi lapisan tanah tidak tebal.

Penggunaan konstruksi penahan yang paling sering adalah pada longsoran yang kecil atau pada lokasi yang relatif stabil. Pada kasus yang ke dua, pengendalian pergerakan dilakukan pada tumit, sehingga mengurangi jenis longsor progresif. Konstruksi penahan sangat cocok digunakan untuk longsor jenis gelincir, sedangkan untuk longsor jenis pelelehan biasanya jarang digunakan.

Salah satu hal yang perlu diperhatikan pada pembangunan konstruksi penahan adalah evaluasi tanah pondasi konstruksi. Karena fungsinya konstruksi adalah sebagai penahan, maka tanah pondasi dimana konstruksi penahan tertanam tidak boleh mengalami perubahan bentuk. Pada kondisi yang umum, tanah pondasi biasanya dapat dijumpai, atau harus dipastikan bahwa tanah pondasi tidak akan ikut longsor.

Keuntungan utama penggunaan konstruksi penahan terletak pada biayanya yang relatif rendah untuk kondisi tertentu. Biaya konstruksi tersebut tergantung pada tingkat penanganan yang harus diupayakan dan kondisi lapangan, contoh:

- 1) Daerah milik jalan yang terbatas.
- 2) Untuk penyematan.
- 3) Apabila penanganan terkait dengan erosi akibat aliran, penggunaan konstruksi penahan dapat dikombinasikan dengan pengendalian erosi.
- 4) Konstruksi penunjang menyangkut bahan murah yang mempunyai volume dan tahanan geser besar.
- 5) Tiang pancang dapat menghasilkan tahanan geser yang cukup untuk tanah yang tipis, asalkan konstruksi tersebut tertanam (*anchorage*) dengan kuat.

Kelemahan paling utama konstruksi penahan adalah biayanya yang tinggi apabila digunakan untuk mengatasi longsor besar, disamping faktor lain. Kerugian lain adalah, apabila konstruksi penahan runtuh maka seluruh investasi akan musnah.

Dengan mengecualikan drainase, konstruksi penahan merupakan metoda perbaikan lokasi longsor yang paling sering digunakan. Namun demikian, kesalahan penerapan dan kurangnya pemahaman terhadap faktor-faktor biaya kadang-kadang mengakibatkan metoda konstruksi penahan dianggap tidak penting.

Apabila penentuan ukuran konstruksi penahan tidak dilakukan analisis kuantitatif, maka ukuran tersebut dapat ditentukan secara empiris yang memerlukan informasi sebagai berikut:

- 1) Batas-batas daerah longsor.
- 2) Tebal lapisan tanah yang longsor.
- 3) Relatif stabilitas tanah yang longsor.
- 4) Tanah pondasi dimana konstruksi akan diletakkan.
- 5) Kadar air tanah.
- 6) Nilai dan lokasi bangunan yang harus diamankan.

Berdasarkan luas daerah longsor dan tebal lapisan tanah, dapat diperkirakan ukuran konstruksi penahan, sesuai dengan jenisnya. Tanah pondasi yang stabil diperlukan untuk semua jenis konstruksi penahan. Tanah pondasi yang lunak akan mudah longsor, kecuali apabila dasar konstruksi diletakkan pada kedalaman sekurang-kurangnya 3 sampai 4,5 m di bawah bidang longsor. Perkiraan yang sangat konservatif mengenai ukuran konstruksi penahan ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Perkiraan (sangat konservatif) ukuran konstruksi penahan tanah
(Sumber: Baker)

STABILITAS PENANGANAN	DIMENSI KONSTRUKSI (% VOLUME TANAH LONGSOR)	KONDISI PONDASI	STABILITAS RELATIF	JENIS LONGSOR
① Konstruksi penopang (<i>buttress</i>) ⌚ Urugan batu ⌚ Urugan tanah	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Konstruksi penopang: $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{3}$ ▫ Urugan yang dipadatkan kembali: $\frac{1}{3}$ - $\frac{1}{2}$ 	Harus mencapai kedalaman sekurang-kurangnya 1,5-3 m di bawah bidang longsor, kecuali apabila pada batuan	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Kecuali konstruksi penopang dari batuan, konstruksi penahan tidak dianjurkan untuk pengendalian masa pada tumit yang sangat tidak stabil. ▫ Bila dipasang pada bagian atas lokasi longsor, tiang pancang, krib, tembok penahan dipandang cocok. 	Secara umum, konstruksi penahan tidak dianjurkan untuk jenis longsor keruntuhan (<i>fall</i>) dan pelepasan (<i>flow</i>). Untuk penanganan bersama-sama sistem drainase, konstruksi penahan sangat bermanfaat apabila dibangun setelah lokasi longsor dikeringkan.
② Krib atau tembok penahan	▫ Krib: $\frac{1}{6}$ - $\frac{1}{10}$	Sangat cocok batuan; apabila tidak, harus mencapai kedalaman 1,2-2,1 m di bawah bidang longsor		
③ Pemancangan (<i>pilling</i>) ⌚ Tetap (<i>fix</i>) pada bidang longsor ⌚ Tidak tetap pada bidang longsor	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Satu buah tiang untuk ± 100 m³ (untuk tebal maksimum lapisan tanah: 3,6-4,5 m) ▫ Satu buah tiang untuk ± 50 m³ (untuk tebal maksimum lapisan tanah: 3-3,6 m) 	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Pada batuan: panjang jangkar = $\frac{1}{4}$-$\frac{1}{3}$ panjang total tiang pancang; ▫ Pada tanah stabil: panjang jangkar = $\frac{1}{3}$ panjang total tiang pancang ▫ Hanya diperlukan apabila di bawah bidang longsor tidak ada batuan stabil 		
④ Dowel pada batuan		Diperlukan batuan stabil		
⑤ Penjangkaran (<i>tie-rod</i>)		Tanah/batuan stabil diperlukan untuk penjangkaran		

Prosedur pembangunan tembok penahan dan konstruksi penopang harus diperhitungkan dengan hati-hati. Hal tersebut dikarenakan, apabila pondasi yang baik tidak diperoleh dan bangunan tidak terletak di bawah bidang longsor, maka kemungkinan tanah akan tergerus (*undermine*) dan sewaktu-waktu dapat terjadi longsor. Pembangunan tembok penahan dalam segmen dan penyediaan waktu minimum antara penggalian dan pembangunan konstruksi biasanya diperlukan. Tuntutan untuk tidak terjadinya penggerusan kadang-kadang menghalangi pembangunan tembok penahan berbentuk konstruksi penopang (*butress type*) atau tembok krib (karena alasan kecepatan pembangunan).

3.4. Pemuaian tanah

Kecenderungan tanah berbutir halus untuk menyusut apabila menjadi kering dan memuai apabila menjadi basah dipandang merupakan persoalan yang serius bagi perkerasan. Kasus

kerusakan perkerasan akibat perubahan kadar air cukup sering dijumpai, antara lain, retak memanjang pada perkerasan lentur serta penurunan yang disertai retak memanjang pada perkerasan kaku. Demikian juga, penyusutan tanah dapat mengakibatkan kehilangan daya dukung pondasi dangkal, pelat atau dinding yang dibangun pada tanah basah yang terletak di atas zona pengeringan musiman. Pada beberapa kasus, akar pohon atau musim kering yang panjang dapat juga mengakibatkan penurunan. Meskipun tanah dasar di daerah bercuaca basah cukup terlindungi oleh perkerasan dari pengaruh pengeringan musiman, namun tidak jarang bahwa tanah dasar harus disiapkan pada kadar air yang jauh lebih rendah dari kadar air yang akan terjadi di bawah perkerasan yang sudah jadi. Dengan demikian, tanah dasar ekspansif cenderung menimbulkan persoalan.

Penggunaan tanah yang mempunyai potensi besar untuk mengalami perubahan volume sebaiknya dihindarkan, atau dengan melindunginya dari perubahan kadar air, atau dengan penanganan khusus, misalnya melalui stabilisasi dengan kapur. Mengingat mahalnya penanganan, maka karakteristik perubahan volume tanah perlu benar-benar dipahami, termasuk kemungkinan tanah mengalami pemuaian atau penyusutan serta besarnya potensi tegangan pemuaian. Namun demikian, perubahan volume pada lempung terjadi melalui mekanisme yang kompleks dan banyak faktor yang mempengaruhi untuk terwujudnya penyusutan atau pemuaian.

3.5. Evaluasi pemuaian

Potensi pemuaian sering dipandang sebagai kemampuan melekat (*intrinsic*) tanah untuk memuai pada kondisi yang memungkinkan air terserap dan volume tanah meningkat. Contoh kondisi tersebut adalah pemadatan tanah pada kadar air rendah (kondisi kering) dan kemudian dibiarkan terkena air. Apabila dua jenis tanah yang mempunyai potensi pemuaian berbeda disiapkan dan diuji (dibasahi dan dikeringkan) dengan cara yang sama, maka kedua jenis tanah tersebut akan menunjukkan pemuaian yang berbeda. Namun demikian, apabila penyiapan contoh atau kondisi pengujian berubah, maka besarnya perubahan volume kemungkinan berubah juga. Apabila dipadatkan pada kadar air yang tinggi (*excess*), maka kedua jenis tanah mungkin hanya mengalami pemuaian yang kecil saja atau bahkan tidak memuai dan seolah-olah mempunyai perbedaan potensi pemuaian yang kecil. Oleh karena itu, potensi pemuaian harus dilihat sebagai potensi relatif yang hanya dapat terwujud apabila kondisinya menunjang dan tidak akan terwujud pada kondisi yang tidak sesuai.

Potensi relatif berbagai jenis tanah dapat dibandingkan berdasarkan pemuaian contoh tanah yang sambil diberi beban (*surchage*). Dalam hal tersebut, contoh tanah telah dipadatkan menurut prosedur yang baku (pada kadar air yang menghasilkan berat isi kering maksimum). Potensi pemuaian yang ditentukan dengan cara tersebut dipandang sesuai dengan perilaku tanah dasar, tetapi perubahan kecil pada kadar air, baik di laboratorium maupun di lapangan, dapat mengakibatkan perubahan pemuaian yang cukup besar.

Untuk mendapatkan nilai absolut pemuaian, maka kondisi lapangan perlu diduplikasikan sedekat mungkin di laboratorium. Apabila dilakukan secara terencana pada penyelidikan tanah pendahuluan, evaluasi tersebut tidak akan menyita waktu dan biaya yang besar, meskipun menyangkut jumlah contoh yang banyak. Prosedur sederhana untuk mengevaluasi potensi pemuaian adalah berdasarkan pengujian untuk klasifikasi. Dengan demikian, maka tanah-tanah yang diperkirakan mempunyai persoalan pemuaian dapat diidentifikasi dengan cepat dan kemudian diselidiki lebih lanjut untuk mengetahui keparahan yang dapat ditimbulkan serta cara untuk mengatasinya.

Potensi pemuaian sangat dipengaruhi oleh jenis dan kadar lempung dalam tanah; dimana kedua faktor tersebut juga mempengaruhi plastisitas. Dengan demikian, maka plastisitas dapat digunakan sebagai parameter potensi pemuaian. Secara umum, hubungan antara indeks plastis dengan potensi pemuaian ditunjukkan pada Tabel 15. Namun demikian,

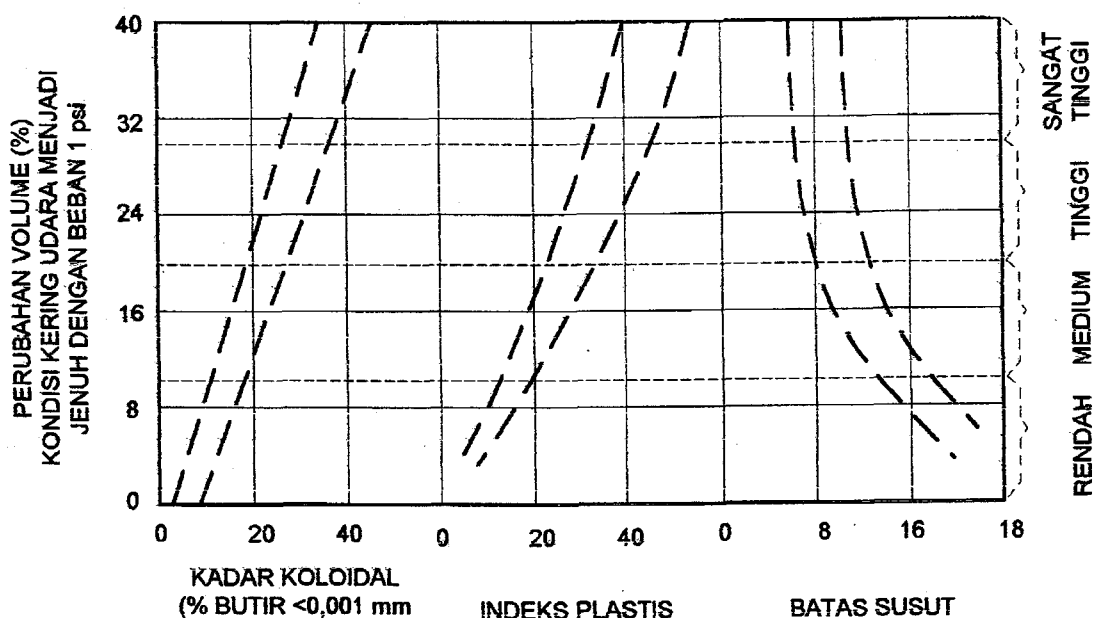
karena kadang-kadang dijumpai jenis tanah yang anomali (bertentangan dengan hubungan yang ditunjukkan pada Tabel 15), maka untuk lebih memastikan potensi pemuaian, masih diperlukan parameter lain. Dua parameter tersebut adalah kandungan lempung dan batas susut, disamping indeks plastis, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 62 (berdasarkan pengkajian beberapa buah contoh asli).

Tanah yang tidak mudah mengembang biasanya mempunyai batas susut yang tinggi dengan nilai lebih besar dari 14, sebaliknya, apabila batas susut rendah (sekifar 8), maka potensi pemuaian adalah besar. Namun demikian, dalam hal tersebut terdapat pengecualian dan ketelitian hasil pengujian batas susut biasanya ± 3 . Oleh karena itu, batas susut hanya digunakan sebagai pedoman umum saja untuk mengetahui potensi pemuaian. Disamping itu, batas susut digunakan untuk menilai potensi pemuaian apabila tanah diperkirakan akan mengalami pembasahan dan pengeringan. Batas susut menunjukkan kadar air dimana tanah menjadi jenuh pada volume minimum. Dengan demikian, batas susut memberikan gambaran tidak langsung tentang volume tanah yang akan dicapai pada saat penyusutan akibat pengeringan. Lebih jauh, batas susut yang rendah menunjukkan bahwa tanah akan mulai memuai dengan pembasahan pada kadar air yang rendah.

Tabel 15. Perkiraan hubungan indeks plastis dengan potensi pemuaian*

INDEKS PLASTIS	POTENSI PEMUAIAN
< 15	Rendah
15 – 24	Medium
25 – 46	Tinggi
> 46	Sangat tinggi

Sumber: Kerbs, 1972



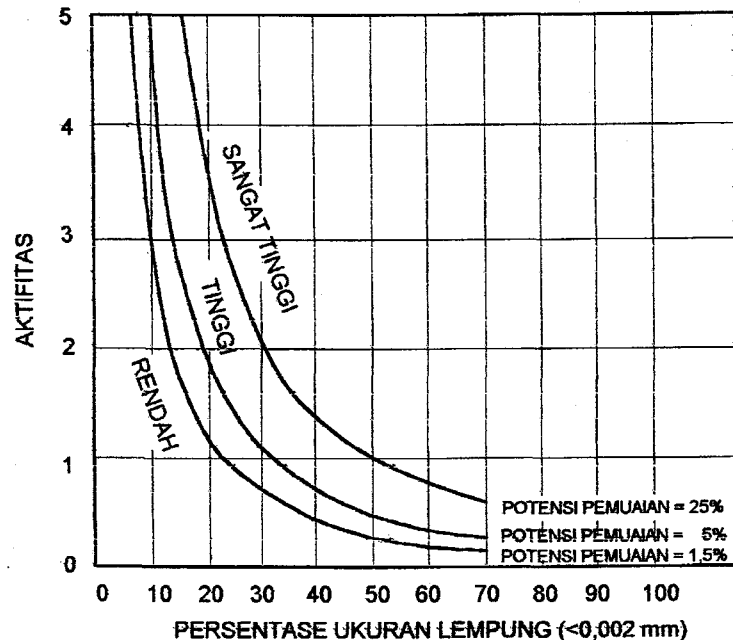
Gambar 62. Hubungan perubahan volume dengan kadar koloid, indeks plastis dan batas susut (Sumber: Krebs, 1971)

Suatu metoda evaluasi potensi pemuaian tanah dipadatkan yang dipandang menjanjikan adalah metoda yang dikembangkan oleh Seed, Woodward dan Lundgren (Krebs, 1971). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 63; aktifitas diplot terhadap kandungan lempung. Dalam hal tersebut, potensi pemuaian didefinisikan sebagai persentase pemuaian contoh tanah dalam silinder yang direndam sambil diberi beban (*surchage*) sebesar 1 psi (contoh

tanah dipadatkan menurut standar AASHTO, pada kadar air yang menghasilkan berat isi kering maksimum), sedangkan aktifitas adalah sebagaimana yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Aktifitas} = \frac{PI}{C - 5}$$

Pada persamaan di atas, C adalah persentase kandungan lempung; sedangkan penggunaan penyebut (C-5) adalah sebagai kompensasi kenyataan bahwa apabila kandungan lempung kurang dari 40 persen, hubungan (plot) antara indeks plastis dengan kandungan lempung memotong sumbu X (indeks plastis) di titik sebetah kanan titik nol (pada indeks plastis 5).



Gambar 63. Grafik klasifikasi untuk potensi pemuaian

3.6. Faktor-faktor yang mempengaruhi penyusutan dan tegangan penyusutan

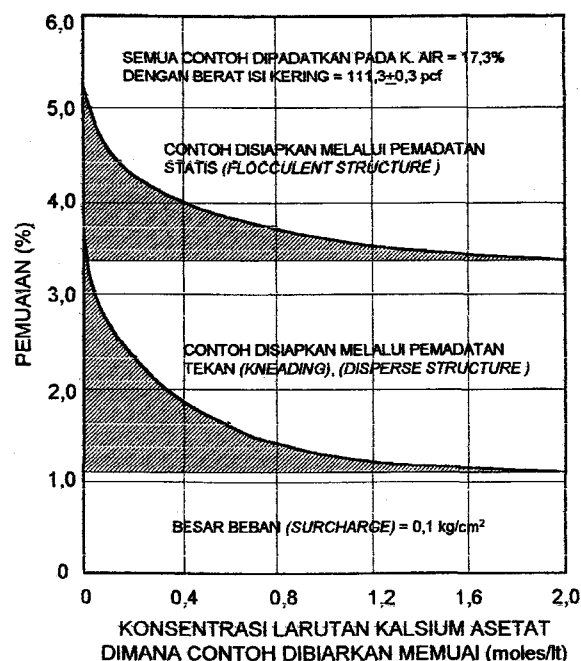
Pada Tabel 16 ditunjukkan faktor-faktor yang mempengaruhi pemuaian tanah yang telah dipadatkan dimana faktor pada Kelompok 1 menentukan potensi pemuaian dan faktor pada Kelompok 2 menentukan derajat terwujudnya potensi pemuaian menjadi kenyataan; baik dalam bentuk besarnya pemuaian maupun tekanan pemuaian. Faktor dalam Kelompok 1 berhubungan langsung dengan sifat alami butir-butir tanah, sedangkan faktor dalam Kelompok 2 ditentukan oleh kondisi dimana tanah dipadatkan atau ditempatkan serta kondisi lingkungan. Dengan demikian, dua tanah yang mempunyai potensi pemuaian sama, setelah menjadi tanah dasar dapat menunjukkan besarnya pemuaian yang sangat berbeda, karena masing-masing dipadatkan dengan cara, derajat kepadatan, atau kadar air yang berbeda, atau lingkungan, termasuk cuaca, yang berbeda. Pemahaman pengaruh Kelompok 2 terhadap pemuaian akan membantu dalam memperkirakan perilaku tanah dasar yang terdiri atas lempung sehingga selanjutnya kemungkinan dapat merubah pemuaian sampai batas yang tidak mengakibatkan terjadinya kerusakan pada perkerasan.

Hasil pengkajian hal di atas ditunjukkan pada Gambar 64 (Kerbs, 1971), dimana pada gambar tersebut diilustrasikan pengaruh struktur tanah dan konsentrasi elektrolit terhadap pemuaian lempung kepasiran yang dipadatkan di laboratorium. Dalam hal tersebut, dua contoh tanah dipadatkan pada kadar air (sampai kepadatan tertentu) dengan cara yang berbeda, yaitu pemadatan statis (*static compaction*) dan pemadatan tekan (*kneading compaction*). Pemadatan statis dilakukan dengan cara membebani tanah dengan beban tekan tunggal (*single compressive load*) sampai kepadatan tertentu. Selama pemadatan dengan cara statis, butir-butir tanah hanya mempunyai kesempatan yang kecil untuk

berorientasi sehingga contoh tanah mempunyai struktur flokulen. Pada pemadatan tekan (*kneading*), tanah ditusuk-tusuk dengan menggunakan batang berdiameter kecil. Cara tersebut menghasilkan aksi geseran (*shearing*) dan aksi pembentukan kembali (*remolding*) sehingga tanah mempunyai struktur searah (*disperse*). Selanjutnya, contoh tanah direndam dalam larutan kalsium asetat dengan tujuan; pertama, mengetahui pengaruh struktur tanah terhadap pemuain dan kedua, mengetahui besarnya sensitifitas pemuain akibat elektrolit. Pada Gambar 64 ditunjukkan bahwa tanah yang mempunyai struktur flokulen mempunyai pemuain yang lebih besar daripada tanah yang mempunyai struktur sejajar. Namun demikian, sensitifitas pemuain akibat elektrolit (yang ditunjukkan oleh bidang bergaris) untuk kedua struktur tanah adalah hampir sama. Oleh karena itu, pemuain yang disumbangkan oleh komponen fisikokimia; termasuk tekanan osmotik, hanya sedikit dipengaruhi oleh struktur tanah; sedangkan faktor utama yang mengakibatkan perbedaan perilaku pemuain dua struktur tanah adalah faktor mekanis. Struktur flokulen kemungkinan menimbulkan tegangan internal yang jauh lebih tinggi serta jumlah butir terdeformasi yang lebih besar daripada struktur sejajar.

Tabel 16. Faktor yang mempengaruhi pemuain lempung dipadatkan

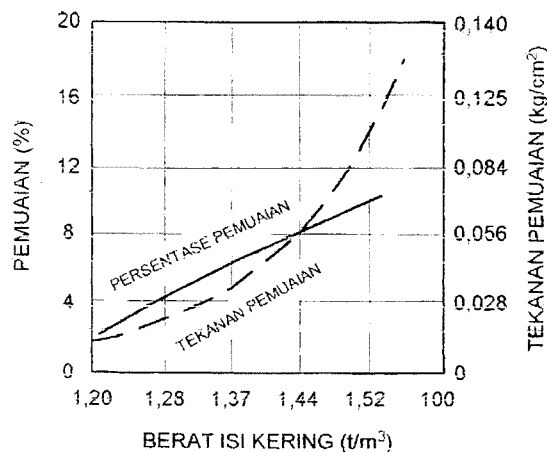
FAKTOR	PENGARUH
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kelompok 1 <ul style="list-style-type: none"> ♦ Jenis lempung dalam tanah ♦ Kandungan lempung 	<p>Menentukan potensi pemuain.</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ Tergantung pada sifat alami butir-butir tanah. ♦ Dapat ditentukan berdasarkan pengujian di laboratorium, baik terhadap maupun tanah asli atau yang dibentuk kembali
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kelompok 2 <ul style="list-style-type: none"> ♦ Struktur tanah ♦ Berat isi kering tanah ♦ Kadar air pemadatan ♦ Metoda pemadatan ♦ Keberadaan air ♦ Konsentrasi elektrolit dalam air ♦ Tekanan beban (<i>surcharge</i>) 	<p>Menentukan tingkat terwujudnya potensi pemuain menjadi kenyataan; yaitu besarnya pemuain.</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ Tergantung pada kondisi pemadatan dan kondisi lingkungan. ♦ Tidak dapat ditentukan berdasarkan pengujian klasifikasi di laboratorium.



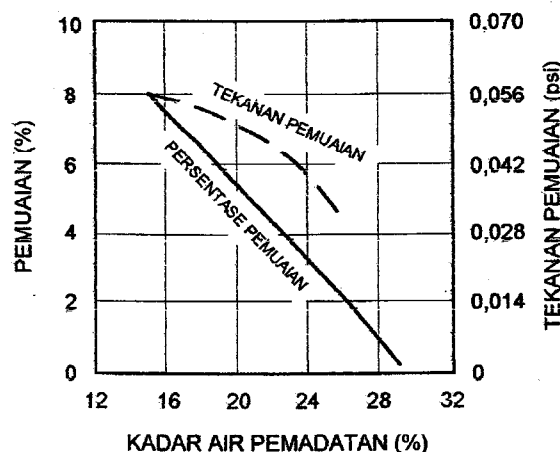
Gambar 64. Pengaruh struktur tanah dan konsentrasi elektrolit terhadap pemuain lempung kepasiran (Sumber: Krebs, 1971).

Pemuaian dan tegangan pemuaian dipengaruhi oleh berat isi kering tanah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 65. Sebagian fenomena tersebut merupakan akibat dari peningkatan deformasi butir akibat pemadatan (kepadatan makin meningkat). Disamping itu, butir-butir yang makin rapat akan mempunyai ruang antara butir yang lebih kecil sehingga akibat penyerapan air, akan timbul gaya refulsif yang lebih besar pula.

Apabila kepadatan tanah tetap, maka pemuaian dan tekanan pemuaian akan menurun sejalan dengan meningkatnya kadar air. Pada Gambar 66 ditunjukkan pengaruh kadar air terhadap pemuaian lempung apabila berat isi keringnya dipertahankan tetap. Pengaruh tersebut terutama sebagai akibat oleh orientasi struktur yang sejalan dengan meningkatnya kadar air. Dengan makin banyaknya air, butir-butir mineral akan lebih mudah berorientasi ke posisi yang sejajar. Lebih jauh, makin tinggi kadar air pemadatan, maka akan makin sedikit penyerapan alami tanah terhadap air.



Gambar 65. Pengaruh berat isi kering terhadap pemuaian dan tegangan pemuaian (Sumber: Krebs, 1971)



Gambar 66. Pengaruh kadar air pemadatan terhadap pemuaian dan tegangan pemuaian (Sumber: Krebs, 1971)

Perlu diperhatikan bahwa untuk berbagai jenis tanah; sejauh ini tidak ada hubungan konsisten antara tegangan pemuaian dan persentase pemuaian. Tanah yang sedikit mengandung lempung sangat aktif dapat mempunyai pemuaian bebas yang sangat kecil, tetapi dalam kondisi tertutup (*confined*) dapat mempunyai tegangan pemuaian yang sangat besar. Sebaliknya, tanah yang banyak mengandung lempung tidak aktif atau lempung organik, mungkin mempunyai pemuaian bebas yang besar, tetapi dalam kondisi tertutup (*confined*) dapat mempunyai tegangan pemuaian yang relatif kecil. Lebih jauh, besarnya pengaruh pemuaian kecil dalam mengurangi tegangan pemuaian sangat berbeda untuk berbagai jenis tanah. Oleh karena itu, evaluasi pemuaian dan tegangan pemuaian yang

paling dapat diandalkan adalah pengujian langsung pemuaian di laboratorium pada kondisi yang diperkirakan sesuai dengan kondisi lapangan.

4. Pemasangan patok

4.1. Ketentuan

Patok memegang peranan yang sangat penting dalam pekerjaan tanah untuk jalan, diantaranya sebagai acuan dan pengendalian pelaksanaan pada pembentukan alinyemen dan permukaan (*grade*) serta untuk perhitungan volume pekerjaan. Namun demikian, patok yang sudah terpasang kadang-kadang hilang, rusak atau perlu ditambah. Di samping itu, kemungkinan masih banyak tenaga yang terkait dalam pembinaan jalan yang belum mengenal secara rinci tentang patok. Sehubungan dengan hal tersebut, pada butir ini dicoba diuraikan beberapa jenis patok untuk pekerjaan tanah serta cara penempatannya.

Mengingat betapa pentingnya, maka patok perlu dipasang pada batas-batas daerah pekerjaan dan garis-garis penting lainnya, misalnya, sumbu jalan, garis bahu, batas galian dan batas timbunan.

Pengawas Pekerjaan dan asistennya biasanya diangkat secepatnya setelah gambar rencana dan spesifikasi selesai. Hal tersebut dimaksudkan agar dapat dilakukan pekerjaan persiapan sebelum kontraktor tiba.

Setelah tiba di lokasi pekerjaan, langkah yang perlu dilakukan oleh Pengawas Pekerjaan dan asistennya adalah melakukan inspeksi dengan berjalan kaki ke seluruh proyek, sambil membawa gambar rencana. Hal tersebut dimaksudkan agar setiap anggota kelompok pengawas pekerjaan mengenali kondisi lapangan, terutama dalam kaitannya dengan disain. Berdasarkan hasil inspeksi tersebut, selanjutnya disusun rencana survai yang biasanya disebut "survai pelaksanaan", yaitu survai (*engineering surveys*) yang diperlukan untuk menunjang kelancaran pelaksanaan pekerjaan.

Langkah awal dalam survai pelaksanaan adalah memeriksa kesesuaian alinyemen terhadap gambar rencana (pada beberapa kasus, kadang-kadang diperlukan penyesuaian sumbu jalan pada seluruh proyek). Pada kegiatan tersebut perlu dilakukan juga pemeriksaan semua tanda acuan (*witness points*) alinyemen. Apabila dijumpai tanda acuan yang terletak pada jalur kerja, maka tanda tersebut perlu dipindahkan ke posisi yang sesuai. Pada saat survai, perlu diperhatikan pula kemungkinan untuk memasang titik acuan tambahan pada sumbu jalan, yaitu untuk memudahkan pemasangan (*setting*) patok alinyemen dan elevasi.

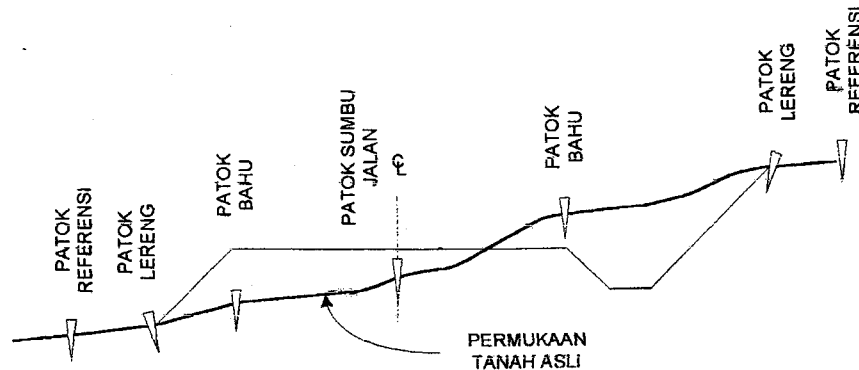
Semua titik ikat (*bench marks*) juga harus diperiksa, baik posisi maupun elevasinya. Titik ikat yang rusak atau hilang perlu diperbaiki atau diganti dan semua titik ikat harus terletak di luar jalur kerja dalam batas-batas yang ditentukan.

Setelah sumbu jalan dan semua titik ikat selesai diperiksa dan disesuaikan, kegiatan utama survai pelaksanaan adalah memasang (*setting*) patok untuk pedoman (*guidance*) dan pengendalian pelaksanaan. Semua patok harus dibubuhi tanda sedemikian rupa sehingga mudah ditafsirkan oleh pelaksana.

Patok yang biasanya perlu dipasang pertama adalah patok untuk pembersihan lapangan (*clearing and grubbing*). Penempatan patok dari sumbu jalan umumnya ditetapkan berdasarkan gambar denah (*plans*), dalam batas-batas jalur pekerjaan. Patok dapat dibuat dari potongan batang kayu kecil yang panjangnya kira-kira 120 sampai 150 cm dimana dan dipasang pada interval jarak tertentu (misal setiap 50 m) dengan bagian yang dibubuhi tanda menghadap ke sumbu jalan.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 67, berdasarkan lokasi penempatannya; patok dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut:

- 1) Patok sumbu jalan (*centerline stake*).
- 2) Patok bahu (*shoulder stake*).
- 3) Patok lereng (*slope stakes*).
- 4) Patok referensi (*reference stakes*).



Gambar 67. Jenis-jenis patok berdasarkan penempatannya

Setiap patok harus dibubuhi tanda (tulisan) yang menunjukkan lokasi (stasiun), beda tinggi elevasi muka tanah yang ada dengan elevasi akhir serta jarak ke samping dari sumbu jalan.

Pemasangan patok pada pekerjaan tanah yang dilakukan secara manual berbeda dengan pemasangan patok pada pekerjaan tanah yang dilakukan secara mekanis. Pada pekerjaan tanah secara manual, patok yang telah dipasang sebelumnya oleh regu pengukur merupakan acuan pelaksanaan, karena pekerja biasanya melakukan penggalian dan pengurugan di sekeliling patok tersebut sehingga volumenya dapat diukur langsung. Pada pekerjaan tanah secara mekanis, patok harus terletak di luar jalur kerja; karena apabila terletak pada jalur kerja, maka patok tersebut akan tergusur. Dengan demikian, pada pekerjaan tanah secara mekanis, patok (yang dipasang pada permukaan tanah asli) hanyalah merupakan acuan kasar bagi operator. Acuan pasti untuk penggalian dan penimbunan ditunjukkan pada patok yang dipasang (biasanya setelah pembersihan lapangan) pada batas galian dan timbunan yang tidak akan tergusur.

4.2. Patok sumbu jalan dan bahu

Patok sumbu jalan biasanya dipasang oleh regu pengukur dan digunakan untuk menentukan arah pekerjaan tanah; sedangkan patok-patok lain yang akan digunakan sebagai acuan pelaksanaan dipasang oleh regu survei pelaksanaan. Jarak antara patok sumbu jalan biasanya 50 m; dimana dalam hal tertentu (misal medan yang sangat tidak rata atau pada lokasi galian/timbunan) jarak tersebut dapat diperpendek. Patok dapat dibuat dari batang kayu dimana bagian ujung atasnya dibentuk sehingga mempunyai dua bidang rata yang dapat dibubuhi tanda (tulisan). Pada bidang yang menghadap sumbu jalan dibubuhkan tulisan yang menunjukkan jarak (stasiun), sedangkan pada bidang lainnya dicantumkan beda tinggi ke permukaan akhir, dimana urugan diberi tanda "tambah" (+) dan: galian diberi tanda "kurang" (-); misal, patok sumbu jalan pada Gambar 67 terletak pada Stasiun 2+350 dan pada permukaan yang elevasinya 0,65 m di atas permukaan akhir, maka patok dibubuhi tulisan "Sta. 2+350" pada bidang yang menghadap ke sumbu jalan dan "+0,65/0,00" pada bidang sebaliknya.

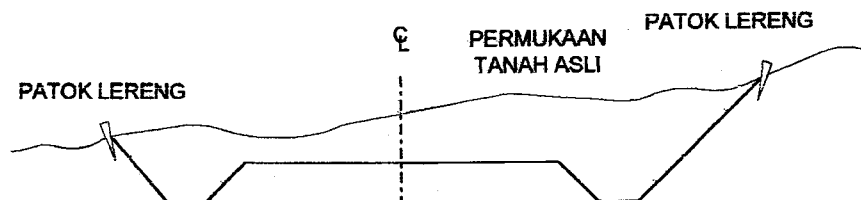
Patok sumbu jalan yang pertama dipasang pada awal proyek dan diikuti dengan pemasangan patok selanjutnya dimana jaraknya dapat diukur dengan meteran pita, sedangkan arahnya dapat diukur dengan "alat ukur" yang dapat mengukur juga perbedaan elevasi antara dua patok yang berurutan. Cara yang sama dilakukan pula dalam pemasangan patok bahu, tetapi diikuti dengan koreksi dalam arah melintang dan sumbu

jalan. Sebagaimana halnya pada patok sumbu jalan, pada patok bahu juga dicantumkan jarak (stasiun), beda tinggi ke permukaan akhir dan jarak dari sumbu jalan; misal tulisan yang tercantum adalah "Sta. 2+350" pada bidang yang menghadap sumbu jalan dan "-0,48/5,50" pada bidang sebaliknya (tulisan menyatakan bahwa patok terletak pada jarak 2350 m dari patok pertama, terletak pada permukaan yang harus digali sedalam 48 cm dan terletak pada titik yang berjarak 5,50 m dari sumbu jalan).

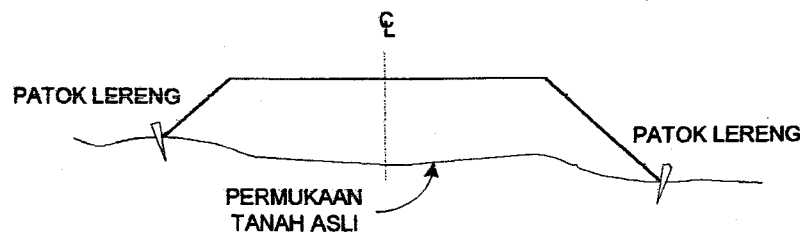
4.3. Patok potongan melintang dan lereng

Kelompok yang melakukan survai pelaksanaan biasanya bertanggung jawab atas perhitungan volume pekerjaan tanah. Oleh karena itu, maka kelompok tersebut perlu mengambil potongan melintang yang umumnya untuk seluruh proyek. Potongan melintang kondisi asli menunjukkan elevasi permukaan tanah asli yang tidak mungkin diperoleh kembali setelah pelaksanaan dimulai. Pengambilan potongan melintang yang dilakukan menjelang dimulainya pelaksanaan dapat mengurangi salah satu kemungkinan terjadinya perselisihan mengenai volume pekerjaan tanah.

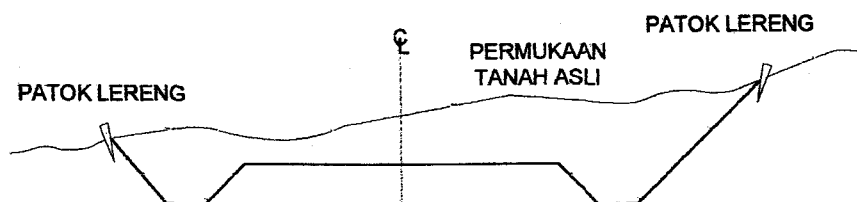
Patok lereng dipasang pada titik-titik dimana lereng galian atau timbunan yang direncanakan memotong permukaan tanah asli (patok lereng dapat dipasang bersamaan dengan pengambilan potongan melintang tanah asli). Patok lereng untuk pembentukan awal permukaan (*rough grading*) biasanya dipasang pada interval jarak yang sama dengan interval jarak patok sumbu jalan, dimana semua informasi yang diperlukan untuk operasi pembentukan permukaan dibubuhkan pada patok. Apabila patok lereng dipasang bergeser (*offset*), maka pergeseran tersebut harus dicantumkan pula pada patok. Pada Gambar 68 ditunjukkan posisi patok lereng untuk beberapa potongan melintang tipikal.



a. Seksi pemotongan dan pengurugan (*cut and fill section*)



b. Seksi pengurugan (*fill section*)



c. Seksi pemotongan (*cut section*)

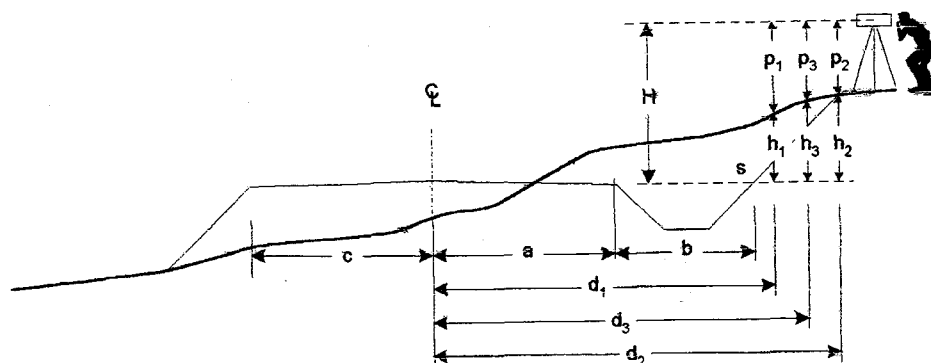
Gambar 68. Posisi patok lereng pada potongan melintang tipikal

Cara penetapan lokasi patok lereng berbeda dengan cara penetapan lokasi patok sumbu jalan dan patok bahu, karena patok-patok lereng umumnya tidak terletak pada garis yang sejajar dengan sumbu jalan.

Penetapan lokasi patok lereng biasanya perlu dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*), karena hal tersebut tidak dapat dilakukan hanya dengan menggunakan meteran pita saja.

Dengan memperhatikan Gambar 69, penentuan lokasi patok lereng dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Tempatkan alat ukur pada suatu titik, baik di luar ataupun di dalam jalur kerja, tergantung pada kondisi lapangan.
- 2) Tempatkan bak pada sisi luar bahu dan lakukan pembacaan sehingga diperoleh ketinggian alat ukur, misal H.
- 3) Tempatkan bak pada titik yang akan menjadi lokasi patok dan lakukan pembacaan elevasi, misal hasilnya adalah p. Berdasarkan H dan p, hitung $h = H - p$.
- 4) Lakukan pengukuran jarak horizontal antara lokasi bak pada Langkah 3 dengan sumbu jalan, misal diperoleh d (jika memungkinkan, pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan meteran pita).
- 5) Berdasarkan nilai a (lebar jalan dari sumbu jalan ke tepi luar bahu), b (lebar saluran samping) dan s (kemiringan lereng), yang diperoleh dari gambar rencana, maka nilai dapat dihitung, yaitu $d = a + b + \frac{h}{s}$.
- 6) Bandingkan nilai d pada Langkah 4 dengan nilai d pada Langkah 5. Apabila kedua nilai tersebut tidak sama, bak ditempatkan pada titik yang lain, sampai diperoleh titik yang mempunyai jarak dari sumbu jalan (Langkah 4) sama dengan jarak pada Langkah 5.



Gambar 69. Potongan melintang sebagai ilustrasi untuk penentuan lokasi patok lereng

Contoh

Misal berdasarkan pengukuran diperoleh $H = 2,5$ m dan $p_1 = 1,20$ m; sedangkan berdasarkan gambar rencana, diperoleh $a = 6$ m, $b = 2$ m dan $s = 30\%$. Berdasarkan gambar rencana dapat diperoleh nilai d sebagai berikut:

$$d_1 = 6 + 2 + \frac{2,50 - 1,20}{30} \times 100 = 12,3 \text{ m}$$

Berdasarkan pengukuran, misalnya nilai d_1 adalah 10,2 m. Karena nilai d_1 hasil pengukuran tidak sama dengan nilai d_1 hasil perhitungan, maka lokasi patok perlu dicoba pada titik lain (digeser ke arah luar, misal di Titik 2); misal hasil pengukuran yang diperoleh, $p_2 = 0,90$ m dan $d_2 = 14,1$ m. Jarak titik ke dua berdasarkan gambar rencana adalah,

$$d_2 = 6 + 2 + \frac{2,50 - 0,90}{30} \times 100 = 13,3 \text{ m}$$

Karena kedua nilai d_2 di atas belum sama, maka masih diperlukan pemilihan titik yang lain.

Misal pengukuran pada titik ke tiga diperoleh $p_3 = 1,05$ m dan $d_3 = 12,76$ m, sedangkan perhitungan menghasilkan $d_3 = 12,80$. Kedua nilai d_3 tersebut cukup dekat, sehingga titik ke tiga dapat ditetapkan sebagai lokasi patok lereng galian. Dengan demikian, tulisan yang dapat dicantumkan pada patok tersebut adalah, "Sta. 2+350" pada bidang yang menghadap sumbu jalan dan "-2,10/12,80" pada bidang sebaliknya.

Patok lereng mempunyai fungsi yang lebih penting daripada patok bahu, karena merupakan batas penggalian dan pengurugan, baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Oleh karena itu, patok bahu kadang-kadang dapat dihilangkan.

4.4. Patok referensi (*reference stakes*)

Patok referensi biasanya dipasang pada jarak yang seragam ke arah luar patok lereng dan mempunyai fungsi sebagai acuan untuk pemasangan kembali patok bahu dan patok lereng yang telah tergusur pada saat pelaksanaan. Tulisan pada patok referensi adalah sama dengan tulisan pada patok-patok yang lain; namun tanda "tambah" (+) dan tanda "kurang" (-) menunjukkan perbedaan ketinggian dengan elevasi tepi luar bahu.

4.5. Patok permukaan akhir (*finishing grade stakes*)

Setelah operasi pembentukan awal permukaan (*rough grading*) selesai, baik sebagian maupun seluruhnya, maka pekerjaan selanjutnya adalah pembentukan permukaan akhir (*final grading*). Pekerjaan tersebut perlu dilakukan karena pembentukan awal, yang mengacu pada patok yang telah diuraikan di atas, biasanya belum menghasilkan elevasi yang ditetapkan dalam disain, meskipun dilakukan oleh operator yang berpengalaman. Agar dapat menghasilkan elevasi permukaan yang sesuai dengan disain, maka pelaksanaan pembentukan permukaan akhir perlu dibantu dengan patok permukaan akhir.

Sesuai dengan tujuan penggunaannya, patok permukaan akhir harus dipasang pada titik penting, yaitu pada sumbu jalan dan garis bahu. Karena harus tidak rusak akibat alat berat (*grader*), patok permukaan akhir harus dibuat dari bahan yang kuat (misal baja tulangan) dengan panjang yang cukup (sekurang-kurangnya 40 cm). Patok permukaan akhir pada puncaknya terletak setaraf dengan permukaan akhir (*final grade*). Agar mudah terlihat oleh operator, puncak okasi yang masih memerlukan pengurangan harus ditanam sedemikian rupa sehingga patok sebaiknya dicat warna merah dan harus dilindungi sehingga tidak mudah rusak atau bergeser.

Karena patok permukaan akhir sering hilang atau rusak, maka untuk mengatasinya dapat digunakan patok lain yang disebut "patok ciri" ("*marker stake*"), yang dipasang cukup jauh dari sumbu jalan. Agar mudah terlihat oleh operator, patok ciri harus cukup panjang (sekurang-kurangnya 1 m) dan harus dapat memuat tulisan yang menunjukkan elevasi sebenarnya dari permukaan akhir (*final grade*).

4.6. Potongan melintang akhir (*final cross-sections*)

Apabila pembentukan permukaan akhir benar-benar telah selesai, malfa untuk menentukan volume akhir penggalian dan penimbunan pada seluruh proyek, perlu dilakukan pengambilan potongan melintang akhir. Lokasi potongan melintang akhir sama dengan lokasi potongan melintang tanah asli. Pengambilan potongan melintang akhir sebaiknya dilakukan secepatnya setelah pembentukan permukaan akhir selesai, yaitu agar perhitungan volume dapat dilakukan sesuai dengan kemajuannya dan umumnya dapat memperpendek waktu yang diperlukan untuk estimasi akhir volume apabila proyek telah selesai.

LAMPIRAN B

(Informatif)

Contoh perencanaan dan proyek pekerjaan tanah

1. Penentuan jumlah dan jenis alat pada pekerjaan penggalian dan pengangkutan

Pada lahan yang mempunyai lebar 150 m dan panjang 250 m akan dibangun beberapa unit gudang. Pekerjaan tanah mencakup pengupasan tanah penutup, penurunan permukaan tanah dan pembuangan bahan galian. Tanah yang harus digali dan dibuang adalah 18.125 m³ lempung dan 10.000 m³ tanah penutup (total 28.125 m³).

Beberapa karakteristik lain mengenai proyek adalah:

- Kondisi lahan adalah relatif datar dan mudah dimasuki.
- Lokasi lahan pembuangan terletak pada jarak 3 km.
- Pekerjaan harus dimulai pada awal musim panas.
- Waktu yang tersedia untuk pelaksanaan adalah sekitar 10 minggu.
- Waktu pengoperasian alat adalah 40 jam per minggu.

Karena pada saat penggalian akan terjadi penggemburan (pengembangan) tanah, maka volume tanah lepas menjadi:

- Volume lempung lepas = $18.125 \times 1,30 = 23.562 \text{ m}^3$
- Volume tanah penutup lepas = $10.000 \times 1,45 = 14.500 \text{ m}^3$
- Volume total tanah lepas = 38.062 m^3

Pelaksanaan pekerjaan pekerjaan dicoba dengan menggunakan *tracked forward loader* dan lori kapasitas 14 m³ (20 ton).

□ Loader kapasitas 1,53 m³

- Faktor kapasitas pengisian = 0,8 (80% kapasitas penuh)
- Muatan per siklus = $0,8 \times 1,53 = 1,22 \text{ m}^3$
- Frekwensi pengisian satu lori = $14/1,22 = 11,5 = 12$ kali
- Lamanya 1 siklus pemuatan = 0,8 menit (berdasarkan pabrik pembuat alat)
- Lamanya pemuatan untuk satu lori = $12 \times 0,8 = 9,6$ menit
- Waktu yang diperlukan lori untuk mengambil posisi = 2,0 menit
- Waktu total untuk pemuatan satu lori = $9,6 + 2,0 = 11,6$ menit
- Produktifitas *loader* per minggu (waktu kerja efektif = 50 menit/jam)
= $\frac{40 \times 50}{11,6}$ lori muatan = 172 lori muatan
= $172 \times 14 = 2.408 \text{ m}^3$
- Waktu operasi total yang diperlukan oleh 1 *loader* = $38.062/2408 = 15,8$ minggu
Dalam waktu yang tersedia (10 minggu) akan digunakan dua buah *loader* (beroperasi selama 8 minggu). Karena waktu yang tersedia adalah 10 minggu, maka kelebihan waktu digunakan untuk mobilisasi alat.

Waktu operasi lori dalam satu siklus adalah:

- Pengambilan posisi dekat *loader* = 2,0 menit
- Pemuatan = 9,6 menit
- Perjalanan untuk 5 km = 10,0 menit (kecepatan = 30 km/jam)
- Penurunan muatan = 3,0 menit
- Lain-lain = 1,0 menit
- Total = 25,6 menit

Jumlah lori yang diperlukan untuk melayani dua loader = $2 \times 25,6/11,6 = 4,4$ buah.
Untuk keperluan perbaikan, dll. akan digunakan 5 buah lori.

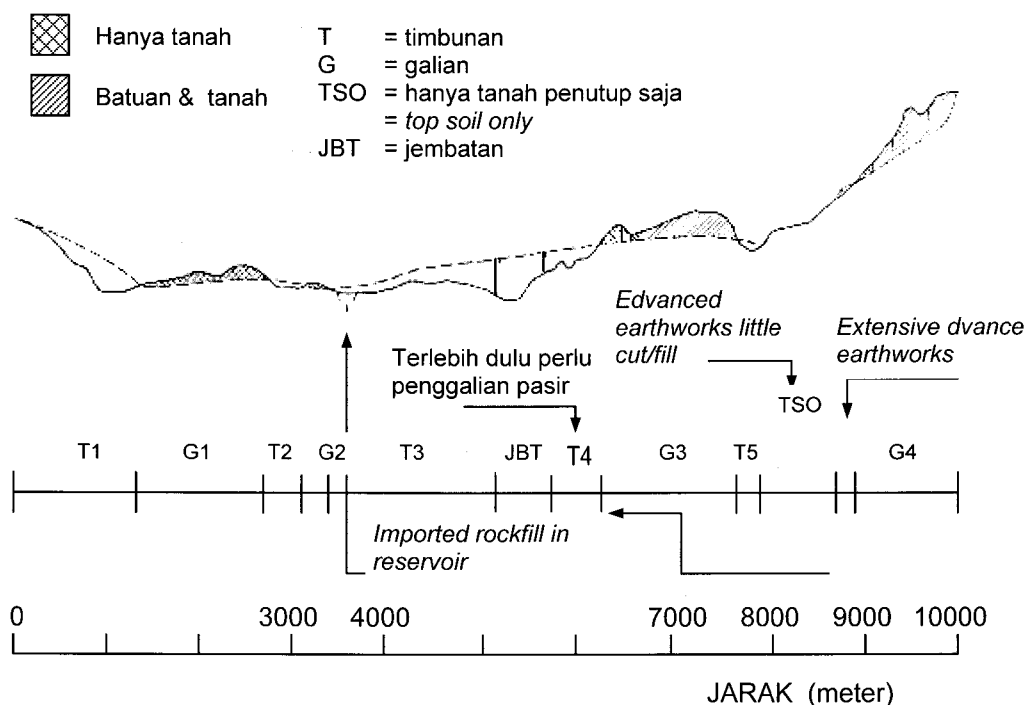
Dengan demikian, pada proyek ini akan digunakan 2 buah *loader* dan 5 buah lori.

2. Contoh proyek pekerjaan tanah

Pada contoh ini diilustrasikan proyek pemindahan tanah pada pembangunan jalan bebas hambatan, dimana bahan yang harus digali terdiri atas tanah dan batuan. Karena proyek yang sebenarnya adalah besar, pada contoh ini dilakukan penyederhanaan, namun tanpa merubah aspek-aspek pokok.

Pada kontrak ditetapkan bahwa pekerjaan menyangkut pemotongan tiga lereng besar dan satu lereng kecil, pembangunan lima buah timbunan dan pembuangan tanah jelek dan tanah tidak digunakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 70. Di bagian tengah proyek terdapat jembatan di atas jalan (*viaduct*) yang akan menghambat pengangkutan tanah.

Berhubung jarak angkut antara 3 dan 10 km, maka untuk pengangkutan diperlukan *motor scrapers*, *dump truck* dan lori. Batuan dijumpai pada dua lokasi galian, sehingga untuk pengangkutannya diperlukan lori dan *dump trucks*. Kondisi tersebut, akan mengurangi pekerjaan yang dapat dilakukan dengan *motor scrapers*. Karena ternyata volume batuan lebih besar daripada yang diperkirakan, maka pekerjaan yang dapat dilakukan dengan *motor scrapers* menjadi tambah besar.



Gambar 70. Contoh proyek pemindahan tanah yang besar (Sumber: Horner, 1988)

3. Pengkajian peralatan pemadatan

Akan dibangun beberapa buah timbunan yang terdiri atas batuan dan tanah berbutir gradasi menerus.

Pada pekerjaan ini, akan ditentukan jenis alat yang perlu digunakan untuk pemadatan tanah sekitar 15.000 sampai 22.000 m³ per minggu.

Batuan dan tanah berbutir gradasi menerus akan diperlakukan sama dan alat yang dipandang paling baik untuk pemadatannya adalah mesin pemadat getar. Sehubungan dengan hal tersebut akan dikaji alat pemadat yang ditarik dan alat pemadat bermesin sendiri. Untuk kedua jenis alat, spesifikasi menetapkan jumlah lintasan pemadatan untuk setiap lapisan pada kecepatan sekitar 1,5-2,5 km/jam (rata-rata = 2,0 km/jam), dan tumpang-tindih (*overlap*) pada kedua sisi lintasan harus 0,15 m.

Ukuran alat pemadat adalah:

Karakteristik alat	<i>Towed roller</i>	<i>Self-propelled double drum roller</i>
• Lebar roda	2,08 m	2,03 m
• Berat per m lebar roda	5600 kg/m	3000 kg/m

Spesifikasi menetapkan persyaratan sebagai berikut:

Parameter	<i>Towed roller</i>	<i>Self-propelled double drum roller</i>
• Tebal maks. lapisan	275 mm	200 mm
• Jumlah min. lintasan	4	2*
*untuk <i>double drum roller</i> yang mempunyai berat per lebar roda sama, jumlah lintasan dibagi dua		

□ *Towed rollers*

- Luas permukaan yang terlintasi = lebar efektif roda x kecepatan

$$= (2,08 - 0,3) \times 2,0 \times 1000 \text{ m}^2/\text{jam}$$

$$= 3560 \text{ m}^2/\text{jam}$$
- Produksi per jam =
$$\frac{3560 \times 0,275 \text{ m}^3/\text{jam}}{4}$$

$$= 244,75 \text{ m}^3/\text{jam}$$
- Produksi per minggu =
$$244,75 \times 54 = 13217 \text{ m}^3/\text{minggu}$$

Produksi di atas tidak ada kelonggaran waktu untuk berproduksi di bawah efisiensi puncak, misalnya waktu untuk persiapan mulai operasi, waktu untuk berputar dan waktu untuk perbaikan. Oleh karena itu, diperlukan koreksi yang besarnya 60%.
- Produksi per minggu setelah dikoreksi =
$$13217 \times 0,6 = 7930 \text{ m}^3/\text{minggu}$$

□ *Self-propelled rollers*

- Luas permukaan yang terlintasi = lebar efektif roda x kecepatan

$$= (2,03 - 0,3) \times 2,0 \times 1000 \text{ m}^2/\text{jam}$$

$$= 3460 \text{ m}^2/\text{jam}$$
- Produksi per jam =
$$\frac{3460 \times 0,2 \text{ m}^3/\text{jam} \times 54 \text{ jam}}{2}$$

$$= 18684 \text{ m}^3/\text{minggu}$$
- Produksi per minggu setelah dikoreksi =
$$18684 \times 0,6 = 11210 \text{ m}^3/\text{minggu}$$

Untuk mencapai produksi puncak (15000 – 22000 m³/minggu), diperlukan 2 buah *self-propelled tandem roller* atau 3 buah *towed vibrating rollers*. Dalam hal ini, biaya satuan pengoperasian *towed roller* (termasuk *crawler tractor*) adalah 1,4 kali satuan pengoperasian *tandem roller*. Apabila digunakan dua buah *self-propelled tandem rollers*, maka akan diperoleh penghematan yang cukup besar. Namun demikian, apabila timbunan terletak di beberapa lokasi sehingga untuk pemadatannya alat pemadat perlu berpindah-pindah, maka penggunaan tiga buah *towed rollers* berukuran kecil dipandang lebih ekonomis.

4. Contoh proyek pemadatan

Pada contoh ini diilustrasikan proyek pemadatan pada pembangunan jalan raya bebas hambatan yang panjangnya 2,25 km. Pada proyek ini akan dibangun pula dua buah persimpangan (*roundabouts*) serta jalan-jalan kecil yang memotong jalan utama.

Pekerjaan tanah mencakup 700.000 m³ pengurugan dan pemadatan tanah untuk bangunan, lapisan drainase, beban (*surcharge*) serta untuk lanskap. Pemadatan dilakukan dengan beberapa jenis alat yang dipandang cocok untuk jenis tanah, volume dan kecepatan pengurugan, serta lingkungan. Rangkuman peralatan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 17.

Sebagian besar tanah untuk timbunan terdiri atas pasir. Apabila untuk mengangkut pasir yang volumenya besar digunakan *motor scrapers*, maka untuk pemadatan perlu digunakan *two towed vibrating rollers in tandem* atau *self-propelled tamping rollers*; apabila untuk pengangkutan tersebut digunakan beberapa buah lori, *dump trucks* atau *tractor and boxes*, maka untuk pemadatan perlu digunakan *single towed vibrating rollers*. Untuk bahan yang lain, pemadatan dilakukan dengan *towed vibrating, smooth wheel (deadweight) and towed or self-propelled tamping rollers*, tergantung pada jenis tanah dan produktifitas.

Tabel 17. Contoh peralatan yang digunakan pada proyek pemadatan sebagaimana diuraikan pada Butir 3 (Sumber: Horner, 1988)

LOKASI	JENIS TANAH	ALAT PE- NGURUGAN	ALAT PEMADATAN	TEBAL LA- PISAN (mm)	JUMLAH LINTASAN
□ Roundabout 1 • Slip roads • Old chalk pits • Landscaping	Thanet sand	Lorries/dump trucks	140 HP crawler tractor towing vibrating roller (1320 kg/m width)	275	8
	Coarse sand-fine gravel (free draining)	Lorries	Seperti di atas – selanjutnya tanah dibuat jenuh dan dipadatkan dengan 140 HP crawler tractor	Sesuai dengan keperluan	Sesuai dengan keperluan
	Chalk, clay, rubble	Lorries	140 HP crawler tractor towing vibrator roller (3260 kg/m lebar)	200	2*
			Seperti di atas tapi tanpa digetarkan	150	2 sampai 4*
□ Motorway & side road embankment • Start to roundabout 1 • Roundabout 1 to viaduct • Old chalk pits • Surcharge embankment to			140 HP crawler tractor towing 8000 kg smooth-wheeled roller	150	2 sampai 4*
	Thanet sand	Motor scrapers	300 HP crawler tractor towing two vibrating rollers in tandem (both 5600 kg/m width)	100	1
	Thanet sand	Motor scrapers	300 HP crawler tractor towing two vibrating rollers in tandem (both 5600 plus 3260 kg/m width)	100	1 sampai 2
	Brickearth	Tractor & box	3740 kg self propelled tamping roller	250	4
	Thanet sand	Motor scrapers	140 HP crawler tractor towing 5500 kg towed tamping roller	225	8
	Thanet sand	Dump trucks	140 HP crawler tractor towing 5600 kg/m width vibrating roller	300	4
□ Roundabout 2 • Slip road • Clay seal to contaminated area • Trunk road embankment	Thanet sand	Tractor & box Dump trucks	140 HP crawler tractor towing 3260 kg/m width vibrating roller	275	8
	Gravelly clay	Tractor & box Motor scraper	170 HP special rubber-tyred tractor towing 3260 kg/m vibrating roller	300	4
	London clay	Lorries	3740 kg self propelled tamping roller	275	8
	Thanet sand	Dump trucks	140 HP crawler tractor towing 5500 kg tamping roller	200	4
			3740 kg self propelled tamping roller	225/150	4/12
			170 HP special rubber-tyred tractor towing 3260 kg/m vibrating roller	225	4
□ Structures • Granular backfill	Sandy gravel	Dump trucks	140 HP crawler tractor towing 3260 kg/m width vibrating roller	250	4
			Manual 664 kg/m vibrating roller	275	8
				75	12

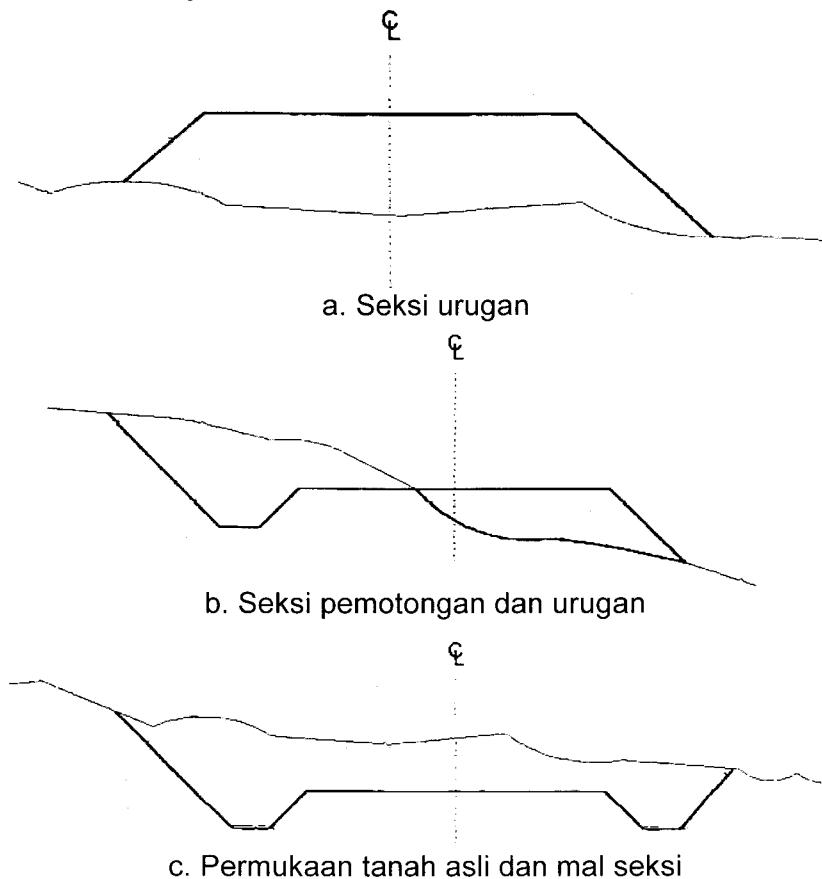
5. Perhitungan volume galian dan timbunan

5.1. Potongan melintang dan mal-seksi (*cross-sections and templates*)

Salah satu tahap penting dalam perencanaan pekerjaan tanah adalah menentukan volume pekerjaan tanah, dimana pekerjaan tanah biasanya mencakup penggalian tanah serta pengangkutan dari tempat penggalian ke tempat penimbunan. Pembayaran pekerjaan tanah biasanya hanya didasarkan pada volume tanah galian dan umumnya mencakup biaya pengangkutan tanah ke tempat penimbunan yang jaraknya tertentu, yang biasa disebut "jarak bebas" (*free-haul*). Untuk membayar pengangkutan tanah galian di luar jarak bebas sering digunakan mata pembayaran "jarak tambahan" (*overhaul*).

Untuk menentukan volume tanah galian dan timbunan dapat digunakan "mal seksi" (*template section*), yaitu potongan melintang yang dipandang mewakili seluruh potongan melintang jalan. Dalam hal tersebut, volume tanah galian dan timbunan ditentukan berdasarkan mal seksi yang ditempatkan pada potongan melintang tanah asli serta berdasarkan jarak antara dua seksi.

Pada Gambar 71 ditunjukkan contoh mal seksi untuk tiga kondisi permukaan yang dapat dijumpai di lapangan. Dalam kaitannya dengan seksi, sering digunakan istilah "pemotongan" (*"cut"*) dan "urugan" (*"fill"*) serta "galian" (*"excavation"*) dan "timbunan" (*"embankment"*). Istilah "pemotongan" (*"cut"*) dan "urugan" (*"fill"*) merupakan istilah yang biasanya digunakan untuk menyatakan luas pada seksi; sedangkan "galian" (*"excavation"*) dan "timbunan" (*"embankment"*) untuk menyatakan volume.



Gambar 71. Permukaan tanah asli dan mal seksi

Potongan melintang biasanya digambar dalam kertas yang mempunyai skala tertentu; misal; kertas milimeter. Setiap potongan melintang yang dibuat harus menunjukkan lokasi atau

stasiun potongan tanah asli dan mal potongan melintang, elevasi permukaan akhir tanah serta luas pemotongan dan urugan. Volume galian dan timbunan antara dua potongan melintang yang berurutan juga dapat dicantumkan pada kertas potongan melintang.

Untuk memudahkan penggambaran potongan melintang, mal potongan melintang dapat dibuat dari bahan transparan. Dengan demikian, maka potongan-potongan melintang yang mewakili seluruh jalan dapat digambar dengan cepat pada kertas potongan melintang. Pada saat mal potongan melintang ditempatkan pada kertas potongan melintang, perlu diperhatikan superelevasi dan transisi sebagai akibat adanya tikungan.

5.1.1. Cara menghitung volume galian dan timbunan

Luas pemotongan (*cut*) dan urugan (*fill*) dapat diukur dengan menggunakan planimeter atau melalui perhitungan berdasarkan koordinat. Berdasarkan luas tersebut, dapat dihitung volume galian dan timbunan antara dua seksi dan untuk seluruh proyek, kemudian digabungkan sehingga diperoleh volume total.

Salah satu cara untuk menghitung volume adalah berdasarkan metoda luas ujung rata-rata (*average-end-area method*) yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{2} L (A_1 + A_2) \dots\dots\dots 74$$

Pada persamaan di atas, V adalah volume, A_1 dan A_2 adalah luas seksi yang berurutan dan L adalah jarak antara dua seksi yang berurutan. Apabila V dalam yard kubik, A_1 dan A_2 dalam feet kuadrat dan L dalam feet, maka persamaan di atas menjadi:

$$V = \frac{\frac{1}{2} L (A_1 + A_2)}{27} \dots\dots\dots 75$$

Apabila seksi-seksi tidak membentuk prisma tegak, volume yang dihitung dengan cara di atas adalah agak lebih besar daripada volume yang dihitung dengan rumus prismoidal. Namun demikian, perbedaan tersebut adalah kecil apabila seksi-seksi tidak berubah secara mendadak. Pada bagian jalan yang mempunyai tikungan tajam, hasil perhitungan perlu dikoreksi dengan cara prismoidal.

Apabila seksi berubah dari pemotongan ke urugan, maka akan terdapat suatu titik dimana pemotongan dan urugan adalah nol (biasanya terjadi pada daerah yang tidak rata). Perhitungan volume pada lokasi tersebut perlu dilakukan pada titik-titik antara. Pada kondisi tersebut, cara praktis yang biasa digunakan adalah menentukan luas untuk tiga seksi; satu seksi terletak di tengah-tengah, dimana pemotongan dan urugan sama dengan nol, sedangkan dua seksi terletak di sebelah kiri dan kanan seksi yang pertama.

Contoh lembar untuk perhitungan volume ditunjukkan pada Tabel 18 (satuan yang digunakan adalah foot dan yard; 1 yard = 3 ft).

Kolom 1 sampai 4 menunjukkan luas (dalam ft^2) untuk pemotongan, urugan, kehilangan bahan dan bahan yang tidak cocok. Kolom "kehilangan" dapat diartikan sebagai bahan galian yang tidak dapat digunakan sebagai timbunan, dikarenakan tanah tersebut mengandung daun-daunan, akar dan sisa-sisa lain tumbuhan. Demikian juga, apabila bahan tersebut terdapat pada seksi urugan, maka akan diperlukan bahan urugan yang lebih banyak. Hal tersebut kadang-kadang diklasifikasikan sebagai "kehilangan pembongkaran" ("*grubbing loss*"). Apabila sulit diperkirakan, kehilangan tersebut dapat dianggap sebagai penyusutan. "Bahan jelek" ("*unsuitable material*") adalah bahan yang tidak cocok untuk timbunan.

Perhitungan dengan metoda manual sebagaimana diuraikan di atas dapat diselesaikan dengan cepat apabila dilakukan dengan komputer.

5.2. Penyusutan (*shrinkage*)

Apabila tanah digali dan ditempatkan pada timbunan, umumnya volume tanah tersebut membesar sebagai akibat penggemburan. Namun demikian, pada saat pembangunan timbunan, tanah dipadatkan sehingga volume akhir tanah akan lebih kecil daripada volume aslinya. Perbedaan volume tersebut dikenal sebagai "penyusutan". Dalam menentukan volume pekerjaan tanah, faktor tersebut harus diperhitungkan. Penyusutan sangat bervariasi, tergantung pada jenis tanah dan tinggi urugan. Untuk urugan yang tinggi, penyusutan dapat ditetapkan sekitar 10-15%; sedangkan untuk urugan yang rendah, dapat ditetapkan sekitar 20-25%. Untuk jenis tanah tertentu, penyusutan dapat mencapai 40-50%, yang umumnya mencakup kehilangan bahan pada tahap pengangkutan dan kehilangan bahan di sekitar tumit lereng.

Apabila batuan digali dan ditempatkan pada timbunan, maka tersebut akan menempati volume yang lebih besar. Fenomena tersebut, disebut "pemuaian" ("*swelling*") yang dapat mencapai 30% atau lebih. Apabila volume batuan kecil, maka pemuaian tidak begitu penting.

5.3. Diagram masa (*mass diagram*)

Diagram masa merupakan grafik yang memberikan gambaran tentang perkiraan volume galian dan timbunan serta tentang cara pengangkutan tanah. Pada grafik ditunjukkan pula lokasi titik-titik keseimbangan, arah pengangkutan dan volume tanah yang berasal dari lokasi pengambilan ke setiap lokasi, sebagaimana yang telah diilustrasikan pada Tabel 24 dan 25. Grafik tersebut sangat berguna dalam pengawasan pekerjaan tanah serta dalam penentuan "jarak-tambahan" (*overhaul*) dan distribusi tanah yang paling ekonomis.

Jarak-tambahan dapat didefinisikan sebagai jarak pengangkutan di luar jarak tertentu yang disebut "jarak-bebas" ("*free haul*"). Jarak tambahan biasanya berkisar antara 150 m (500 ft) sampai 900 m (3000 ft) atau lebih. Apabila tidak dicantumkan dalam spesifikasi, maka biaya pengangkutan pada jarak tambahan harus dimasukkan dalam biaya penggalian. Jarak tambahan dapat diperoleh dari "diagram masa", yaitu dengan mengukur jarak antara titik berat masa galian ke titik berat masa timbunan. Jarak tersebut dapat diukur dalam satuan stasiun, mil atau satuan jarak lainnya. Dengan demikian, suatu "yard kubik-stasiun" (atau "meter kubik-kilometer") adalah pengangkutan satu yard kubik (atau meter kubik) tanah galian sejauh satu stasiun di luar batas jarak-bebas, sedangkan suatu "yard kubik-mil" (atau meter kubik-kilometer) adalah pengangkutan satu yard kubik (atau meter kubik) tanah galian sejauh satu mil (atau kilometer) di luar batas jarak-bebas. Garis batas antara yard-stasiun (atau meter-stasiun) dengan yard-mil (atau meter-kilometer) dapat berbeda, sehingga perlu ditetapkan dalam spesifikasi; contoh, dalam spesifikasi ditetapkan bahwa pengangkutan tanah galian sampai $\frac{1}{2}$ mil di luar jarak-bebas harus diukur dalam yard-stasiun, sedangkan pengangkutan tanah galian pada jarak yang lebih $\frac{1}{2}$ mil di luar jarak-bebas harus diukur dalam yard-mil. Dengan demikian, apabila jarak-bebas adalah 1000 ft, maka garis batas antara yard-stasiun dengan yard-mil adalah 3640 ft (1 mil = 5280 ft). Penggunaan garis batas yang berbeda-beda untuk menentukan jumlah satuan yard kubik-stasiun (atau meter kubik stasiun) dan yard kubik-mil (atau meter kubik-kilometer) memungkinkan diperolehnya hasil yang lebih dalam penentuan volume bahan yang harus diangkut dalam jarak dekat dan bahan yang harus diangkut dalam jarak jauh. Demikian juga, perhitungan biaya dapat lebih tepat dibandingkan dengan perhitungan biaya yang hanya didasarkan satu jarak antara titik-titik berat masa tanah yang ditinjau.

Apabila pengangkutan tanah harus dilakukan dalam jarak jauh, kadang-kadang lebih ekonomis membuang tanah yang digali dari daerah milik jalan dan mengambil tanah dari

sumber lain di sekitar lokasi jalan. Jarak pengangkutan yang ekonomis dapat ditentukan dengan mempersamakan biaya penggalian ditambah biaya pengangkutan pada jarak-tambahan terhadap biaya penggalian di daerah milik jalan ditambah biaya penggalian di sumber bahan.

Apabila "h" adalah jarak pengangkutan di luar jarak-bebas (dalam satuan stasiun), "e" adalah biaya penggalian tanah, dan "o" adalah biaya pengangkutan pada jarak-tambahan, maka

$$\begin{array}{ll} E + ho = 2e \dots\dots\dots & 76 \\ h = \frac{e}{o} \text{ stasiun} \dots\dots\dots & 77 \end{array}$$

Contoh :

Apabila biaya penggalian tanah adalah Rp 3800 per yard kubik dan biaya pengangkutan pada jarak-tambahan adalah Rp 200 per yard kubik-stasiun, maka jarak pengangkutan yang paling ekonomis adalah,

$$h = \frac{3800}{200} \text{ stasiun} = 19 \text{ stasiun, atau } 1900 \text{ ft } (\sim 570 \text{ m})$$

Dengan anggapan bahwa jarak-bebas adalah 1000 ft (300 m), maka batas jarak pengangkutan yang paling ekonomis menjadi 1900 ft ditambah 1000 ft, atau 2900 ft (~870 m)

Kolom 5 sampai 10 pada Tabel 18 menunjukkan volume tanah yang dihitung berdasarkan luas-luas ujung, dengan memperhitungkan penyusutan. Pemotongan adalah seimbang dengan urugan dan perbedaannya disajikan pada Kolom 12; kelebihan pemotongan ditunjukkan dengan tanda "positif", sedangkan kelebihan urugan ditunjukkan dengan tanda "minus". Jumlah kumultaif pada kolom terakhir menunjukkan ordinat diagram masa.

Setelah ordinat masa dihitung, kemudian hasilnya diplot sehingga diperoleh diagram masa. Skala yang digunakan dapat dipilih sesuai dengan kepraktisan dan kebiasaan; misal, 1 inci sama dengan 500 ft untuk arah horiontal dan 1 inci sama dengan 500 yard kubik untuk arah vertikal. Dengan demikian, data pada Tabel 18 digunakan untuk membuat diagram masa sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 71.

Antara Stasiun 0+00 dan Stasiun 4+00, kurva pada Gambar 71 menunjukkan bahwa timbunan melebihi galian; antara Stasiun 4+00 dan Stasiun 6+60, galian lebih besar daripada timbunan. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa timbunan yang terletak antara Stasiun 0+00 dan Stasiun 4+00 dapat dibangun dengan galian antara Stasiun 4+00 dan Stasiun 6+60. Hal tersebut mengandung arti pula bahwa arah pengangkutan tanah adalah dari segmen antara Stasiun 4+00 dan Stasiun 6+60 ke sebelah kiri, yaitu antara Stasiun 0+00 dan Stasiun 4+00. Disamping itu, diagram menunjukkan pula bahwa antara Stasiun 0+00 dan Stasiun 6+60 terjadi keseimbangan antara galian dan timbunan (Stasiun 6+60 merupakan titik keseimbangan).

Berdasarkan hal di atas, titik keseimbangan dapat diartikan sebagai titik dimana volume galian seimbang dengan volume timbunan. Setiap garis yang ditarik sejajar dengan garis dasar dan memotong kurva yang sama pada dua titik juga akan menunjukan suatu keseimbangan antara dua titik tersebut.

Analisis lebih lanjut terhadap kurva menunjukkan titik keseimbangan lain pada Stasiun 45+34, 47+90 dan 62+00. Tanah galian dari daerah antara Stasiun 6+60 dan Stasiun 14+00 digunakan untuk timbunan antara Stasiun 14+00 dan Stasiun 45+34 dan arah pengangkutan

adalah ke kanan. Tanah timbunan antara Stasiun 45+34 dan Stasiun 47+99 berasal sumber bahan; tanah timbunan antara Stasiun 47+99 dan Stasiun 52+00 berasal galian antara Stasiun 52+00 dan Stasiun 62+00 dan arah pengangkutan adalah dari kanan ke kiri.

Apabila galian dan timbunan adalah seimbang untuk seluruh proyek, maka kurva diagram masa akan berakhir pada garis dasar (garis nol). Namun demikian, hal tersebut hampir tidak pernah terjadi.

Pada Gambar 71, terlihat bahwa ordinat masa pada akhir proyek adalah -1200 yard kubik, dimana untuk mengatasi kekurangan tersebut, tanah harus diambil dari sumber lain. Ordinat masa pada akhir proyek yang bernilai positif menunjukkan bahwa sebagian tanah galian harus dibuang.

Memperhatikan Gambar 71 terlihat bahwa titik keseimbangan antara Stasiun 0+00 dan Stasiun 6+60 terletak pada jarak 660 ft dari awal proyek. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak pengangkutan masih dalam jarak-bebas sehingga tidak perlu memperhitungkan jarak-tambahan. Hal lain yang ditunjukkan oleh diagram adalah, untuk galian yang volumenya 977 yard kubik dan ditempatkan pada timbunan tidak ada pembayaran untuk pengangkutan; sedangkan untuk galian yang volumenya 34 yard kubik ada biaya pengangkutan.

Keseimbangan lain terjadi antara Stasiun 6+60 dan Stasiun 45+34. Jarak-tambahan pengangkutan pada daerah tersebut dapat ditentukan dengan menggambar garis jarak-bebas (dalam hal ini adalah 1000 ft), sejajar dengan garis dasar sehingga-memotong kurva. Pada gambar ditunjukkan bahwa antara Stasiun 8+60 dan 45+34, garis jarak-bebas memotong kurva pada Stasiun 8+95 dan 18+95. Dengan demikian, semua galian dan timbunan di luar titik-titik tersebut diperhitungkan sebagai jarak tambahan. Dalam hal tersebut, titik keseimbangan terletak pada Stasiun 45+34, atau pada jarak 3874 ft (4534-660) dan Stasiun 6+6-. Jarak ini adalah lebih dari 3640 ft (garis batas antara yard-stasiun dengan yard-mil), sehingga terdapat jarak-tambahan dalam yard-stasiun dan dalam yard-mil. Satuan jarak-tambahan (dalam yard-stasiun atau yard-mil) ditentukan dengan cara menggambar garis batas (3640 ft) yang sejajar dengan garis dasar sehingga memotong kurva (terjadi pada Stasiun 7+12 dan 43+52). Berdasarkan garis tersebut, jarak pengangkutan pada daerah di atas garis batas dinyatakan dalam yard-stasiun, sedangkan pada daerah di bawah garis batas dinyatakan dalam yard-mil.

Perpotongan antara garis-jarak bebas 1000 ft dengan kurva pada Stasiun 8+95 dan 18+95 terjadi pada ordinat volume +890, sedangkan perpotongan garis batas 3640 ft pada Stasiun 7+12 dan 43+52 terjadi pada ordinat volume +210.

Jumlah-yard stasiun ditentukan dengan menggambar garis vertikal melalui ujung-ujung garis jarak-bebas (Stasiun 8+95 dan 18+95) sampai memotong garis batas. Pada diagram ditunjukkan bahwa ordinat volume adalah +210 sampai +870, yang mewakili 660 yard kubik tanah galian antara Stasiun 7+12 dan 8+95 dan harus ditempatkan pada timbunan antara Stasiun 18+95 dan 43+52. Selanjutnya, yard kubik stasiun diperoleh dengan mengalikan volume galian (dalam hal ini adalah 660 yard kubik) dengan jarak antara titik berat masa galian dan titik berat masa timbunan, kemudian dikurangi jarak bebas (1000 ft).

Jumlah yard kubik-mil ditentukan dengan menggambar garis vertikal melalui ujung-ujung garis-luas (Stasiun 7+12 dan 43+52) sampai memotong garis dasar. Garis vertikal tersebut mewakili ordinat volume dari 0 sampai +210. Dengan demikian, antara Stasiun 6+60 dan 7+12 terdapat 210 yard kubik tanah galian yang harus ditempatkan pada timbunan antara Stasiun 43+52 dan 45+34. Kemudian, jumlah yard-mil ditentukan dengan mengalikan volume tanah galian (210 yard kubik) dengan jarak antara titik berat masa galian dan titik berat masa timbunan, kemudian dikurangi jarak-bebas (1000 ft) dan dibagi 5280 (1 mil = 5280 ft).

Agar diagram masa dapat digunakan sebagaimana mestinya, beberapa karakteristik yang perlu diperhatikan adalah:

- 1) Bagian kurva yang menaik menunjukkan galian; sedangkan bagian kurva yang menurun menunjukkan timbunan. Apabila badan jalan terletak pada lereng, potongan sering menunjukkan galian dan timbunan. Pada kasus tersebut, kurva yang menaik menunjukkan bahwa galian lebih banyak daripada timbunan, sedangkan kurva yang menurun menunjukkan bahwa timbunan lebih banyak daripada galian.
- 2) Kurva dengan kemiringan terjal menunjukkan penggalian atau penimbunan yang besar, sedangkan kurva datar menunjukkan pekerjaan tanah yang kecil.
- 3) Titik dimana kemiringan kurva adalah nol menunjukkan bahwa pekerjaan tanah beralih dari galian ke timbunan atau sebaliknya. Stasiun titik-titik tersebut pada diagram masa tidak perlu sama dengan stasiun titik-titik peralihan pada profil; karena pada titik-titik peralihan pada profil mungkin terjadi kelebihan galian atau timbunan (terutama apabila dalam arah melintang, lereng tidak beraturan).
- 4) Perbedaan pada ordinat antara dua titik pada kurva menunjukkan bahwa galian lebih banyak daripada timbunan, atau sebaliknya.
- 5) Apabila garis horizontal memotong kurva pada dua titik, maka volume galian dan timbunan antara dua titik tersebut adalah seimbang (sama).

5.3.1. Penentuan titik berat masa galian dan timbunan

Terdapat tiga metoda untuk menentukan titik berat masa galian dan timbunan, yaitu:

- ♦ Metoda grafis
- ♦ Metoda momen, dan
- ♦ Metoda planimeter

5.3.1.1. Metoda grafis

Pada diagram terlihat bahwa ordinat volume dari +210 sampai +874 mewakili volume tanah sebanyak 660 kubik yard. Apabila garis antara ordinat dibagi dua dan kemudian melalui titik bagi tersebut (pada ordinat volume +330) ditarik garis horizontal sehingga memotong kurva antara Stasiun 7+12 dan 8+95 serta kurva antara Stasiun 18+95 dan 43+52, maka panjang garis antara titik-titik potong tersebut merupakan jarak rata-rata pengangkutan.

Metoda grafis cukup teliti apabila kurva volume mempunyai kemiringan yang seragam sebagaimana yang ditunjukkan pada bagian kurva antara Stasiun 7+12 dan 8+95; hal yang sebaliknya akan terjadi apabila letak titik berat masa adalah sebagaimana yang ditunjukkan dengan titik berat antara Stasiun 18+95 dan 43+52.

5.3.1.2. Metoda momen

Titik berat masa antara Stasiun 7+12 dan 8+95 dapat ditentukan dengan mengambil momen terhadap Stasiun 7+12. Setiap volume yang membentuk kurva volume antara Stasiun 7+12 dan 8+95 dihitung momennya; kemudian jumlah momen dibagi dengan jumlah volume sehingga diperoleh letak titik berat masa dari Stasiun 7+12. Berdasarkan Tabel 12.6 dan Gambar 12.11, data volume dan jarak adalah sebagai berikut:

STASIUN	VOLUME (yd ³)	JARAK (ft)
7+12 sampai 8+00	329	44,0
8+00 sampai 8+95	331	135,5
Total	660	-

Dengan mengambil momen terhadap Stasiun 7+12, letak titik berat masa antara Stasiun 7+12 dan 8+95 adalah,

$$TB = \frac{44 \times 329 + 135,5 \times 331}{66} = 90 \text{ ft}$$

Letak titik berat masa dari Stasiun 0+00 adalah $712 + 90 = 802 \text{ ft}$ atau pada Stasiun 8+02. Dengan cara yang sama, titik berat masa antara Stasiun 18+95 dan 43+52 adalah 804 ft dari Stasiun 18+95 atau pada Stasiun 26+99.

Berdasarkan titik berat masa galian pada Stasiun 8+02 dan titik berat masa timbunan pada Stasiun 26+99 (jaraknya adalah 1897 ft), maka dengan mengurangkan jarak bebas (1000 ft) akan diperoleh jarak-tambahan sejauh 897 ft atau $8,97$ stasiun. Dengan demikian, maka pengangkutan pada jarak tambahan adalah $660 \times 8,97 = 5920 \text{ yard kubik-stasiun}$.

Pengangkutan dalam satuan yard kubik-mil dapat ditentukan dengan cara yang sama seperti yang diuraikan di atas, kecuali satuan stasiun diganti dengan satuan mil. Untuk daerah di bawah garis batas, titik berat masa terletak pada Stasiun 6+85 dan 44+69, atau satu sama lain bejarak 3784 ft . Dengan demikian, maka:

$$\text{pengangkutan tambahan} = 210 \frac{(3784 - 1000)}{5280} = 111 \text{ yard kubik -mil}$$

5.3.1.3. Metoda planimeter

Penentuan titik berat masa dengan metoda planimeter dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Jarak ke titik berat masa} = \frac{\text{luas} \times \text{skala horizontal} \times \text{skala vertikal}}{\text{ordinat volume}} \dots\dots\dots 78$$

- Luas = hasil pengukuran dengan planimeter terhadap kurva volume
- Skala horizontal = skala horizontal diagram masa; pada contoh ini adalah jumlah stasiun per inci
- Skala vertikal = skala vertikal diagram masa; pada contoh ini jumlah yard kubik per inci
- Ordinat volume = ordinat vertikal antara garis dasar dengan garis batas; pada contoh ini adalah dalam yard kubik

Contoh

Untuk menentukan titik berat masa timbunan antara Stasiun 18+95 dan 43+53, daerah di bawah kurva yang terletak antara stasiun-stasiun tersebut dan garis batas diukur luasnya dengan planimeter (dalam contoh ini adalah 2122 in^2). Dengan menggunakan rumus di atas, jarak titik berat masa dari Stasiun 18+95 adalah:

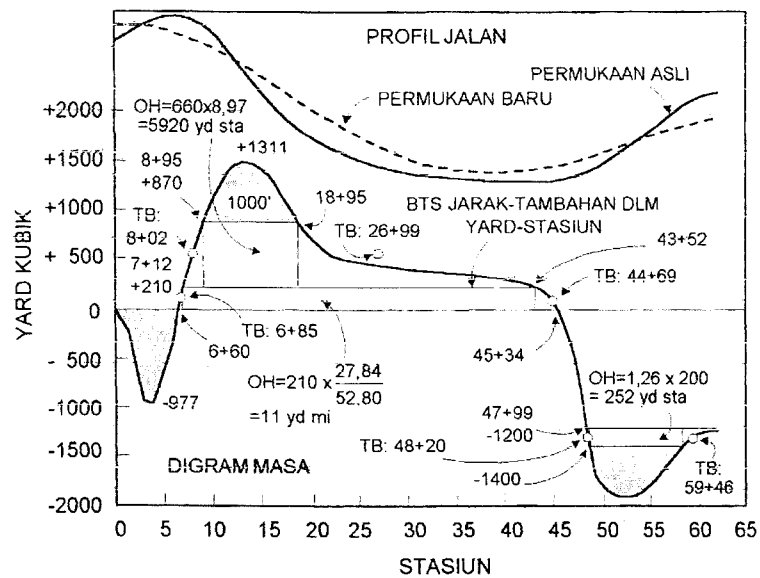
$$\text{Jarak ke titik berat masa} = \frac{2122 \times 5 \times 500}{660} = 8,04 \text{ sfasiun}$$

Dengan demikian maka titik berat masa tertetak pada Stasiun $(18+95 + 8+04) = 26+69$ (sama dengan yang dihitung dengan metoda momen).

5.3.2. Bahan tambahan (*borrow material*)

Ordinat volume antara Stasiun 45+34 dan 47+99 menunjukkan kekurangan bahan timbunan sebanyak 1200 yard kubik , yang harus dipenuhi dengan tanah yang baik dari sumber baban. Pada saat mengambil tanah galian dari sumbernya, jarak-tambahan pengangkutan

ditetapkan dari titik berat masa bahan tambahan (di sumber bahan) ke titik berat masa timbunan, dikurangi jarak bebas.



Gambar 72. Contoh diagram masa (Sumber: Ritter, 1960)

Tabel 18. Contoh lembar perhitungan volume galian dan timbunan
(Sumber: Ritter, 1960)

NO. LEMBAR:					KODE / NAMA PROYEK:								PETUGAS:					TGL:						
LUAS (ft ²)					VOLUME (yd ³)						VOL. SEIMB. *				PENGALIAN BATUAN	PENGALIAN TANAH	BAHAN SUMBER LAIN	URUGAN	PENYUSUTAN (10%)	KEHILANGAN	BAHAN BUANGAN	BHN SBR LAIN KHUSUS	JRK TAMB. (OVERHAUL)	JRK TAMB. BHN DR SBR LAIN
STASIUN	TOTAL POT.	URUGAN	KEHILANGAN	BH JELEK/BUANG	TOTAL	URUGAN	PENYUSUT. (10%)	50% KEHILANGAN	BAHAN JELEK	URUGAN + 7+8+9	PEMOTONGAN +	URUGAN -	ORDINAT MASA											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13											
0	4	16	4										0		1131	977	98	142	17					
1	0	76	6		7	170	17	9		196		189	-189											
2	0	122	8		0	367	37	13		417		417	-606											
3	6	46	4		11	311	31	11		353		342	-948											
4	46	12	4		96	107	11	7		125		29	-977											
5	126	0	6		319	22	2	9		33	286		-691											
6	120	0	6		456	0		11		11	445		-246											
7	108	0	6		422	0		11		11	411		+165											
8	100	0	6		385	0		11		11	374		+539											
9	92	0	6		356	0		11		11	345		+884											
10	68	4	6		296	7	1	11		19	277		+1161											
11	56	12	4		230	30	3	9		42	188		+1349											
12	42	20	0		181	59	6	4		69	112		+1461											
13	28	26			130	85	9			94	36		+1497											
14	32	26			111	96	10			106	5		+1502											
15	20	38		0	96	119	12			131		35	+1467											
16	38	42		20	107	148	15		37	200		93	+1374											
17	32	46		32	130	163	16		96	275		145	+1229											
18	44	52		44	141	181	18		141	340		199	+1030											
19	40	32		40	156	156	16		156	328		172	+858											
20	22	36		22	115	126	13		115	254		139	+719											
21	12	21		0	63	106	11		41	158		95	+624											
22	14	24			48	83	8			91		43	+581											
23	16	22			56	85	9			94		38	+543											
24	20	24			67	85	9			94		27	+516											
25	18	24			70	89	9			98		28	+488											
26	16	20	0		63	81	8			89		26	+462											

*Selisih antara Kolom 5 dengan Kolom 10

Tabel 18. Contoh lembar perhitungan volume galian dan timbunan (lanjutan)
(Sumber: Ritter, 1960)

NO. LEMBAR:					KODE / NAMA PROYEK:								PETUGAS:				TGL:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	LUAS (ft ²)				VOLUME (yd ³)							VOL. SEIMB.*			PENGALIAN BATUAN				PENGALIAN TANAH				BAHAN SUMBER LAIN				URUGAN				PENYUSUTAN (10%)				KEHILANGAN				BAHAN BUANGAN				BHN SBR LAIN KHUSUS				JRK TAMB. (OVERHAUL)				JRK TAMB. BHN DR SBR LAIN																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
STASIUN	TOTAL POT.	URUGAN	KEHILANGAN	BH JELEK/BUANG	TOTAL	URUGAN	PENYUSUT. (10%)	50% KEHILANGAN	BAHAN JELEK	URUGAN + 7+8+9	PEMOTONGAN +	URUGAN -	ORDINAT MASA		#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#

*Selisih antara Kolom 5 dengan Kolom 10

Tabel 18. Contoh lembar perhitungan volume galian dan timbunan (*lanjutan*)
(Sumber: Ritter, 1960)

NO. LEMBAR:					KODE / NAMA PROYEK:								PETUGAS:					TGL:						
	LUAS (ft ²)				VOLUME (yd ³)						VOL. SEIMB.*				PENGALIAN BATUAN	PENGALIAN TANAH	BAHAN SUMBER LAIN	URUGAN	PENYUSUTAN (10%)	KEHILANGAN	BAHAN BUANGAN	BHN SBR LAIN KHUSUS	JRK TAMB. (OVERHAUL)	JRK TAMB. BHN DR SBR LAIN
STASIUN	TOTAL POT.	URUGAN	KEHILANGAN	BH JELEK/BUANG	TOTAL	URUGAN	PENYUSUT. (10%)	50% KEHILANGAN	BAHAN JELEK	URUGAN + 7+8+9	PEMOTONGAN +	URUGAN -	ORDINAT MASA		#		#	#	#		#			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13											
48	4	172			22	574	57			631			-1204		TITIK KESEIMBANGAN									
49	18	77			41	461	46			507			-1670		1567		1422	141				2520 YARD KUBIK-STASIUN		
50	16	40			63	217	22			239			-1846											
51	18	16			6	104	10			114			-1897											
52	22	34			74	93	9			102			-1926											
53	34	8			104	78	8			86	18		-1907											
54	14	16			89	44	4			48	41		-1866											
55	46	8			111	44	4			48	63		-1803											
56	50	12			178	37	4			41	137		-1666											
57	40	14			167	48	5			53	114		-1552											
58	46	12			159	48	5			53	106		-1446											
59	42	12			163	44	4			48	115		-1331											
60	36	16			144	52	5			57	87		-1244											
61	27	21			117	69	7			76	41		-1203											
62	24	24			94	83	8			91	3		-1200											
															TITIK KESEIMBANGAN									
					7458																			

*Selisih antara Kolom 5 dengan Kolom 10