

Hary Christady Hardiyatmo

PERBAIKAN TANAH



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

Untuk:

*Ibu, ayah
Istri, anak-anak,
dan
bangsa dan negaraku Indonesia*

*Sebaik-baik orang adalah
yang paling bermanfaat bagi orang lain*

KATA PENGANTAR

Segala puji kehadiran Allah Swt. atas berkah, rahmat serta hidayah-Nya, buku *Perbaikan Tanah* ini dapat disusun.

Di Indonesia, banyak problem tanah sebagai pendukung bangunan berkapasitas dukung rendah dan mempunyai sifat mudah mampat yang berlebihan. Untuk kondisi tanah semacam ini, perlu perbaikan tanah dengan metode yang sesuai sehingga bangunan yang dibangun di atasnya aman dan ekonomis. Buku ini disusun dengan tujuan untuk membantu para praktisi, dosen, dan mahasiswa yang terlibat dalam permasalahan rekayasa geoteknik, khususnya masalah perbaikan tanah pada tanah yang berkapasitas dukung rendah tersebut.

Buku ini membahas berbagai cara untuk melakukan perbaikan tanah yang mencakup pemadatan, baik pemadatan di permukaan maupun pemadatan pada kedalaman tertentu di bawah permukaan tanah. Pemadatan dinamik dengan cara menjatuhkan beban kejut ke permukaan tanah juga dibahas dandilengkapi dengan cara perancangan. Perbaikan tanah dengan menggunakan kolom batuan dan kolom-kolom pendukung timbunan juga dibahas. Demikian pula, perbaikan tanah dengan cara pencampuran tanah pada kedalaman tertentu dengan menggunakan semen ataupun kapur juga dibahas beserta sifat-sifat campurannya. Perbaikan tanah dengan cara mengaplikasikan drainase vertikal PVD dan konsolidasi vakum juga dibahas. Selain itu, buku ini juga disertai dengan contoh-contoh cara menentukan tinggi timbunan total dengan memperhitungkan besarnya penurunan. Masalah perkuatan dinding galian dapat dipelajari pada bab pemakuan tanah dan angkur tanah. Perkuatan timbunan dengan geosintetik dibahas terutama ditujukan untuk perancangan timbunan dibangun pada tanah lunak. Dalam perancangan dan aplikasi perbaikan tanah, disajikan contoh-contoh lengkap cara hitung dan pembahasan dalam aplikasinya. Cara perbaikan tanah dan perancangan yang disajikan mengacu pada referensi-referensi proyek bangunan sipil yang telah dilakukan hingga saat ini.

Walaupun buku ini sudah diusahakan sebaik mungkin penyajiannya, penulis percaya masih banyak kekurangan yang harus diperbaiki untuk penerbitan selanjutnya. Untuk itu, kritik dan saran membangun dari para pembaca sangat diharapkan. Ucapan terima kasih ditujukan kepada semua

pihak yang telah berpartisipasi dalam penerbitan buku ini. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga ditujukan kepada istri, Dra. Isminarti Rusmiyati, dan anak-anakku, M. Kammagama Harismina, M.Psi., Egha Muhammad Harismina, S.T., dan Merlangen Enfani Harismina, S.Ars.

Yogyakarta, April 2020

Hary Christady Hardiyatmo

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL	xxviii
BAB I—TIPE-TIPE PERBAIKAN TANAH.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.1.1 Perbaikan secara Mekanis	1
1.1.2 Perbaikanscara Modifikasi Hidrolik	2
1.1.3 Perbaikan secara Fisik dan Kimia	2
1.1.4 Modifikasi dengan Penyisipan dan Pengekangan.....	2
1.2 Tanah yang Memerlukan Perbaikan	3
1.3 Pemilihan Tipe Perbaikan Tanah	3
1.4 Tanah Lunak dan Metode Perbaikannya.....	12
BAB II—PEMADATAN.....	14
2.1 Pendahuluan.....	14
2.2 Hubungan Berat Volume Kering dan Kadar Air.....	15
2.3 Pemadatan Permukaan.....	16
2.3.1 Uji Pemadatan di Laboratorium	16
2.3.2 Berat Volume Kering Maksimum dan Kadar Air Optimum.....	20
2.3.3 Faktor Penting dalam Uji Pemadatan di Laboratorium....	21
2.3.4 Tipe-Tipe Alat Pematat Di Lapangan	23
2.3.5 Kontrol Kepadatan Tanah Di Lapangan	25
2.3.6 Variabel dalam Pemadatan Tanah di Lapangan.....	29
2.3.7 Spesifikasi Pemadatan di Lapangan	31
2.3.6 Variabel dalam Pemadatan Tanah di Lapangan.....	29
2.4 Pemadatan Dalam (<i>Deep Compaction</i>)	32
2.4.1 Metode Pemadatan Getar (<i>Vibro-Compaction</i>).....	33
2.4.2 Pemadatan dengan <i>Vibroflotation</i>	33

2.4.2.1	Unit Penggetar	35
2.4.2.2	Proses Pemasatan	35
2.4.2.3	Kecocokan Jenis Tanah	36
2.4.3	Pemasatan dengan Batang Getar.....	38
2.4.3.1	Batang Getar	39
2.4.3.2	Kecocokan Jenis Tanah.....	39
2.4.3.3	Proses Pemasatan.	40
2.4.3.4	Jarak Pemasatan.	40
2.4.3.5	Frekuensi Getaran.....	41
2.4.3.6	Penetrasi Batang Getar dan Penarikan.....	42
2.4.3.7	Lamanya Pemasatan.....	42
2.4.3.8	Kedalaman Tanah yang Diperbaiki.....	42
2.4.3.9	Jarak Titik Pemasatan.....	43
2.4.3.10	Kontrol Kepadatan.....	46
2.5	Metode Pemindahan Getar (<i>Vibro-Replacement</i>).....	46
BAB III—PEMADATAN DINAMIK.....		47
3.1	Pendahuluan.....	47
3.2	Cara Kerja.....	47
3.3	Perlengkapan	48
3.4	Tanah yang Cocok untuk Pemasatan Dinamik.....	49
3.5	Pemasatan Dinamik pada Tanah Granuler	50
3.6	Pemasatan Dinamik pada Tanah Kohesif	51
3.7	Berat Pemukul.	52
3.8	Kedalaman Tanah Dipadatkan.....	52
3.9	Energi Dibutuhkan.....	54
3.10	Jarak Pemasatan dan Jumlah Pukulan.....	56
3.11	Susunan Titik Pemasatan.....	57
3.12	Area Pemasatan.....	58
3.13	Pemasatan Bertahap	58
3.13.1	Istilah Fase (<i>Phase</i>) dan Lintasan(<i>Pass</i>).....	58
3.14	Derajat Kepadatan yang Dapat Dicapai.....	59
3.15	Prosedur Perancangan.....	60
3.16	Keuntungan dan Kerugian.	65
BAB IV—KOLOM BATUAN.		71
4.1	Pendahuluan.....	71
4.2	Kecocokan Jenis Tanah	71
4.2.1	Kolom Batuan pada Tanah Gambut.	72
4.2.2	Kolom Batuan pada Lanau dan Lempung Sensitif	72
4.3	Diameter dan Susunan Kolom Batuan	73

4.4	Kedalaman Efektif	73
4.5	Pembuatan Kolom Batuan	73
4.5.1	Metode Basah	75
4.5.2	Metode Kering	75
4.6	Pelaksanaan Pembuatan Kolom Batuan	75
4.6.1	Landasan Kerja	77
4.7	Mekanisme Keruntuhan.....	77
4.7.1	Kolom Batuan Tunggal	77
4.7.2	Kelompok Kolom Batuan.....	79
4.8	Perancangan Kolom Batuan	80
4.8.1	Pembebanan pada Kolom Batuan	80
4.8.2	Metode Analisis	81
4.8.3	Kapasitas Dukung UltimitKolom Batuan Tunggal	88
4.8.4	Kapasitas Dukung UltimitKelompok Kolom Batuan	91
4.8.5	Kegagalan Lokal Kolom Batuan	93
4.8.6	Kegagalan Dukungan Lateral dalam Tanah Kohesif.....	95
4.8.7	Penurunan.....	101
4.8.8	Kecepatan Konsolidasi	104
4.8.9	Analisis Stabilitas Lereng	108
BAB V—KOLOM PENDUKUNG TIMBUNAN.....		110
5.1	Pendahuluan	110
5.2	Sruktur Kolom Pendukung Timbunan	111
5.3	Pertimbangan dalam Perancangan	112
5.4	Metode Perancangan	113
5.4.1	Prosedur Perancangan	114
5.4.2	Perancangan Kolom	115
5.4.3	Landasan Kerja untuk Transfer Beban	118
5.4.3.1	Metode Standar Inggris	121
5.4.3.2	Metode Swedia	122
5.4.3.3	Metode Pendekatan Balok	123
5.4.3.4	Perancangan Tulangan Geosintetik	125
5.5	Pengaruh Kekakuan Kolom dan Konsolidasi	126
5.5.1	Pengaruh Kekakuan Kolom	126
5.5.2	Pengaruh Konsolidasi	126
BAB VI PENCAMPURAN TANAH DALAM		127
6.1	Pendahuluan	127
6.2	Keuntungan Penggunaan Kolom-Kolom <i>DSM</i>	128
6.3	Susunan Kolom.....	128
6.4	Metode Pencampuran Tanah	129

6.4.1	Metode Kering.....	131
6.4.2	Metode Basah	132
6.5	Tahap-Tahap Pelaksanaan	132
6.6	Kadar Bahan Pengikat	134
6.6.1	Kapur	134
6.6.2	Kapur/Semen	134
6.6.3	Semen	134
6.6.4	Faktor Air Semen	135
6.7	Sifat-Sifat Campuran	135
6.7.1	Kekuatan.....	135
6.7.2	Modulus Elatis	136
6.7.3	Modulus Kompresi Kolom (M_c).....	136
6.7.4	Nilai pH Air Tanah.....	137
6.7.5	Sifat-Sifat Tanah Setelah Pencampuran	137
6.7.6	Pengaruh Faktor Air Semen	138
6.7.7	Waktu Perawatan (<i>Curing Time</i>)	139
6.7.8	Kenaikan Kuat Geser terhadap Waktu	139
6.7.9	Perbedaan Karakteristik Campuran Diuji di Laboratorium dan Lapangan	141
6.8	Pertimbangan dalam Perancangan	140
6.8.1	Kuat Geser Rata-Rata.....	140
6.8.2	Faktor Tegangan m_c	141
6.8.3	Perpindahan Lateral Kolom Tunggal	141
6.8.4	Stabilitas Kelompok Kolom	143
6.8.5	Kegagalan Blok.....	143
6.8.6	Kapasitas Dukung Blok Tanah-Kolom	144
6.8.7	Penurunan Kolom Tunggal dan Kelompok.....	146
6.8.7.1	Pertimbangan dalam Hitungan Penurunan	146
6.8.7.2	Distribusi Tegangan	147
6.8.7.3	Penurunan Kelompok Kolom	147
6.8.7.4	Penurunan Material Komposit Tanah-Kolom	148
6.9	Perancangan	151
BAB VII DRAINASE VERTIKAL		154
7.1	Pendahuluan.....	154
7.2	Cara Kerja Drainase Vertikal	155
7.3	Tipe-Tipe Drainase Vertikal	157
7.3.1	Drainase Pasir Vertikal	157
7.3.2	Drainase Vertikal Pracetak	158
7.4	Teori Drainase Vertikal	159

7.4.1	Kasus Regangan-Sama dan Tanpa Gangguan (<i>Smear</i>) ...	161
7.4.2	Diameter Pengaruh Drainase Vertikal	163
7.4.3	Perancangan PVD dengan Menggunakan Grafik.....	164
7.4.4	Pengaruh Gangguan Tanah	165
7.4.5	Diameter Ekuivalen	175
7.4.6	Penentuan Waktu Penurunan	182
7.5	Persyaratan PVD	183
7.5.1	Bahan	183
7.5.2	Kuat Tarik	183
7.5.3	Filter	184
7.5.4	Kapasitas Debit (q_w)	184
7.6	Selimut Drainase (<i>Drainage Blanket</i>)	185
7.7	Prosedur Pemasangan Drainase Vertikal	187
7.8	Jarak <i>PVD</i>	193
7.9	Lebar Pemasangan Drainase Vertikal	193
7.10	Pengaruh Lensa-Lensa Tanah Lolos Air	194
7.11	Gangguan Saat Pemasangan	195
7.12	Pemilihan Kuat Tarik dan Kapasitas Drainase	195
7.13	Penimbunan Bertahap	195
7.14	Drainase Vertikal dengan Prapemampatan	196
7.15	Alat-Alat Pemantau Gerakan Tanah	203
7.16	Cara Menentukan Tinggi Timbunan dengan PVD	205
7.16.1	Distribusi Tegangan Akibat Beban Timbunan.....	206
7.16.2	Penurunan Timbunan	208
7.16.3	Hitungan Penurunan Konsolidasi.....	209
BAB VIII PRAPEMBEBANAN VAKUM		219
8.1	Pendahuluan	219
8.2	Pra Pembebanan Vakum (<i>Vacuum Preloading</i>).....	220
8.2.1	Sistem Konsolidasi Vakum	220
8.2.2	Sistem Drainase Permukaan	221
8.2.3	Cara Mengisolasi Area Vakum	222
8.2.4	Sistem Pompa Vakum	222
8.3	Mekanisme <i>Vacuum Preloading</i>	222
8.4	Perbedaan Metode Vakum dengan PVD Konvensional	223
8.5	Teori Konsolidasi Vakum	226
8.6	Perancangan PVD dengan <i>Vacuum Preloading</i>	230
8.7	Efektivitas <i>Vacuum Preloading</i>	239
8.8	Gerakan Lateral Tanah	241
8.9	Pengaruh Pengotoran dan Gangguan Sumur	242

8.9.1	Pengaruh Pengotoran (<i>Smear</i>)	242
8.9.2	Pengaruh Tahanan Sumur (<i>Well Resistance</i>)	243
8.11	Aplikasi.....	243
BAB IX PEMAKUAN TANAH		244
9.1	Pendahuluan	244
9.2	Kecocokan Kondisi Lokasi.....	245
9.3	Jenis Tanah.....	245
9.3.1	Jenis Tanah yang Cocok	245
9.3.2	Jenis Tanah yang Tidak Cocok	246
9.4	Keterbatasan Penggunaan	247
9.5	Keuntungan dan Kerugian	248
9.6	Tahap-Tahap Pelaksanaan	248
9.7	Bagian-Bagian Paku Tanah	251
9.7.1	Kepala Paku (<i>Nail Head</i>)	251
9.7.2	Batang Paku (<i>Nail Bar</i>)	251
9.7.3	Pengisi (<i>Grout</i>)	252
9.7.4	Permukaan Dinding (<i>Wall Facing</i>)	253
9.7.5	Perlengkapan Lain	253
9.8	Pemantauan Gerakan Dinding	254
9.9	Mekanisme Transfer Beban	255
9.10	Perancangan.....	257
9.10.1	Kedudukan Batas Kekuatan (<i>Strength Limit State</i>).....	257
9.10.2	Kedudukan Batas Pelayanan (<i>Service Limit State</i>).....	257
9.11	Kegagalan Eksternal	257
9.11.1	Stabilitas Global	258
9.11.2	Kegagalan Akibat Penggeseran.....	261
9.11.3	Kegagalan Kapasitas Dukung Tanah	267
9.12	Kegagalan Internal.....	269
9.12.1	Gaya Tarik Maksimum pada Paku	270
9.12.2	Kegagalan Cabut Paku	271
9.12.3	Kegagalan Tarik Paku	274
9.12.4	Gaya Tarik pada Permukaan Dinding	276
9.12.5	Model Kegagalan Permukaan Dinding	277
9.12.5.1	Kegagalan Lentur.....	277
9.12.5.2	Kegagalan Geser Pons (<i>Punching Shear</i>)	278
9.12.5.3	Kegagalan Tarik <i>Headed-Stud</i>	279
9.13	Faktor Aman	279
9.15	Pertimbangan dalam Perancangan	279
9.16	Perancangan dengan Program Komputer	283

9.17 Perancangan dengan Grafik.....	283
BAB X—ANGKUR TANAH	296
10.1 Pendahuluan.....	296
10.2 Kedalaman Maksimum Galian.....	296
10.3 Tipe-Tipe Sistem Tanah Diangkur.....	297
10.4 Tahap-Tahap Penggalian.....	298
10.5 Keuntungan dan Kerugian.....	302
10.6 Angkur	303
10.6.1 Tipe-Tipe Angkur	303
10.6.2 Bagian-Bagian Angkur.....	305
10.6.3 Kedalaman Angkur	307
10.6.4 Jarak Angkur	307
10.6.5 Panjang Bebas (<i>Free Length</i>) dan Panjang Ikut (<i>Bond Length</i>)	308
10.6.6 Angkur Sementara dan Permanen	309
10.7 Perancangan Angkur.....	311
10.7.1 Konsep Dasar	311
10.7.2 Tipe-Tipe Kegagalan.....	311
10.7.3 Lokasi Bidang Longsor Potensial Kritis	315
10.8 Tekanan Tanah Lateral pada Dinding	316
10.8.1 Diagram Tekanan Tanah Lateral	316
10.8.2 Galian pada Pasir.....	318
10.8.3 Galian pada Lempung Kaku Sampai Keras Retak-Retak	319
10.8.4 Galian pada Lempung Lunak Sampai Sedang	320
10.8.5 Pengaruh Beban Terbagi Rata.....	323
10.8.6 Pengaruh Tekanan Air	323
10.8.7 Berat Volume Tanah Rata-Rata.....	324
10.8.8 Gaya pada Angkur	324
10.8.9 Tahanan Tanah Pasif di Depan Dasar Galian	326
10.8.9.1 Metode Broms.....	327
10.8.9.2 Metode Wang dan Reese	328
10.9 Hitungan Perancangan.....	334
10.9.1 Gaya-Gaya pada Balok <i>Soldier</i>	334
10.9.2 Tahanan Angkur Paling Atas Terhadap Beban Saat Pengujian Angkur	336
10.9.3 Perancangan <i>Lagging</i>	340
10.9.4 Perancangan Wales dan Permukaan Permanen	340
10.9.5 Kapasitas Cabut Angkur.....	343
10.9.5.1 Kapasitas Cabut Angkur dalam Tanah	343

10.9.5.2	Kapasitas Cabut Angkur dalam Batuan	346
10.9.5.3	Tahanan Angkur Teratas terhadap Beban Uji Angkur.....	348
10.9.6	Faktor Aman Angkur	348
10.9.7	Beban Rancangan Maksimum.....	349
10.9.8	Pemilihan Baja Tendon.....	350
10.9.9	Panjang Angkur di Zona Panjang Ikat	351
10.9.10	Uji Angkur	361
10.9.10.1	Uji Kinerja (<i>Performance Test</i>)	362
10.9.10.2	Uji Pembuktian (<i>Proof Test/Acceptance Test</i>) ..	366
10.9.10.3	Uji Rayapan Diperpanjang (<i>Extended Creep Testing</i>).....	367
10.9.10.4	Beban Pengunci (<i>Lock-OffLoad</i>)	368
10.9.10.5	Uji Angkat (<i>Lift-Off Test</i>)	368
10.9.10.6	Kriteria Penerimaan	369
10.9.10.7	Panjang Bebas Tampak.....	369
10.9.11	Uji Beban untuk Praperancangan	371
10.10	Pelaksanaan.....	371
10.10.1	Pembuatan Lubang Untuk Angkur	371
10.10.2	Pemasangan Tendon.....	372
10.10.3	Pengisian (<i>Grouting</i>)	372
10.10.4	Penegangan (<i>Stressing</i>)	372
10.10.5	Dinding Permukaan Permanen.....	372
BAB XI	—PERKUATAN TIMBUNAN DENGAN EOSINTETIK.	374
11.1	Pendahuluan	374
11.2	Macam-Macam Geosintetik	374
11.3	Fungsi Geosinteti.....	378
11.3.1	Geosintetik Untuk Filter	379
11.3.1.1	Filter Geotekstil	380
11.3.1.2	Kriteria Perancangan Geotekstil Sebagai Filter	381
11.3.1.3	Kriteria Penahan Tanah (<i>Soil Retention Criterion</i>)	382
11.3.2	Geosintetik Untuk Pemisah (Separator)	383
11.3.2.1	Syarat-Syarat Geotekstil Sebagai Pemisah.....	384
11.3.3	Geosintetik Untuk Perkuatan Tanah	386
11.3.3.1	Model Kegagalan Timbunan.....	388
11.3.3.2	Stabilitas Timbunan	389
11.3.3.3	Hitungan Kuat Tarik Geosisntetik	390

11.3.3.4	Sifat-Sifat Ketahanan Geosintetik	393
11.3.3.5	Kuat Tarik Izin Geosintetik.	393
11.3.4	Perkuatan Lereng Landai	398
11.3.4.1	Perancangan	399
11.3.4.2	Kuat Tarik Jangka Panjang Geosintetik	404
11.3.5.3	Perkuatan Lereng terjal	405
BAB XII	—SISTEM CAKAR AYAM MODIFIKASI	406
12.1	Pendahuluan	406
12.2	Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM).....	406
12.3	Konsep Dasar.....	408
12.4	Aplikasi Sistem CAM untuk Perkerasan	409
12.5	Perancangan.....	412
12.5.1	Metode Bambang Suhendro	412
12.5.2	Metode Hary Christady Hardiyatmo.	414
12.5.3	Faktor Beban	415
12.6	Tipe-tipe Tanah asar.....	421
12.7	Modulus Reaksi Tanah-dasar Efektif.....	426
12.8	Perancangan Tulangan Pelat SistemCAM.....	427
DAFTAR PUSTAKA	437
DAFTAR KONVERSI	448
TENTANG PENULIS	452