

**PENGARUH PEMADATAN TANAH TERHADAP
KARAKTERISTIK TANAH**

(KARYA ILMIAH)

Oleh

**Ir. Kanvaluddin Lubis
Staf Pengajar jurusan sipil.**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2007**

iah

07

/ 200

**PENGARUH PEMADATAN TANAH
TERHADAP KARATERISTIK TANAH**

KARYA ILMIAH

Oleh:

Ir.Kamaluddin Lubis.

Staf Pengajar Jurusan Sipil



**JURUSAN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2007**

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karuniaNya-lah sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan buku ilmiah ini. Pemanfaatan tanah dalam bidang rekayasa teknik sipil sangat penting sejalan dengan kemajuan dibidang konstruksi yang menuntut penggunaan tanah sebagai tempat didirikannya bangunan gedung ataupun bangunan lainnya.

Pemadatan tanah dilapangan adalah salah satu upaya dilakukan dalam perbaikan sifat dan kekuatan tanah, suatu tanah yang dipadatkan dengan kadar air yang tinggi belum tentu dapat dipadatkan sepenuhnya ,namun begitu juga tanah yang mempunyai kadar air yang sedikit belum tentu dipadatkan akan mendapat hasil yang benar padat dalam lingkup mekanika tanah hal ini justru sangat ditentukan oleh kadar *air optimum* tanah yang bersangkutan.

Buku ini membahas tentang sifat-sifat tanah didalam pemadatan tanah, harapan penulis semoga buku dapat memberikan pemikiran yang luas dalam membidangi ilmu mekanika tanah. Terutama bidang rekayasa teknik sipil,semoga.

Medan, Desember 2007
Peneliti,

Ir.Kamaluddin Lubis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
BAB I SISTEM PEMADATAN TANAH LAPANGAN.....	1
1.1 Umum.....	1
BAB II SIFAT-SIFAT DAN KARATERISTIK TANAH.....	4
2.1 Pengaruh Pemadatan Terhadap Parameter Tanah	4
2.2 Pengaruh Pemadatan Terhadap Berat Isi Tanah.....	7
2.3 Pengaruh Pemadatan Terhadap Angka Pori Tanah	10
2.4 Pengaruh Pemadatan Terhadap Kohesi Dan Sudut Geser Tanah....	13
2.5 Pengaruh Pemadatan Terhadap Volume Tanah	16
2.6 Pengaruh Kadar Air Terhadap Pemadatan	18
2.6.1 Variasi Kadar Air Terhadap Karakteristik Tanah	18
2.6.2 Hubungan Kadar Air Optimum Dan Berat Isi Kering.....	24
BAB.III KARATERISTIK PEMADATAN BERDASARKAN JENIS TANAH.....	27
3.1. Pengaruh Spesifikasi Tanah Terhadap Pemadatan	29
3.1.1 Faktor Kohesi Tanah	29
3.1.1.1 Pemadatan Pada Tanah Kohesif	30
3.1.1.2. Pemadatan pada Tanah Non-Kohesif	35
3.1.2 Tinjauan Terhadap Gradasi Tanah	37

3.1.2.1 Bentuk Dan Gradasi Butir Tanah	37
3.2. Spesifikasi Peralatan Terhadap Metode Dan Hasil Uji	41
3.2.1 Metode Pemadatan	42
3.2.2 Metode Pemadatan Laboratorium	43
3.2.3 Uji Pemadatan Standart (Standart Compaction Test).....	44
3.2.4. Uji Pemadatan Modifait (Modifiet Compaction Test)	47
3.2.5. Metode Pemadatan Lapangan.....	50
3.3. Alat-Alat Yang Digunakan Untuk Pemadatan	54
3.3.1 Penggilas Besi Berpermukaan Halus (Plain Wheel Roller)	54
3.3.2 Penggilas Dengan Permukaan Bergigi-Gigi (Tamping Roller)..	58
3.3.3. Penggilas Ban Karet (Pneumatic).....	63
3.3.4 Vibrating Roller	68
3 4 Kontrol Hasil Pemadatan Lapangan	72
3.4.11 Korelasi Hasil Uji Pemadatan Dilapangan Terhadap Hasil Uji Pemadatan Di Laboratorium	74
3.4.2 Energy Yang Dibutuhkan Untuk Pemadatan	78
3.4.3 Pemilihan Peralatan Pemadatan	85
BAB IV APLIKASI PEMADATAN TERHADAP SIFAT DAN KARATERISTIK TANAH	87
4.1 Pemadatan Pada Tanah Non-Kohesif.....	87
4.2 pemadatan Pada Tanah Kohesif	92
BAB.V. PENUTUP	93

BAB.I

SISTEM PEMADATAN TANAH LAPANGAN

I.1. Umum.

Pemanfaatan tanah dalam bidang teknik sipil sangat penting sejalan dengan kemajuan dibidang konstruksi yang menuntut penggunaan tanah baik sebagai tempat didirikannya suatu konstruksi. Dalam hal ini tidak jarang tanah digunakan harus melalui suatu proses pekerjaan untuk mendapatkan kondisi yang ideal sebagaimana yang diharapkan dalam perencanaan. Pemadatan tanah merupakan salah satu pekerjaan awal yang sering dan harus dilakukan untuk membuat tanah lebih stabil terhadap gaya-gaya yang bekerja diatas permukaan tanah tersebut. Jadi jelaslah bahwa hasil kerja pemadatan ini selanjutnya akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah dan perkiraan terhadap besarnya penurunan yang mungkin terjadi.

Pemadatan tanah akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik .suatu segmen tanah dilapangan yang masih dalam kondisi alamiah akan mempunyai karakteristik yang berbeda apabila pada segmen tanah tersebut dilakukan proses pemadatan. Proses pemadatan akan mengubah beberapa dari parameter-parameter tanah ,seperti berat isi, angka pori , sudut geser tanah dalam tanah dan parameter-parameter tanah lainnya, perubahan ini akan

mementukan perilaku tanah terhadap proses pembebanan dan pelaksanaan selanjutnya, yang diharapkan perilaku tersebut masih dalam kondisi yang ideal.

Untuk mendapatkan karakteristik tanah yang diharapkan melalui proses pemadatan, masih ditentukan oleh metode pemadatan yang digunakan. Pada saat ini sejalan dengan kemajuan dibidang teknologi konstruksi. Metode pemadatanpun terus berkembang baik pemadatan secara manual maupun pemadatan secara dinamis. Pada kondisi tertentu identifikasi lapangan masih harus dilakukan sebelum penentuan metode pemadatan di lapangan dilakukan. Jadi jelaslah bahwa tanah mempunyai sifat dan karakteristik yang sangat komplek atau beragam sehingga menuntut perencana untuk mengadakan suatu studi yang akurat pada proses selanjutnya.

Tanah dilapangan tidak semuanya dalam kondisi yang ideal terhadap pembebanan .pembebanan yang dimaksud adalah apabila pada suatu permukaan tanah direncanakan untuk didirikan sebuah konstruksi yang mempunyai beban tambahan dan memerlukan perkiraan terhadap stabilitas tanah, khususnya daya dukung tanah. Untuk kondisi tertentu dimana lapisan atas permukaan tanah harus diganti dengan material tanah yang lain yang memenuhi persyaratan dan kriteria tertentu. Untuk tujuan tanah tertentu tanah dimana kondisi di lapangan tidaklah selalu homogen sehingga pemilihan metode pemadatan sangat memerlukan hasil pemadatan tanah.

Metode pemadatan yang dimaksud adalah merupakan tinjauan terhadap hasil uji diharapkan dapat memberikan perkiraan terhadap sifat-sifat tanah dan perubahan karakteristik lapisan tanah setelah pemadatan.

Tanah memiliki sifat pencapaian kepadatan tertinggi kalau diberikan usaha pemadatan pada kadar air tertentu dan sebaiknya kalau kadar airnya berlebih usaha pematannya tidak mencapai sasaran yang dicapai. Maka untuk itu diperlukan suatu perkiraan kadar air optimum dimana berat isi kering maksimum dapat diperoleh. Berat isi kering ini nantinya dipergunakan untuk memperkirakan kekuatan tanah. Dimana pada berat isi kering yang maksimum akan kepadatan tanahnya semakin baik.

BAB.II **SIFAT-SIFAT DAN KARATERISTIK TANAH**

1.2. Pengaruh pemadatan terhadap perubahan nilai parameter tanah.

Pemadatan adalah usaha sebanyak mungkin mengeluarkan air dari celah-celah diantara butiran-butiran bahan tanah, agar didapatkan tingkat kerapatan serta letak butiran diantara butiran butiran bahan tanah. Semaksimal mungkin. Pemadatan merupakan suatu proses merapatkan tanah partikel-partikel tanah dengan cara mengurangi pori-pori udaranya untuk memperbaiki sifat-sifat teknis dan massa tanah.

Untuk mengetahui apakah suatu proses pemadatan cocok untuk dilakukan dan perlu diketahui:

- Keadaan asli dan kepadatan tanah
- Pemadatan maksimum yang mungkin dilakukan
- Proporsi pemadatan maksimum yang dapat diperoleh dilapangan .

Secara umum pemadatan akan mempengaruhi beberapa karakteristik tanah seperti berat isi, angka pori, nilai sudut geser dalam dan volume tanah. Sedangkan nilai kepadatan maksimum yang mungkin terjadi dicapai masih dipengaruhi oleh beberapa kriteria antara lain kadar air dan bentuk gradasi

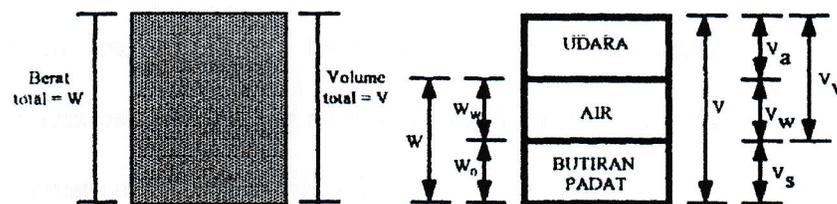
bahan tanah. Tanah yang mempunyai kadar air yang rendah, tidak mungkin dilakukan penggunaannya pori-pori udara sebanyak mungkin karena itu tidak tersedianya cukup air yang dapat berfungsi sebagai pelumas guna mendekatkan butiran-butiran tanah tersebut untuk berdatang bersatu maka berat isi keringnya rendah.

Dari kedua nilai ekstrim tersebut terdapat suatu kadar air dimana berat isi keringnya akan mencapai maksimum yaitu pada kadar air optimum. Maka untuk mempertinggi nilai berat isi kering, diusahakan dengan memperbesar usaha pemadatan yang akan mempunyai pengaruh terhadap berkurangnya nilai kadar air optimum.

2.2 Pengaruh Pemadatan Terhadap Berat isi Tanah (γ)

Pemadatan akan mempengaruhi besarnya nilai berat isi tanah. Suatu segmen tanah yang diambil dari suatu lokasi akan mempunyai nilai berat isi yang berbeda apabila material tersebut dipadatkan. Biasanya nilai berat isi awal pada waktu material tersebut diambil (digali) akan lebih besar dan pada berat isi setelah digunakan sebagai timbunan walaupun telah dilakukan pemadatan.

Berat isi tanah didefinisikan sebagai perbandingan antara berat tanah dan volume tanah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Segmen tanah dalam keadaan asli

Sumber : Mekanika Tanah, Braja M. Das, Erlangga, Jakarta, 1991, Hal 30.

Jadi :

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots(2.1)$$

Berat isi dapat juga dinyatakan dalam berat isi butiran padat, kadar air dan volume total:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = W_s \left(\frac{1 + \left(\frac{W_w}{W_s} \right)}{V} \right) = W_s \frac{(1+W)}{V} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

W = kadar air = $\frac{W_w}{W_s}$

Sumber : Mekanika tanah, Braja M.Das, Erlangga, Jakarta, 1991, Hal. 31.

Dalam analisa tanah, termasuk dalam analisa pemadatan tanah selalu diperlukan data berat isi kering (*dry unit weight*) γ_d yang didefinisikan sebagai berat isi kering persatuan volume tanah yaitu :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \dots\dots\dots(2.3)$$

Telah diketahui pula bahwa suatu segmen tanah yang masih dalam keadaan asli dapat terdiri dari butiran tanah, air dan pori-pori tanah. Jadi suatu segmen tanah yang dipadatkan akan mengalami pengecilan pori-pori tanah artinya volume tanah secara

keseluruhan akan berkurang tetapi akan mempunyai berat isi yang tetap, kecuali diadakan penambahan kembali sampai mencapai volume yang sama dan dilakukan pemadatan kembali maka berat isi tanah tersebut akan bertambah. Jadi dapat disimpulkan bahwa volume tanah dan angka pori tanah merupakan faktor penentu dalam analisa berat isi tanah.

Selain faktor-faktor di atas berat isi tanah masih ditentukan oleh jenis-jenis tanah, dimana setiap jenis tanah mempunyai berat isi yang berbeda baik tanah tersebut dalam kondisi lepas maupun dalam kondisi padat seperti yang ditunjukkan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1. Nilai berat isi tanah untuk beberapa jenis tanah

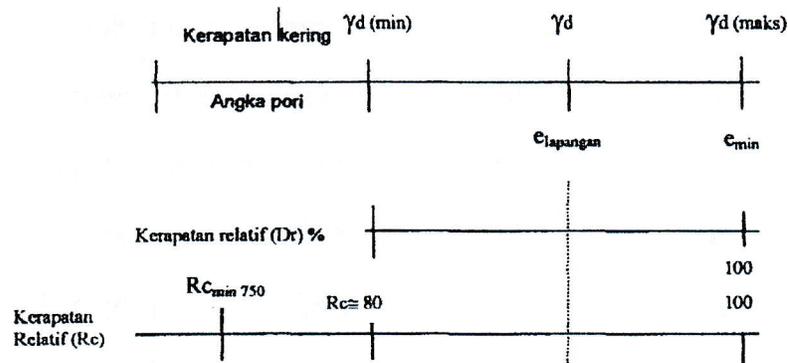
Jenis tanah	Berat isi kering	
	Lepas	Padat
Kerikil	16.0-18.0	18.0-20.0
Pasir kasar	15.0-17.5	17.5-19.6
Pasir berlempung	14.0-16.5	16.5-18.5
Pasir berlanau	12.6-15.5	15.5-17.5
Pasir halus	14.0-18.5	15.5-18.0
Kerikil berpasir	15.0-18.0	18.0-22.0
Pasir berkerikil	15.0-18.0	18.0-22.5
Lanau	14.0-15.5	15.5-17.5

Sumber : Sifat-sifat dan Fisis Geoteksis Tanah, Joseph E. Bowles, Erlangga, Jakarta, 1991, hal. 144.

Tabel 2.1. membuktikan bahwa tanah yang dipadatkan akan mengalami peningkatan berat isi, terlebih-lebih apabila tanah yang sebelum dipadatkan masih dalam kondisi lepas.

Secara teknis berat isi kering yang paling besar menunjukkan bahwa tingkat kepadatannya juga besar, jadi semakin besar berat isi kering suatu segmen tanah akan

semakin besar tingkat kepadatannya dan semakin kecil angka pori yang dimiliki segmen tanah tersebut, seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2.2. yang menjelaskan hubungan antara tingkat kepadatan dan nilai berat isi kering suatu segmen tanah.



Gambar 2.2 Hubungan antara tingkat kepadatan dengan berat isi kering
 Sumber : Sifat-sifat dan Fisis Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Erlangga, Jakarta, 1991,hal 224

2.3 Pengaruh Pemadatan Terhadap Angka Pori Tanah

Tanah yang dipadatkan akan mengalami pengurangan angka pori tanah, dengan mengacu pada gambar 2.1 angka pori tanah didefinisikan sebagai perbandingan volume Pori dengan volume butiran padat yaitu:

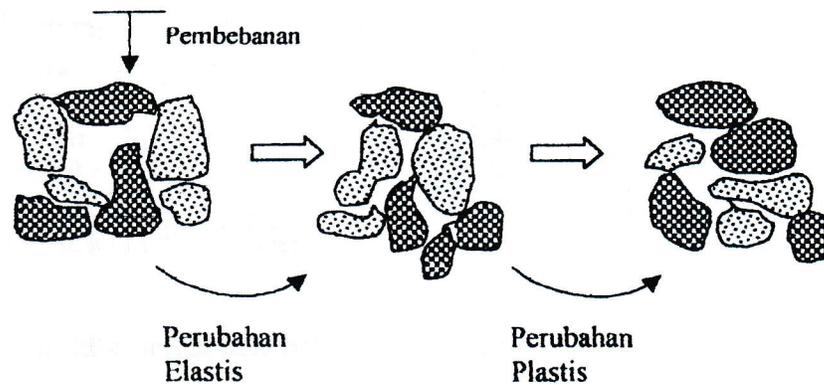
$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (2.4)$$

Tanah mempunyai sifat kemampuan yang sangat besar jika dibandingkan dengan bahan konstruksi seperti baja atau beton, baja dan beton adalah bahan yang tidak mempunyai pori. Itulah sebabnya volume pemampatan baja dan beton itu sangat kecil, sehingga dalam keadaan tegangan biasa baja dan beton tidak mempunyai

masalah. Sebaliknya karena tanah mempunyai pori yang besar, maka pembebanan biasa akan mengakibatkan deformasi tanah yang sangat besar.

Berlainan dengan bahan-bahan konstruksi lain, karakteristik tanah itu didominasi oleh karakteristik mekanisnya seperti permeabilitas atau kekuatan geser yang berubah-ubah sesuai dengan pembebanan.

Mengingat kemampuan butir-butir tanah atau air itu secara teknis sangat kecil sehingga dapat diabaikan, maka proses deformasi tanah akibat beban luar dapat sebagai suatu penyusutan pori seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.3. dimana akibat beban yang bekerja pada tanah, susunan butir-butir tanah berubah atau kerangka struktur butir-butir tanah berubah sehingga angka perbandingan pori (*void ratio*) menjadi kecil yang mengakibatkan deformasi pemampatan.



Gambar 2.3 Pengecilan pori-pori tanah akibat pembebanan (pemadatan)

Sumber: Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi, Dr.Ir. Suyono Sosrodarsono, PT.Pradnya Pararnita, Jakarta, 1980, hal 11

Perubahan elastis pada struktur butiran tanah biasa terjadi pada tanah non hesif yang dipadatkan, perubahan elastis ini memungkinkan untuk menjadi tetap apabila pemadatan yang maksimum terus dilakukan, tetapi perubahan tersebut tidak

akan mengubah bentuk butirannya. Namun akan berpengaruh terhadap pengecilan pori-porinya. Perubahan plastis dapat terjadi pada batuan, dimana pada saat dilakukan proses pemadatan, batuan tersebut dapat dipecah sehingga tidak akan dapat lagi membentuk susunan seperti sedia kala.

Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa pemadatan akan berpengaruh terhadap pengecilan nilai pon-pon tanah. Secara alamiah angka pori tanah untuk setiap jenis tanah akan berbeda -beda seperti yang ditunjukkan dalam tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Nilai angka pori (emaks dan emin) untuk beberapa jenis tanah.

Jenis tanah	Lepas	Padat
	e_{maks}	e_{min}
Kerikil	0,62 — 0,44	0,44 — 0,30
Pasir kasar	0,73 — 0,50	0,50 — 0,33
Pasir berlempung	0,86 — 0,58	0,58 — 0,40
Pasir berlanau	1,05 — 0,68	0,68 — 0,49
Pasir halus	0,86 — 0,40	0,68 — 0,44
Kerikil berpasir	0,73 — 0,44	0,44 — 0,18
Pasir berkerikil	0,73 — 0,44	0,44 — 0,16
Lanau	0,86 — 0,68	0,68 — 0,49

Sumber: Sifat - sifat dan Fisis Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Erlangga, Jakarta, 1991, hal.144

Harus kita perhatikan bahwa hal-hal berikut ini dapat terjadi pada saat kita mengambil tanah dan daerah pengambilan (daerah galian) dan meletakkan sebagai suatu timbunan.

- Tanah yang berada di lapangan mempunyai kerapatan lapangan tertentu atau angka pori e_1
- Pada saat penggalian, volume tanah yang di lapangan akan bertambah disebut memuai. Besarnya pemuaian butiran dan 15 % untuk bahan kerikil sampai 40 %

untuk bahan lempung, untuk batuan pemuaian ada pada tingkat 60-65 % sampai angka pori yang baru e_f (kerapatan akhir). Untuk tanah e_f biasanya lebih kecil dan e_i ; untuk batuan e_f lebih besar dan e_i , karena batuan tidak akan pernah dapat dipadatkan lagi sampai ke angka pori semula.

2.4 Pengaruh Pemadatan Terhadap Kohesi dan Sudut Geser Dalam Tanah (ϕ)

Secara teknis kepadatan tanah akan mempengaruhi nilai sudut geser dalam dimana tanah yang mempunyai nilai kepadatan yang lebih tinggi biasanya juga mempunyai nilai sudut geser dalam yang lebih besar. Namun demikian nilai sudut geser dalam masih tergantung kepada setiap jenis tanah dimana setiap jenis tanah mempunyai nilai sudut geser dalam yang berbeda seperti yang ditunjukkan dalam tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai sudut geser dalam (ϕ) untuk beberapa jenis tanah

Jenis tanah	Nilai Sudut Geser Dalam (ϕ)	
	Lepas	Padat
Kerikil	32-36	35-50
Pasir kasar	32-38	35-48
Pasir berlempung	28-32	35-40
Pasir berlanau	28-32	32-38
Pasir halus	27-33	33-39
Kerikil berpasir	30-38	36-45
Pasir berkerikil	30-38	36-50
Lanau	20-30	25-32

Sumber: Sifat - sifat dan Fisis Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Erlangga, Jakarta, 1991, hal.144

Tanah yang telah mengalami proses pemadatan akan memberikan saling keterkuncian antar partikelnya, ini menunjukkan bahwa material yang bersudut akan

mempunyai kemampuan yang lebih besar untuk saling terkunci dan memiliki kuat keterkuncian antar partikelnya, ini menunjukkan bahwa material yang bersudut akan mempunyai kemampuan yang lebih besar untuk saling terkunci dan memiliki kuat geser yang lebih tinggi (yang lebih besar). Nilai sudut geser dalam tanah akan sangat berbeda untuk tanah kohesif dan tanah non kohesif. Secara praktis nilai sudut geser dalam tanah akan dapat ditentukan melalui percobaan kuat geser tanah. Kekuatan geser tanah sendiri tergantung kepada dua macam komponen yaitu:

- Bagian yang bersifat kohesi yang tergantung pada macam tanah dan kepadatan butirannya.
- Bagian yang mempunyai sifat gesekan (*frictional*) yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.

Kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dengan rumus Coulumb sbb:

$$S = C' + (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

S = Kekuatan geser tanah

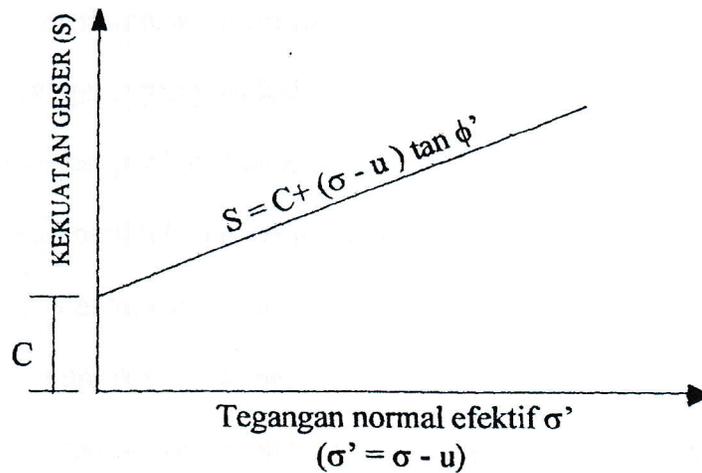
C' = kohesi tanah

σ = tegangan total pada bidang geser (kg/m^2) tegangan air pori (kg/cm^2)

u = sudut geser dalam ($^\circ$)

Sumber : Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Erlangga, Jakarta 1991 hal. 145

Rumus ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Kekuatan geser tanah dengan rumus Coulomb

Pengetahuan mengenai kekuatan geser tanah diperlukan untuk berbagai macam soal praktis, terutama untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*) tekanan tanah terhadap dinding penahan (*carth pressure*) dan kestabilan lereng (*Slope Stability*). Jadi jelaslah bahwa pemadatan akan berpengaruh terhadap peningkatan sudut geser dalam tanah yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah.

Dari uraian diatas dapat disimpulkan bahwa pemadatan merupakan salah satu penyebab perubahan nilai parameter tanah khususnya nilai sudut geser dalam tanah dan harus dipahami bahwa nilai sudut geser dalam merupakan suatu hasil analisa dan kuat geser tanah.

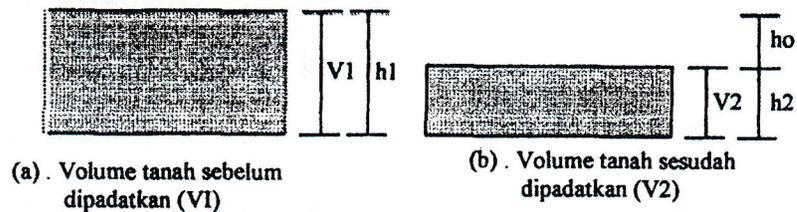
Analisa kuat geser tanah sendiri masih dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain:

- Tekanan efektif atau tekanan antar butir

- Saling keterkuncian antara partikel, jadi partikel yang bersudut akan mempunyai nilai kuat geser yang lebih tinggi dan pada partikel yang bundar.
- Kemampatan partikel atau kepadatan.
- Sementasi partikel yang terjadi secara alamiah atau buatan.
- Daya tarik antar partikel atau kohesi.
- Kadar air untuk tanah kohesif.
- Kualitas contoh (berhubungan dengan gangguan, retakan, celah, dan hal-hal lainnya)
- Metode percobaan kekuatan geser tanah.
- Pengaruh-pengaruh lainnya seperti kelembaban, temperatur, keterampilan operator, kehati-hatian dalam mengangkat contoh ke laboratorium, kondisi peralatan laboratorium, dan lain-lain.

2.5 Pengaruh Pemadatan Terhadap Volume Tanah

Tanah yang telah mengalami proses pemadatan akan memberikan nilai volume yang lebih kecil dari pada volume sebelum dilakukan pemadatan. Perubahan volume tanah tersebut adalah sebagai akibat dari pemampatan tanah, dimana butir-butir tanah mengadakan relokasi diantara pon-pori tanahnya. Itulah sebabnya material timbunan yang diambil dari lokasi lain sebelum dipadatkan akan mempunyai volume yang lebih besar dibandingkan ketika material tersebut sudah dipadatkan seperti yang diperlihatkan pada ambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.5. Pengaruh pemadatan terhadap volume tanah

Dari gambar dapat dilihat bahwa volume tanah tersebut dipadatkan adalah :

$$V_1 = h_1 \dots\dots\dots (2.6)$$

Sedangkan sesudah dipadatkan volume tanah menjadi :

$$V_2 = h_1 - h_0 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dan banyaknya pengurangan volume adalah sebesar h_0 .

Biasanya untuk mendapatkan nilai kepadatan yang ideal (kerapatan maksimum) dengan volume hasil pemadatan yang diinginkan diperlukan material timbunan yang agak berlebih, karena selain material tersebut mampat setelah dipadatkan biasanya juga material tersebut akan mengalami penurunan untuk beberapa waktu kemudian.

Untuk tanah timbunan yang digali dari daerah pengambilan (*borrow area*). Maka volume timbunan akan lebih besar jika dibandingkan dengan volume tanah galian ini, disebabkan karena hampir tidak dapat dilakukan pemadatan dengan tingkat kerapatan seperti sebelumnya.

2.6 Pengaruh Kadar Air Terhadap Pematatan

Bila air ditambahkan kepada suatu segmen tanah yang sedang dipadatkan, maka air tersebut akan berfungsi sebagai unsur pembasah (pelumas) pada partikel-partikel tanah. Karena adanya air ini, partikel-partikel tanah akan lebih mudah bergerak dan bergeseran satu sama lain, dan tanah tersebut akan saling mengikuti pada kedudukan yang lebih rapat (padat).

Meskipun pada pematatan digunakan energi yang sama, nilai kepadatan tanah yang diperoleh sesudah pematatan akan berbeda-beda yang bergantung dari kadar air (*water content*) tanah itu. Kepadatan maksimum akan dapat tercapai pada kondisi kadar air optimum akan membuat tanah menjadi lembek sehingga kekuatannya berkurang.

Karakteristik-karakteristik ini merupakan sifat-sifat yang penting bagi bangunan-bangunan tanah yang terganggu oleh permeabilitas seperti bendungan-bendungan urugan, tanggul-tanggul sungai dan pekerjaan tanggul yang lain. Karena karakteristik-karakteristik ini akan sangat menentukan stabilitas bangunan-bangunan tersebut. Jadi kepadatan tanah yang dipadatkan pada kadar air optimum adalah maksimum, mengakibatkan angka pori menjadi minimum sehingga koefisien permeabilitas menjadi minimum.

2.6.1 Variasi Kadar Air Terhadap Karakteristik Tanah

Suatu bentuk (*phase*) tanah adalah suatu bagian dari sistem tanah yang secara fisik dan kimiawi berbeda dengan bagian-bagian lain. Dan tanah merupakan suatu bahan dengan banyak bentuk (*multi phase*) terdiri atas :

- Padat (biasanya butir-butir mineral)
- Cair (biasanya air)
- Gas (biasanya udara)

Karena itu tanah dapat dianggap terdiri dari sebuah jaringan butir-butir padat yang mempunyai rongga atau pori. Rongga atau pori ini dapat terisi oleh air atau udara bahkan kedua-duanya.

Kadar air dapat didefinisikan sebagai perbandingan berat air dengan berat butir tanah. Kadar air (w) dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut :

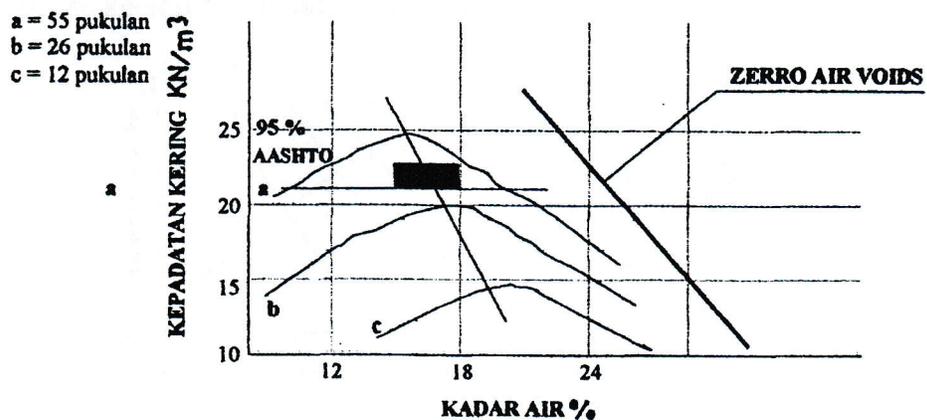
$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \dots\dots\dots (2.8)$$

Persamaan ini memberikan kadar air sebagai suatu variabel bebas, karena berat butir (W_s) konstan untuk kondisi tanah dalam keadaan lunak (*steady state*). Batas-batas kadar air dalam tanah adalah $0 \leq W$ (persen) $\leq \infty$. Kadar air alami untuk sebagian besar tanah berkisar 60%.

Kadar air sangat berpengaruh terhadap usaha pemadatan, pentingnya kadar air ini dapat dilihat pada gambar 2.5 yang didapat dari hasil percobaan laboratoris untuk satu jenis tanah dengan variasi pada kadar air dan usaha pemadatan.

Percobaan dilakukan dengan menumbuk contoh tanah secara berlapis di dalam cetakan dengan tumbukan-tumbukan beban pemukul yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu. Jumlah pukulan standard adalah 5 pukulan/ lapis, 26 pukulan/lapis dan 12 pukulan/ lapis (12 dan 26 pukulan dinamakan standard AASHTO, sedangkan 55 pukulan adalah modifiet AASHTO).

Hasil-hasil laboratoris memang sulit sekali dicapai di lapangan, dan oleh karena itu diberikan kelonggaran yang biasanya adalah $\pm 5\%$. Dengan usaha pemadatan modified AASHTO didapatkan berat isi kering adalah 23 gr/cm^3 pada kadar air optimum 16% . Maka 95% modifiert AASHTO adalah kepadatan dengan berat isi kering 21 gr/cm^3 yang dicapai pada kadar air $12 - 23\%$.



Gambar 2.6 Hasil Percobaan Pemadatan

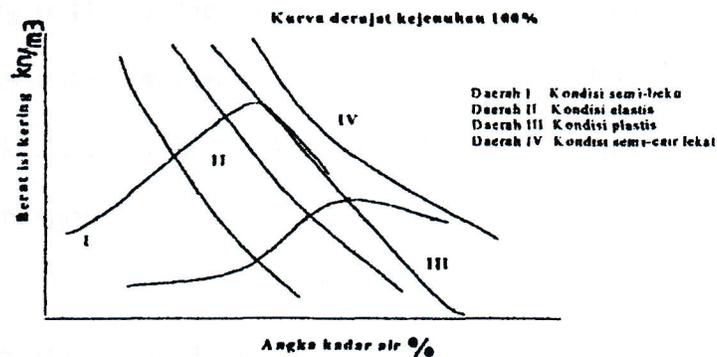
Sumber: Mempersiapkan Lapisan Dasar Konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, Jilid I, Penerbit P.U, 1984.

Kepadatan optimal yang dapat dicapai dilapangan misalnya adalah 23 gr/cm^3 maka dengan syarat kepadatan minimal 95% AASHTO dan memberikan kelonggaran dilapangan untuk kadar air antara $14 - 18\%$ (Kadar air pada optimum density dilapangan), maka hasil kepadatan yang harus kita capai dilapangan adalah sekitar daerah yang tergambaran tersir didalam grafik.

Selain hal tersebut diatas, karakteristik mekanis dan bahan tanah yang sudah didapatkan, juga dapat dipengaruhi oleh kadar air yang terkandung didalamnya dan ternyata variasi dari kadar air yang terkandung dalam bahan yang sama akan memberikan variasi karakteristik tersebut.

Variasi karakteristik tersebut pada umumnya dapat dibedakan dalam 4 (empat) tingkatan, yaitu:

- Tingkatan pertama → kondisi semi - beku
- Tingkatan kedua → kondisi elastis
- Tingkatan ketiga → kondisi plastis
- Tingkatan keempat → kondisi semi - cair lekat



Gambar 2.7 Karakteristik bahan tanah dalam kondisi kadar air yang terkandung di dalamnya.

Sumber: Bendungan Type Urugan, Ir. Suyono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda, Edisi Ketiga, Penerbit PT. Pradnya Paramita, 1981, hal 86

Untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.7 secara skematis tertera zone-zone dan ke-4 tingkatan tersebut pada kurva hubungan berat isi kering dengan tingkat kadar air suatu bahan.

1. Tingkatan pertama (kondisi semi - beku)

Kondisi semi-beku dapat dicapai apabila kadar air yang terkandung dalam contoh bahan tanah relatif paling rendah, dimana sebagian air terserap masuk kedalam butiran tanah, sedang sisanya melekat pada permukaan butiran tersebut.

Sebaliknya pada bahan pasir dengan butiran yang berukuran hampir seragam, tegangan permukaan diantara butiran yang berdekatan menghambat perpindahan tempat kedudukan butiran tersebut dan akibatnya kemampuan pemadatannya agak menurun dalam kondisi elastis.

3. Tingkatan ketiga (kondisi plastis)

Dengan kadar air yang terus menerus ditingkatkan, maka jumlah air yang terdapat di antara butiran tanah menjadi berlebihan, tegangan permukaan selaput air pada butiran menunjukkan kecenderungan yang menurun dan selaput air tersebut seolah-olah berfungsi sebagai pelumas dan pemadatan-pemadatan yang dilakukan pada contoh bahan pada kondisi seperti ini akan terjadi juga perpindahan tempat kedudukan butiran.

Akan tetapi perpindahan tempat kedudukan butiran ini tidak dapat lebih mendekatkannya, karena terhalang oleh adanya air yang sudah memenuhi pori-pori yang terdapat di antara butiran tersebut dan contoh tanah tersebut seolah-olah menjadi plastis.

Oleh karena itu, pada tingkatan ketiga ini juga mengeluarkan gelembung-gelembung udara yang masih terdapat di antara butiran tersebut lebih mudah dibandingkan dengan kondisi bahan dalam tingkatan kedua dan kondisi kepadatan kering optimum akan mudah dicapai.

4. Tingkatan keempat (semi cair – lekat)

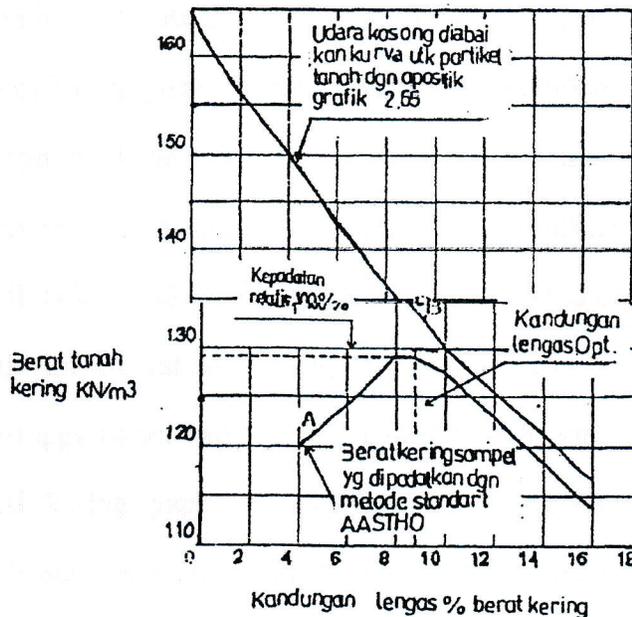
Dan apabila kadar air masih terus ditingkatkan lagi, sehingga seluruh rongga-rongga udara yang terdapat di antara butiran tanah hampir jenuh berisi air, daya kohesi antara butiran yang berdekatan semakin menurun dan akhirnya menghilang sama sekali, maka bahan tanah mulai bersifat cair – lekat.

Kondisi seperti ini hanya dapat terjadi pada bahan tanah yang berbutir halus seperti lempung dan lanau, yang merupakan jenis-jenis tanah yang mampu menyerap air secara berlebihan.

2.6.2 Hubungan Kadar Air Optimum dan Berat Isi Kering

Berat isi (*unit weight*) adalah perbandingan antara berat tanah dengan volume (isi) tanah.

Pengaruh kandungan air pada berat isi tanah dilukiskan oleh kurva A pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Bentuk umum hubungan kadar air optimum dan berat isi

Sumber: Teknik Jalan Raya, Clarkson H. Oglesby dan R. Gary Hicks, Edisi keempat Jilid 2, Penerbit Erlangga, 1996, hal.44

Kurva ini diperoleh sebagai berikut. Persentase yang ditunjukkan air, ditambahkan pada sampel dari semua tanah tertentu. Tiap-tiap sampel kemudian dipadatkan dengan prosedur yang telah ditentukan sehingga berat isi tanah dari bahan yang dipadatkan akan diperoleh.

Kurva A, menunjukkan bahwa sampel terdapat diperoleh dengan penambahan air 9% (dengan berat), air ditambahkan pada bahan kering. Untuk kadar air dengan persentase rendah (katakan kira-kira di bawah 5%). Untuk tanah kasar air dengan persentase rendah (katakan kira-kira di bawah 5%). Untuk tanah kasar pada gambar 2.8, air melekat pada partikel individu, udara mengisi rongga-rongga yang tersisa.

Tetapi air dengan jumlah yang lebih banyak akan mengurangi tegangan permukaan dan meresap ke tanah. Kemudian usaha memadatkan dapat diatur kembali

dengan merapatkan butiran-butiran. Dengan menambahkan jumlah air, aksi peresapan menjadi lebih efektif hingga pada kandungan air optimum, diperoleh densitas besar.

Kurva B, menunjukkan berat kering tanah (berat jenis 2,65) dari campuran tanah dan air tanah dan air tanpa rongga udara. Untuk keadaan ini, bila persentase kadar air tertentu diberikan maka berat isi tanah yang ditempati oleh air akan tetap.

Dalam prakteknya berat isi yang diperoleh pada kurva B, tidak dapat dicapai, karena beberapa rongga udara hadir dalam tanah yang dipadatkan. Ini menjelaskan mengapa berat isi kering yang sebenarnya ditunjukkan pada kurva A sedikit berkurang dari pada nilai secara teoritis pada persentase kelembaban di atas optimum.

Perbedaan di dalam ordinat kedua kurva mewakili sejumlah kecil udara yang selalu hadir di dalam campuran tanah-air.

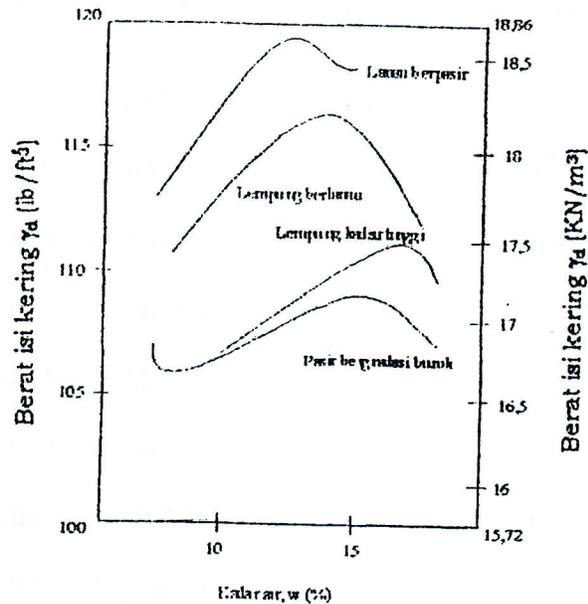
Kurva pada gambar 2.8 adalah merupakan bentuk umum kurva kelembaban densitas tanah. Untuk masing-masing pemadatan, akan terdapat kandungan air optimum sehingga diperoleh berat isi kering maksimum. Dengan diperolehnya berat isi paling maksimum, maka kekuatan tanah tersebut makin baik.

BAB III

KARAKTERISTIK PEMADATAN BERDASARKAN JENIS TANAH

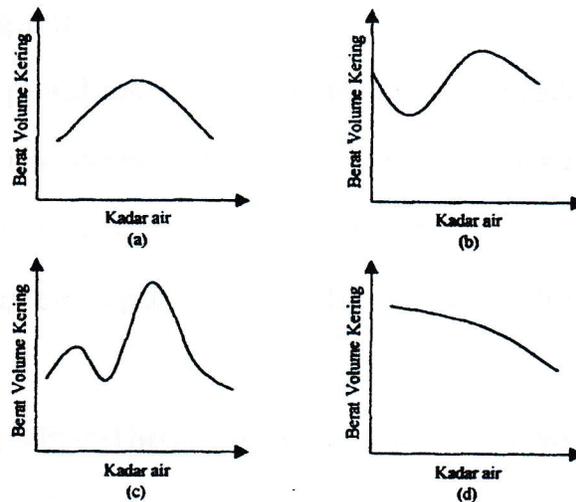
Suatu jenis tanah yang biasanya diwakili oleh distribusi ukuran butiran, bentuk butiran tanah, berat spesifik bagian padat tanah, dan jumlah serta jenis mineral lempung yang ada pada tanah mempunyai pengaruh besar terhadap harga berat volume kering maksimum dan kadar air optimum dan tanah tersebut.

Hasil uji laboratorium yang dilaksanakan sesuai dengan prosedur ASTM test *Designation* D-698 dapat dilihat pada gambar 3-1. Dimana hasil uji tersebut menunjukkan bentuk umum kurva-kurva pemadatan yang didapat dari empat jenis tanah.



Gambar 3-1. Bentuk umum kurva pemadatan pada empat jenis tanah.
Sumber : Mekanika Tanah, Braja M. Das, 1991, Penerbit Erlangga, hal 240.

Dari gambar 3-1 diatas, menunjukkan bahwa untuk pasir, harga berat volume kering umumnya cenderung untuk menurun dahulu dengan naiknya kadar air, kemudian naik sampai mencapai harga maksimum dengan penambahan kadar air.



Gambar 3-2. Tipe Kurva pemadatan yang sering dijumpai pada tanah.
 Sumber: Mekanikan Tanah, Braja M. Das, 1991, Penerbit Erlangga, hal : 241.

Penurunan berat volume kering (Gambar 3-1) pada awal kurva disebabkan karena pengaruh peristiwa kapiler pada tanah. Pada kadar air yang rendah, adanya tegangan tarik kapiler pada pori-pori tanah mencegah kecenderungan partikel tanah untuk bergerak dengan bebas untuk menjadi lebih padat. Kemudian tegangan kapiler tersebut mulai berkurang dengan bertambahnya kadar air membuat partikel-partikel tanah lebih dah bergerak dan menjadi lebih padat.

Kurva pemadatan tanah dapat dibedakan menjadi empat tipe umum (menurut Lee dan Suckamp, 1972) yang telah mempelajari kurva-kurva pemadatan dan 35 jenis tanah. Kurva-kurva tersebut dapat dilihat pada gambar 3-2.

Dari gambar di atas, kurva tipe A adalah kurva yang mempunyai satu puncak. Tipe ini biasa dijumpai pada tanah yang mempunyai batas cair antara 30 dan 70. Tipe B untuk mempunyai satu setengah puncak, kurva tipe C adalah untuk yang mempunyai puncak ganda.

Kurva-kurva pemadatan tipe B dan C dapat dijumpai pada tanah dengan batas cair kurang dari 30. Tipe kurva pemadatan D disebut sebagai kurva berbebtuk ganjil, dimana tipe ini tidak mempunyai puncak tertentu. Bentuk kurva pemadatan seperti tipe C dan D kemungkinan dapat dijumpai pada tanah dengan batas cair > 70 .

3.1 Pengaruh Spesifikasi Sifat Tanah Terhadap Pemadatan.

3.1.1 Faktor Kohesi Tanah

Secara umum tanah dapat diklasifikasikan sebagai tanah kohesif dan tidak kohesif. Suatu jenis tanah disebut sebagai tanah kohesif bila butiran-butiran tanah tersebut tetap bersatu sesudah dikeringkan, sehingga untuk memisahkannya diperlukan suatu gaya.

Pada tanah kohesif apabila dipadatkan akan sangat tergantung pada metode, energi pemadatan dan juga kadar air dengan kadar air optimum. Dimana kadar air optimum pada suatu usaha pemadatan tersebut apakah lebih kering dari optimum, optimum atau lebih basah dari optimum.

Pemadatan akan menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkohesi. Perubahan-perubahan tersebut akan meliputi pada perubahan daya rembes (*permeability*), kemampatan (*compresibility*) dan kekuatan dari tanah. Sedangkan tanah tidak kohesif adalah jenis tanah yang sesudah dikeringkan, butiran-butirannya

akan terpisah. Butiran-butiran tersebut akan bersatu apabila tanah dalam keadaan basah akibat gaya tarik permukaan di dalam air.

Struktur tanah kohesif dan tanah tidak kohesif dapat mempengaruhi pemadatan. Maka pengaruh pemadatan ini dapat dibagi menjadi dua bagian :

1. Pemadatan pada tanah kohesif
2. Pemadatan pada tanah tidak kohesif

3.1.1.1 Pemadatan pada Tanah Kohesif

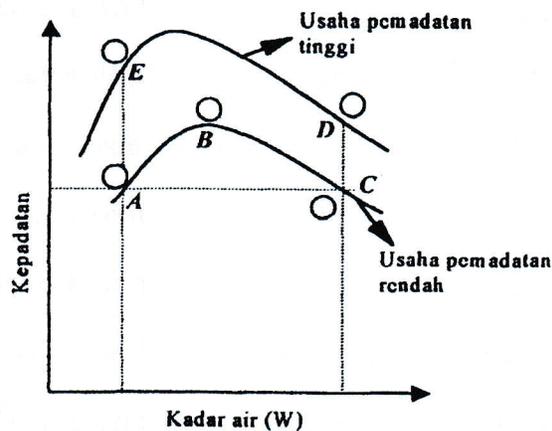
Campuran yang diperlukan untuk membuat suatu deposit tanah menjadi bersifat kohesif adalah mineral lempung, kadang-kadang disebut *argillaceus*. Besarnya kohesi tergantung pada ukuran relatif dan jumlah berbagai butiran tanah dan bahan *argillaceus* yang ada.

Umumnya apabila lebih dari 50% dari deposit mengandung partikel-partikel berukuran 0,002 mm dan lebih kecil, Deposit tersebut disebut sebagai lempung. Dengan persentase relatif ini, partikel-partikel tanah yang lebih besar akan terlarut dalam matriks tanah berbutir halus. Apabila 80 sampai 90% dari deposit tersebut lebih kecil dari saringan No. 200 (0,075 mm), cukup 5 sampai 10% lempung yang ada telah menyebabkan tanah tersebut kohesif.

Tanah kohesif dapat bersifat tidak plastis, atau berupa cairan kental, tergantung pada nilai kadar air pada waktu itu di dalam keadaan kering, tanah ini berupa massa yang sangat keras dan bercelah-celah retak di berbagai tempat, dimana kohesinya hilang oleh penyusutan volume dikarenakan hilangnya air pengisi rongga atau butir. Sebaliknya dalam keadaan sangat berair tanah ini sangat sulit dipadatkan.

Kadar tanah lempung dapat disimpulkan dan indeks plastis sampai 90% menunjukkan tanah ideal berbagai konstruksi tanah (mudah dikerjakan), sedang 20% menunjukkan batas yang maksimal untuk dikerjakan di musim hujan.

Pada tahun 1958, Lambe telah melakukan riset di laboratorium yang memadatkan tanah lempung. Hasil penyelidikannya ini dapat dilihat pada gambar 3-3.



Gambar 3-3. Pengaruh pemadatan, pada struktur tanah lempung.

Sumber : Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), Braja M. Das, jilid I, Penerbit Erlangga, hal. 244.

Pada kadar air yang lebih kering dan optimum, struktur tanah tersebut akan mempunyai struktur terflokulasi, pada gambar 3-3 diwakili oleh titik A. Hal ini disebabkan karena kadar air yang rendah, lapisan ganda terdifusi dan ion-ion yang menyelimuti partikel tanah lempung tersebut tidak dapat sepenuhnya berkembang. Jadi gaya tolak menolak antar partikel-partikel juga berkurang.

Bila kadar air ditambah, maka lapisan ganda terdifusi di sekeliling perikel tanah akan mengembang, sehingga terjadi peningkatan gaya tolak menolak antar

partikel-partikel lempung dan akan menghasilkan tingkat flokulasi yang lebih kecil dan berat isi kering yang lebih besar, seperti terlihat pada titik B (Gambar 3-3).

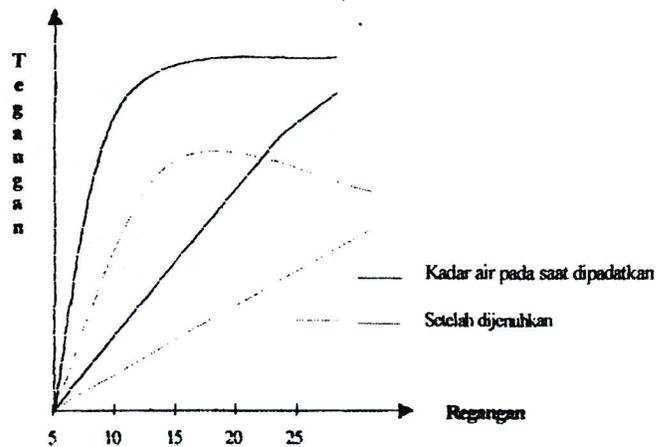
Dari titik B ke titik C, kadar air terus ditingkatkan, maka lapisan ganda akan semakin mengembang dan gaya tolak menolak antara partikel akan semakin meningkat. Maka berat isi kering akan berkurang akibat penambahan air tadi sehingga memperkecil partikel-partikel padat dari tanah.

Apabila usaha pematatannya yang diperbesar, teksturnya akan semakin terdispersi walaupun kadar airnya tetap konstan seperti terlihat pada titik E. Semakin tinggi usaha pematatan, maka partikel-partikel tanah lebih dekat satu sama lain sehingga diperoleh berat isi kering yang lebih besar.

Kekuatan tanah kohesif tergantung pada kadar air pada saat pematatan. Ada gambar 3-4, terlihat bahwa apabila lempung dipadatkan pada keadaan lebih kering dari optimum kemudian dijenuhkan, kekuatannya akan hampir sama dengan lempung yang dipadatkan dengan keadaan yang lebih basah.

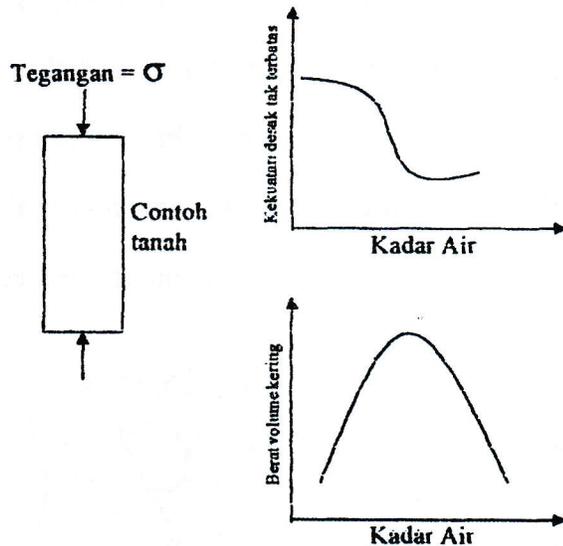
Tetapi pada regangan yang tinggi, kekuatannya hampir sama dengan lempung yang dipadatkan pada keadaan kering dari optimum pada regangan 5%. Dari gambar 3-4, pemberian tegangan yang rendah pada keadaan yang lebih kering tidak cukup untuk mengatasi rekatan partikel karena (1), reorientasi tekstur menjadi lebih terdispensi, dan (2), menyebabkan partikel-partikel tanah menjadi lebih berdekatan, sehingga kompressibilitas lebih rendah.





Gambar 3-4. Kurva-kurva tegangan-regangan kuahtatif untuk lempung yang dipadatkan dan dihubungkan dengan kadar air optimum dan diuji.
 Sumber : Mekanika tanah, Joseph E. Nowlos, Edisi kedua, Penerbit Erlangga, 1991. hal. 212.

Terlihat pada kekuatan sesudah perendaman untuk menghasilkan kejenuhan. Pada regangan tinggi, sebagian besar tanah akan mempunyai kekuatan terbatas seperti terlihat secara kualitatif pada gambar. Pada regangan rendah, kadar air pemadatan merupakan parameter yang penting. Sedangkan pada tegangan yang tinggi, dimana rekatan antar partikel akan hilang pada langkah (1) dan (2) akan menghasilkan kompressibilitas yang besar dimana tekstur tersebut pada keadaan kering. Untuk tekstur pada keadaan basah, faktor (2) akan lebih dominan pada tekstur yang terdispersi sehingga menghasilkan kompressibilitas yang lebih kecil.



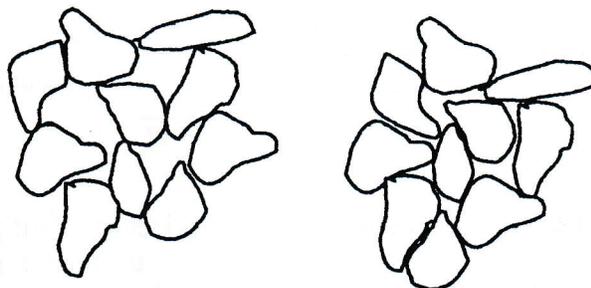
Gambar 3-5. Pengaruh pemadatan terhadap kekuatan tanah lempung.
 Sumber : Mekanika Tanah, Braja NI. Das, Jilid 1, Penerbit Erlangga, 19991, hal. 247

Pemadatan menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkohesi. Perubahan-perubahan tersebut antara lain perubahan pada kemampuan pemadatan (*compressibility*), daya rembes (*permeability*), dan kekuatan dari tanah.

Kekuatan tanah lempung yang dipadatkan umumnya akan berkurang dengan semakin bertambahnya kadar air. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3-5. Bila dua contoh tanah dipadatkan pada berat isi yang sama, dimana yang satu dipadatkan pada isi kering dan yang lain dipadatkan pada sisi basah dan kadar air optimum, maka tanah yang dipadatkan pada sisi kering dan optimum akan mempunyai kekuatan lebih besar. Tanah harus dipadatkan sampai kadar airnya lebih kering dan optimum, apabila kekuatan deformasi yang rendah adalah kritis dan pemuaian bukan merupakan suatu masalah.

3.1.1.2 Pemadatan pada Tanah Tidak Kohesif

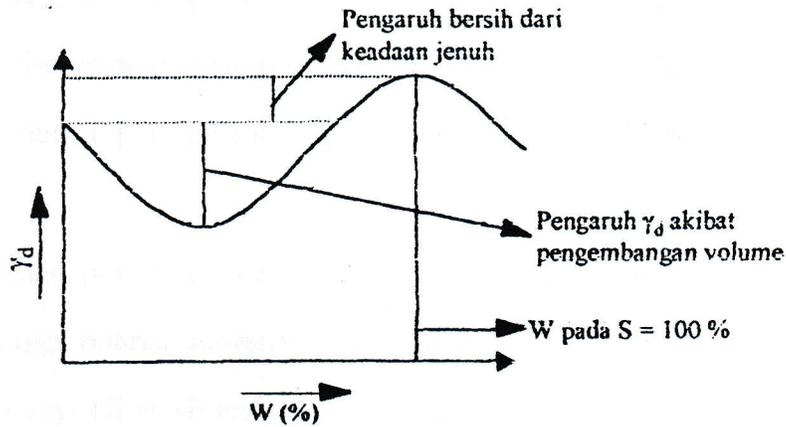
Tanah non kohesif cenderung membentuk suatu struktur berbutir tunggal (gambar 3-6), seperti diperlihatkan pada gambar di bawah yang dapat dalam keadaan lepas atau padat. Pada umumnya butiran yang lebih besar dan sekitar 0,01 mm akan membentuk struktur berbutir tunggal.



Gambar 3-6. Struktur berbutir tunggal

Pada butiran tanah yang berukuran antara 5 sampai 0,05 mm (pasir kasar sampai halus), adanya sejumlah kecil air saja sangat mengubah sifat teknis tanah tersebut. Tarikan permukaan air pada kondisi $S_r \leq 100\%$ akan cukup untuk menghambat gerakan-gerakan partikel dalam batas-batas ini, dan menghasilkan kohesi semu, yang akan hilang apabila tanah itu mengering.

Kohesi semu menunjukkan kemampuan tanah atau menghasilkan apa yang disebut pengembangan volume (*ulking*). Gambar di bawah secara kualitatif memperlihatkan pengaruh pengembangan volume terhadap berat isi. Pada kadar air nol, berat isi mendekati nilai maksimum yang mungkin untuk masukan energi tertentu. Pada kadar air antara, pengembangan volume, akan menghambat gerakan partikel dan berat isinya akan berkurang.



Gambar 3-7. Pengaruh kualitatif dan pengembangan volume terhadap berat isi kering yang dihasilkan.

Sumber: Mekanika Tanah, Braja M. Das, Jilid 1, Penerbit Erlangga, 19991, hal. 249

Apabila lebih banyak air yang ditambahkan, sebagian pori akan menjadi jenuh dan tarikan permukaan akan hilang, serta kemampuan akan bertambah. Pada $S = 100\%$, semua pengaruh tarikan permukaan akan hilang dan bersama dengan pengaruh pelumasan partikel, berat isi maksimum akan diperoleh. Dalam operasi pemadatan di lapangan dimana penambahan air tidak akan merusak tanah di sekitarnya, pasir yang dilimpahi air (untuk menjamin $S_r < 100\%$) akan sangat membantu dalam menambah berat isi.

Tanah tidak kohesif tidak dapat langsung dipadatkan dengan menggunakan metode tumbukan maupun metode remasan. Tanah ini dapat dipadatkan dengan menggunakan tekanan statis terkekang, tetapi cara ini sangat tidak efisien. Metode yang biasa digunakan ialah kombinasi antara kekang dan getaran.

Metode lain juga kadang-kadang digunakan adalah dengan membanjiri tanah (menjenuhkan) dan menggilasnya dengan mesin penggilas getar. Penjenuhan akan menjamin hilangnya tarikan permukaan dari tanah yang baru dilembabkan, dan pemakaian yang cepat dari mesin penggilas akan menimbulkan tekanan pori yang berlebihan.

Tekanan pori yang berlebihan ini akan mencairkan tanah untuk sementara waktu, sehingga butiran-butirannya dapat dengan mudah diubah menjadi lebih padat selama terjadinya aliran air pada pori-pori tanah.

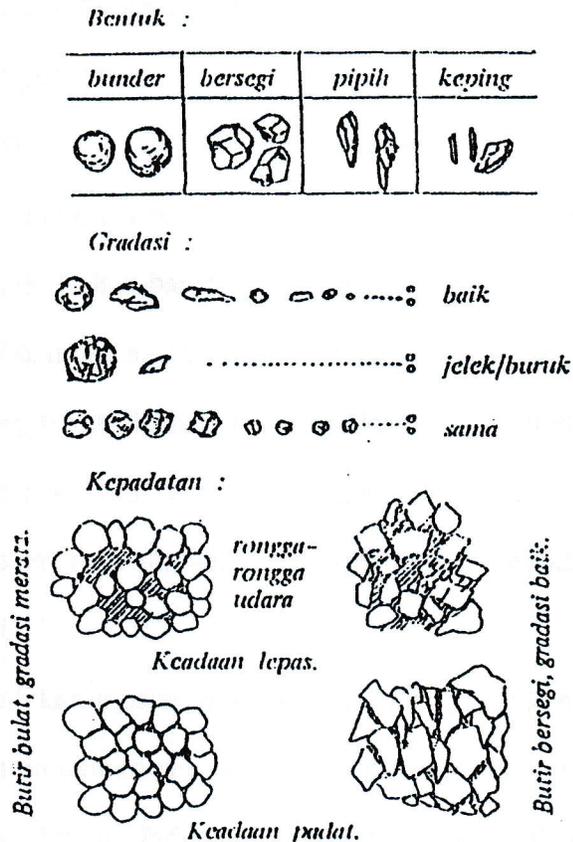
3.1.2 Tinjauan terhadap Gradasi Tanah

3.1.2.1 Bentuk dan Gradasi Butir Tanah

Bentuk butiran-butiran dari berbagai jenis tanah dapat diklasifikasikan sebagai bundar, padat bersegi, pipih sampai berkeping (lihat gambar 3-8). Bentuk butir yang bundar sampai padat bersegi didapat pada tanah-tanah liat. Dari kedua tanah ini ada serangkaian jenis-jenis campuran, karena pada hakekatnya di dalam alam bebas ini jarang didapati tanah yang murni.

Gradasi butir adalah pembagian (%) jumlah butir tanah dengan ukurannya masing-masing dari sesuatu massa tanah. Makin besar jumlah buti dalam tanah itu yang ukurannya sama, makin besar jumlah % butir tersebut, kalau jumlah % ini mencapai nilai yang besar sekali misalnya di atas 75%, maka tanah tersebut dinamakan bergradasi merata (*even graded*). Kalau masing-masing jumlah % yang dimaksud berbagi merata mengikuti sesuatu aturan tertentu, maka tanah itu disebut

bergradasi baik (*wellgraded*), sedangkan yang bergradasi buruk (*poor graded*) adalah % masing-masing ukuran butir yang tidak teratur sama sekali.



Gambar 3.8. Bentuk butir, gradasi butir dan kepadatan tanah.

Sumber : Mempersiapkan Lapisan Dasar Konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 1, Penerbit P.U., hal. 164.

Gradasi butir tanah dimaksudkan untuk menunjukkan tingkat pencampuran berbagai butiran suatu lapisan tanah yang dinyatakan dalam persentase berat.

Pembagian butir di dalam massa tanah yang bergradasi baik, mendekati rumus:

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^n \dots\dots\dots (3-1)$$

Dimana :

P = Persentase lewat ayakan ukuran (%)

D = Ukuran butiran terbesar (mm)

d = Jumlah eksperimen

n = 0,45 – 0,50

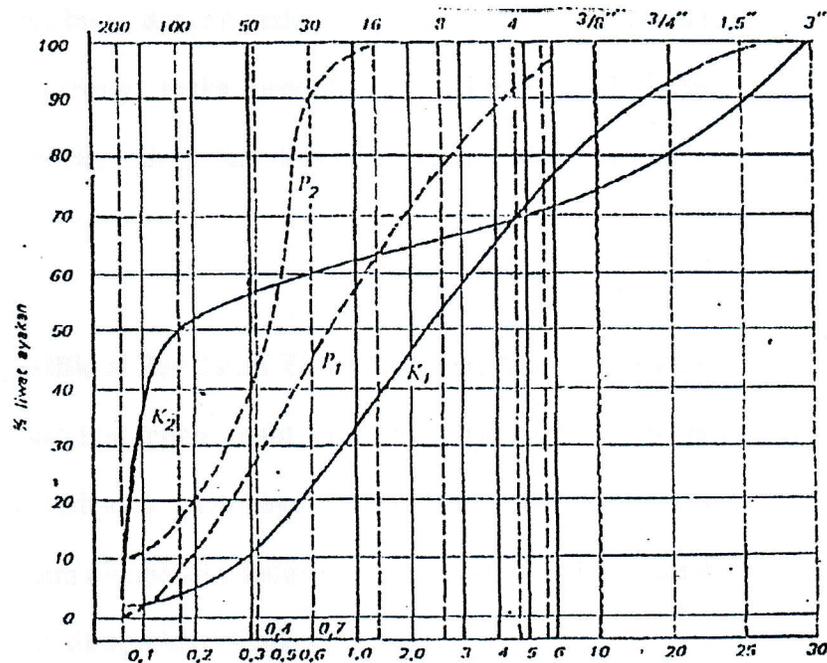
Untuk kebanyakan tanah, (n) ini adalah 0,45 – 0,50. Untuk campuran kerikil/pasir/tamah liat, $n = \pm 0,33$. Bahan-bahan ukuran butir maksimal = 2 cm, sedang % lewat ayakan No. 200 = 6%, maka n – 0,5 kalau % lewat ayakan No. 200 = 8 %, n = 0,45.

Sudah barang tentu, di dalam menentukan gradasi butir ini, kita tidak dapat merinci ukuran-ukuran butir tersebut hingga teliti besar, tetapi cukuplah kita menetapkan batas-batas butir dimana besar butir yang termasuk di dalam batas-batas itu dinamakan "*fraksi*".

Yang menentukan masing-masing fraksi ini adalah kemampuan praktis yang biasanya adalah kemungkinan pemisahan masing-masing butir tanah dengan ayakan (*sieves*) yang dapat dibuat. Jadi, di dalam menentukan % butir yang berukuran tertentu, kita cukup menyebutkan fraksinya saja yang biasanya dinyatakan dalam % melalui ayakan berukuran lubang tertentu.

Hasil analisa butir suatu jenis tanah dapat digambarkan pada suatu grafik yang khusus dibuat untuk itu, jenis dapat dilihat pada bentuk kurva hasil analisa tersebut. Dari gambar 3-8, dapat dilihat bahwa tanah yang butir-butirnya berbentuk bundar dan bergradasi merata tidak dapat mencapai kepadatan yang tinggi, demikian juga stabilitasnya.

Tanah yang dapat mencapai kepadatan dan kestabilan yang tinggi adalah termasuk di dalam golongan bergradasi baik dari butir-butirnya berbentuk persegi. Perhatikan susunan butir-butir didalam massa, yang menunjukkan bahwa rongga-rongga udara antara butir-butir besar diisi oleh butir-butir yang lebih kecil lagi, dan seterusnya, sehingga benar-benar dipadatkan massa yang jumlah rongga udaranya adalah minimal.



Gambar 3-9. Grafik distribusi ukuran butiran (Gradation Curves).

Sumber : Mempersiapkan Lapisan Dasar Konstruksi, Ir. Irmam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 1, Penerbit P.U., 1984, hal. 166.

P₁ = pasir, gradasi baik K₁ = kerikil, gradasi baik

P₂ = pasir gradasi buruk K₂ = kerikil, gradasi buruk

Untuk mendapatkan tanah yang bergradasi memenuhi syarat-syarat kurva yang ideal seperti terlihat pada gambar 3-9 adalah hal yang tidak mudah, bahkan

kebanyakan tidak mungkin. Oleh karena itu, maka spesifikasi-spesifikasi yang ditetapkan untuk gradasi butir untuk tanah yang harus dipergunakan, biasanya diberikan toleransi yang berupa batas-batas yang masih memberikan hasil konstruksi yang dapat memenuhi persyaratan teknis masih dapat dicapai.

Sebagaimana telah diterangkan di atas, bahwa kestabilan suatu massa tanah yang butir-butirnya berbentuk persegi didapat antara lain oleh adanya "*interlocking action*" antar butir, dengan material yang diambil langsung dari sumber-sumber alam (tanpa *processing*), maka bentuk butir-butirnya sudah barang tentu tidak dapat berbentuk persegi di dalam keseluruhannya. Akibatnya *interlocking action* tidak sepenuhnya.

3.2 Spesifikasi Peralatan Terhadap Metode dan Hasil Uji

Kepadatan tanah suatu konstruksi yang dijadikan ukuran mengenai daya mampunya terhadap gaya-gaya muatan yang menyebabkan deformasi konstruksi, dilaboratorium didapatkan dengan menumbuknya di dalam cetakan (*mold*) yang kuat.

Agar didapatkan tingkat kepadatan di lapangan seperti yang dicapai di laboratorium, maka akan dijumpai suatu perbedaan kondisionil, yaitu tidak terdapatnya ruangan berdinding kuat yang menahan massa tanah yang didapatkan itu sehingga pemadatan dengan cara menumbuk, tidak akan dicapai dengan semudah di laboratorium.

Di samping itu alat penumbuk yang efisien sukar untuk dibuat, memang dibuat orang alat-alat pemadat berjenis "*mechanical tampers*", namun produktivitasnya rendah, sehingga tidak dipergunakan pada pelaksanaan pembuatan jalan raya ataupun landasan terbang, dimana diperlukan usaha-usaha pemadatan tanah dengan jumlah sangat besar.

Usaha pemadatan dan energi pemadatan (*compaction effort and energy = CE*) adalah tolak ukur energi mekanis yang dikerjakan terhadap suatu massa tanah. Di laboratorium usaha pemadatan ini dihubungkan dengan jumlah pukulan dari penumbuk, sedangkan di lapangan dengan jumlah gilasan dari mesin gilas, jumlah jatuhnya dari benda-benda yang dijatuhkan adalah hal-hal serupa yang dilakukan untuk mengetahui berat volume tanah tertentu.

Energi pemadatan ini jarang digunakan sebagai spesifikasi untuk pekerjaan tanah karena sangat sukar diukur. Malahan yang sering disyaratkan adalah jenis peralatan yang digunakan, jumlah gilasan, atau yang paling sering adalah hasil akhir berupa berat isi kering tanah.

3.2.1 Metode Pemadatan

Memadatkan suatu massa tanah tidak lain adalah untuk memperkecil jumlah rongga-rongga ataupun yang berisi air, sedemikian rupa sehingga nilai yang minimal dan kepadatan optimal.

Tujuan pemadatan di lapangan adalah memadatkan tanah pada keadaan kadar air optimal, sampai keadaan yang paling padat. Pada umumnya kita tidak dapat

menentukan kadar air optimum dengan cara pemadatan di lapangan. Biasanya kita menentukan syarat-syarat yang harus dipenuhi pada waktu pemadatan dilakukan.

Maka pemadatan tanah dapat dibedakan menjadi 2 bagian, yaitu :

- Pemadatan laboratorium
- Pemadatan lapangan

Energi pemadatan di lapangan dapat diperoleh dari mesin gilas, alat-alat pemadat getaran, dan dari benda-benda berat yang dijatuhkan. Di laboratorium, contoh uji untuk mendapatkan pengendalian mutu dipadatkan dengan menggunakan daya tumbukan (dinamik), alat penekan statik yang menggunakan piston dan mesin tekanan. Beberapa keuntungan yang didapatkan dengan adanya pemadatan ini adalah:

- Berkurangnya penurunan permukaan tanah (*subsidence*), yaitu gerakan vertikal di dalam massa tanah itu sendiri akibat berkurangnya angka pori.
- Bertambahnya kekuatan tanah
- Berkurangnya penyusutan dan volume dapat mengakibatkan berkurangnya kadar air dari nilai patokan pada saat pengeringan

3.2.2 Metode Pemadatan Laboratorium

Ada dua macam percobaan di laboratorium yang biasa dipakai untuk mendaptkan berat isi kering maksimum dan kadar air optimum. Percobaan tersebut adalah "*standard compaction test*" dan "*modified compaction test*".

Tabel 3.2. Spesifikasi Uji Pemadatan standar dan Dimodifikasi

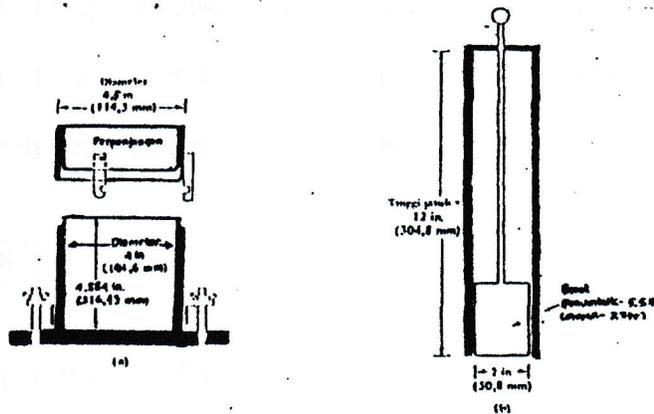
Spesifikasi	Standar (ASTM D ₆₉₈)	Modifikasi *ASTM D ₆₉₈)
Palu	24,5 KN	44,5 N
Tinggi jatuh palu	305 mm	457 mm
Jumlah lapisan	3	5
Jumlah tumbukan/ lapisan	25	943,3 cm ³ 25
Volume cetakan		Lolos saringan No. 4
Tanah		
Energi pemadatan (EC)	595 kJ/m ³	2698 kJ/m ³

Sumber : Sifat fisis Dan Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1991, hal. 205

Pada percobaan laboratorium, Energi Pemadatan (EC) didapatkan dari tumbukan, remasan (*kneading*) atau dengan tekanan statis. Selama pemadatan dengan tumbukan, suatu palu dijatuhkan dan tinggi tertentu beberapa kali pada beberapa lapisan tanah di dalam suatu cetakan (*mould*) untuk menghasilkan suatu dengan volume tertentu. Ukuran dan bentuk palu, jumlah jatuhnya, jumlah lapisan, dan volume cetakan telah dispesifikasi dalam pengujian standar oleh ASTM dan AASHTO seperti pada tabel 3.2 diatas.

3.2.3 Uji Pemadatan Standar (Standar Compaction Test)

Pada uji pemadatan standar (ASTM Test Designation D-698) dan dalam (AASHTO Test Designation T-99), tanah dipadatkan dalam sebuah cetakan silinder bervolume 1/30 ft³ (=943,3 cm³). Diameter cetakan adalah 4 inchi (101,6 mm).



Gambar 3.10. Uji Proctor Standar

Sumber : Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), jilid 1, Penerbit Erlangga, 1991, hal 236-237.

Tanah dicampur air dengan kadar air yang berbeda-beda dan kemudian padatkan dengan menggunakan penumbuk khusus. Pemadatan tanah tersebut dilakukan dalam 3 (tiga) lapisan (dengan tebal tiap lapisan kira-kira 1,0 inc) dan ah tumbukan adalah 25 kali setiap lapisan. Berat penumbuk adalah 5,5 lb (massa = 2,5 kg) dan ting'gi jatuh sebesar 12 inc (=304,8 mm), gambar 3.10. Untuk setiap percobaan, berat volume basah (γ) dari tanah yang dipadatkan tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (3-2)$$

Dimana :

W = berat tanah yang dipadatkan dalam cetakan (kg atau lb)

V = Volume cetakan (cm³ atau ft³)

Juga pada setiap percobaan besarnya kadar air dalam tanah yang dipadatkan dapat ditentukan di laboratorium. Bila kadar air tersebut diketahui, berat volume kering γ_d dari tanah tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{W(\%)}{100}} \dots\dots\dots(3-3)$$

Dimana : (%) = persentase kadar air

Harga γ_d dari persamaan tersebut, dapat digambarkan terhadap berat volume kering maksimum dan kadar air optimum. Gambar 3.10 menunjukkan suatu grafik hasil pemadatan suatu tanah lempung berlanau dengan metode proctor standar.

Bila pori-pori tanah sudah tidak ada udaranya lagi, yaitu pada saat dimana derajat kejenuhan tanah = 100%. Jadi berat isi kering maksimum (teoritis) pada suatu kadar air tertentu dengan kondisi "zero air voids" (pori-pori tanah tidak mengandung udara sama sekali), dapat ditulis sebagai berikut :

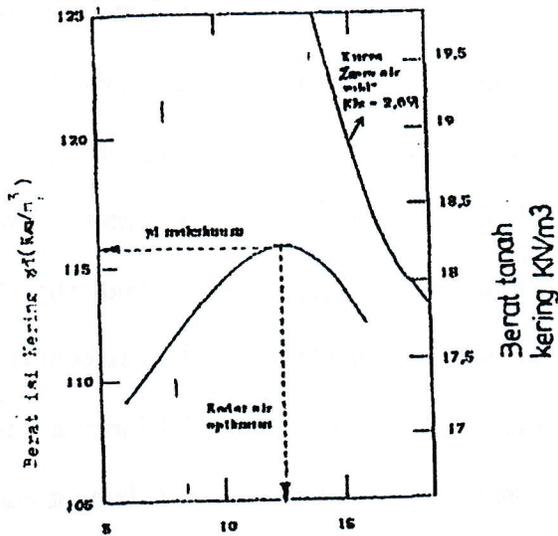
$$\gamma_{ZAV} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + e} \dots\dots\dots(3-4)$$

Dimana : γ_{ZAV} = berat volume pada kondisi zero dari voids (kg/m^3)

γ_w = berat volume air (kg/m^3)

e = angka pori

G_s = berat spesifik butiran padat tanah



Gambar 3.11. Hasil uji pemadatan proctor standar

Sumber: Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis), Braja M. Das, Penerbit Erlangga, 1991, hal. 238.

Untuk keadaan tanah jenuh 100%, $c = w \cdot G_s$;jadi:

$$\gamma_{ZAV} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + W \cdot G_s} = \frac{\gamma_w}{W \cdot \frac{1}{G_s}} \dots \dots \dots (3-5)$$

dimana: W = kadar air (%)

G_s = berat jenis tanah

Garis angka pori nol (ZAV) dapat digambarkan dan selalu berada di atas kurva pemadatan apabila nilai G_s yang benar telah digunakan. Garis ZAV menunjukkan kerapatan kering pada saat kejenuhan (*saturation*) 100% ($S = 100$).

3.2.4. Uji Pemadatan Dimodifikasi (*Modified Compaction Test*)

Dengan berkembangnya alat-alat penggilas berat yang digunakan pada pemadatan di lapangan, uji pemadatan standar harus dimodifikasi untuk dapat

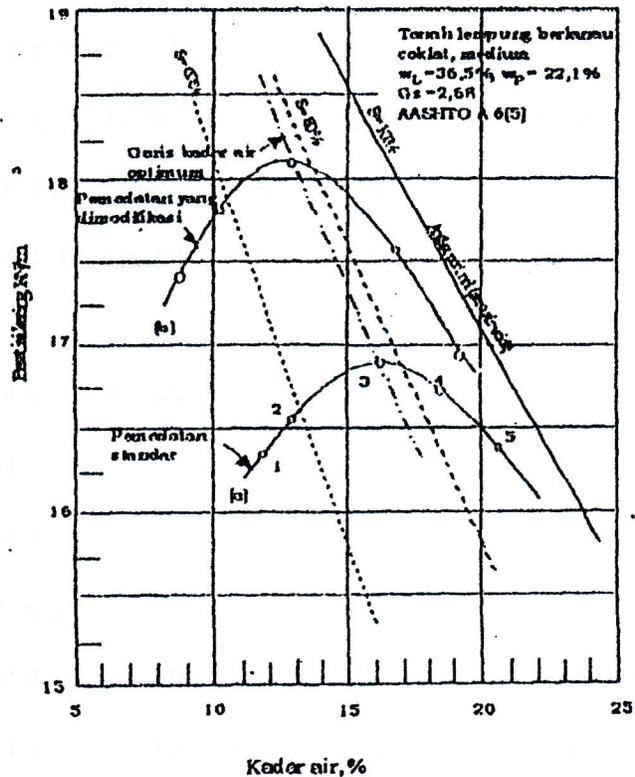
mewakili kondisi lapangan. Untuk pelaksanaan uji pemadatan dimodifikasi (ASTM Test Designation D – 157) dan AASHTO Test Designation T-180), dipakai cetakan dengan volume $1/30 \text{ ft}^3$ ($=944 \text{ cm}^3$). Tanah dipadatkan dalam lima lapisan dengan menggunakan penumbuk seberat 10 lb (massa = 4,54 kg). Tinggi jatuh penumbuk adalah 18 inchi (457,2 mm), jumlah tumbukan per lapis adalah 25 kali.

Karena energi pemadatan lebih besar pada uji pemadatan dimodifikasi, maka berat isi kering maksimumnya lebih besar dibandingkan pada uji pemadatan standar. Peningkatan berat isi kering maksimum ini, menurunkan besar kadar air optimum.

Pertimbangan-pertimbangan yang harus diketahui dalam menggunakan metode "proctor" yang orisinil, yaitu :

1. Tanah yang dibutuhkan untuk percobaan lebih sedikit dibandingkan di lapangan
2. Teknisi akan lebih dapat merasakan kemungkinan di mana terdapat titik berikutnya pada kurva pemadatan.
3. Cenderung mengurangi jumlah titik pengujian
4. Biaya untuk pembuatan kurva pemadatan akan jauh berkurang

Dari contoh tanah yang dipadatkan dengan kedua metode ini di atas dapat digambarkan kurva berat isi kering terhadap kadar air, seperti terlihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.12. Kurva uji pemadatan standar dan dimodifikasi untuk tanah glasial lempung yang berasal dari daerah dekat Peoria, Illinois.
 Sumber: Mekanika Tanah, Joseph E. Bowles, Edisi Kedua, Erlangga, 1991, hal. 206.

Semua tanah yang mengalami uji pemadatan menunjukkan kurva berat isi vs kadar air yang sama seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.12. di atas. Kurva b dan gambar di atas memperlihatkan segi lain dan kurva pemadatan, yaitu apabila compactive effort (CE) bertambah, maka kadar air pada kerapatan kering maksimum akan bergeser ke kiri. Kerapatan kering juga bertambah, tetapi tidak terdapat hubungan yang dapat diramalkan antara kerapatan kering dan CE.

3.2.5. Metode Pemadatan Lapangan

Peralatan pemadatan lapangan yang akan dipakai pada suatu pekerjaan pemadatan tergantung pada jenis tanah (dan peralatan yang dimiliki oleh kontraktor). Hampir semua peralatan di lapangan dilakukan dengan penggilas (*rolles*). Kita dapat membedakan 4 cara pokok yang dimanfaatkan, sendiri-sendiri ataupun kombinasi satu sama lain.

Keempat pokok yang dimaksud itu adalah :

- Menekan padat
- Menumbuk padat
- Menggetarkan padat

Dari keempat cara di atas harus dipilih alat yang mana yang hendak dipakai pada suatu jenis tanah tertentu untuk mencapai kepadatan yang optimal.

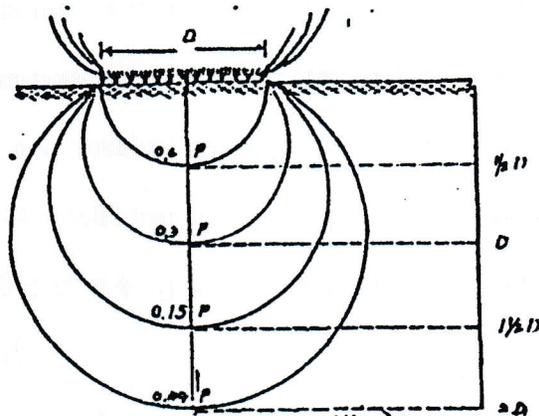
Kriteria dari tingkatan pemadatan yang harus dicapai ialah, bahwa massa tanah yang dipadatkan, tidak boleh mengalami deformasi di bawah muatan lalu lintas yang direncanakan akan melewati konstruksi kita, yang sangat berpengaruh terhadap umur rencana berguna dari masing-masing strukturnya. Di samping itu, juga ekonomi dari usaha untuk mencapai tingkatan kepadatan ini juga merupakan salah satu kriteria di dalam kita memilih jenis pemadat, dimana kecepatan tercapainya hasil yang diinginkan merupakan faktor yang penting sekali dalam memilih jenis pemadat.

Dengan memperhatikan tujuan utama dari suatu jenis alat pemadat, maka di dalam perdagangan didapatkan jenis-jenis sebagai berikut :

- Alat pemadat roda baja dengan permukaan bergigi-gigi atau berbidang-bidang (*lumping rollers dan segmented rollers*).
- Alat pemadat roda baja dengan permukaan halus (*smooth, steelwheel roller*).
- Alat pemadatan pneumatis (*rubber tyred rollers*)
- Pemadatan dengan getaran.

Alat-alat pemadatan di atas, untuk tujuan tertentu dapat diberikan mekanisme tambahan yang dapat memberikan getaran kepada getarannya pada waktu menginjak tanah, dengan tambahan alat ini, maka alat pemadat tadi diberikan “predikat” tambahan *vibrating*.

Pengaruh tekanan vertikal roda roller dapat digambarkan berdasarkan teori “*pressure bulb*” yang thpat digambarkan di bawah daerah singgung (*contact area*) dan roda dengan permukaan tanah, dan merupakan lingkaran-lingkaran (gambar 3.13.) yang menunjukkan tegangan yang sama (*isostress*).



Gambar 3.13. Pengaruh tekanan vertikal roda roller (*Pressure bulb*)

Teori pressure bulb ini dikembangkan berdasarkan percobaan-percobaan dengan *pneumatic tyre rollers*, tetapi sekarang ini juga dimanfaatkan jenis-jenis lainnya untuk mendapatkan gambaran pendekatan.

Pada kedalaman tertentu di bawah contact area diukur tekanan per satu satuan luas yang diakibatkan oleh tekanan pokok berat roda. Perbandingan antara tekanan roda pada contact area dengan yang ada pada permukaan *pressure bulb* yang dipilih disebut faktor pengaruh (*influence factor*).

Apabila lebar contact area = D , maka pada kedalaman $0,5 D$ didapatkan faktor pengaruh = $0,60$; pada kedalaman = D , influence faktor ini = $0,30$ dan selanjutnya pada kedalaman $1,5 D$; faktor ini didapatkan = $0,15$; dan pada $2 D$, didapatkan faktor pengaruh $0,09$.

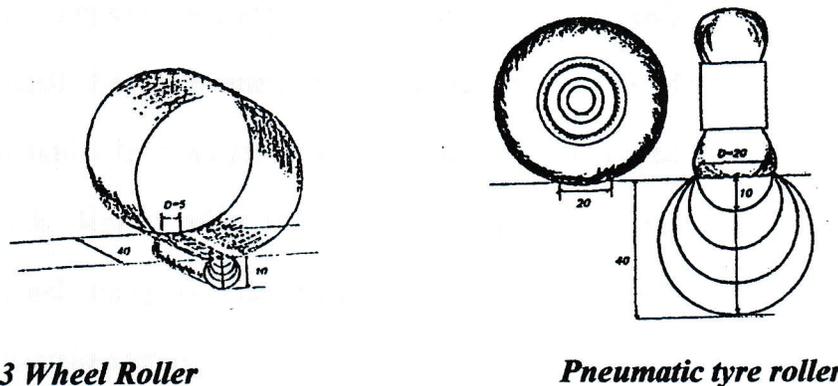
Sebagai contoh misalnya jenis roller yang dipandang adalah sebuah *pneumatic roller* dan untuk D diukur lebar = 20 cm. Oleh karena contact area roda-roda ini berupa lingkaran (dianggap demikian, karena memang agak mendekati dan demi mudahnya perhitungan-perhitungan), maka luas contact area = $0,25D^2 = 314$ cm².

Berat muatan ban tersebut misalnya = $3,10$ ton; maka tekanan per satu cm² contact area = $3,10/314 = 0,01$ ton cm² = 10 kg/cm². Pada kedalaman 10 cm, tekanan diperhitungkan = $0,60 \times 10 = 6$ kg/cm²; pada kedalaman = 30 cm didapatkan tekanan $0,15 \times 10 = 1,5$ kg/cm².

Perhitungan serupa dapat dilakukan untuk rollers dengan roda baja, apabila roda roller kita = 60 cm, sedangkan contact area = 20 cm dan berat muatan roda = 6 ton, maka didapatkan untuk luas contact area = $60 \times 20 = 1200$ cm², dan tekanan/cm²

pada contact area F (6000 : 1200) 5 kg/cm^2 . Pada kedalaman 20 cm, maka pengaruh tekanan roda didapatkan $= 0,30 \times 5 = 1,5 \text{ kg/cm}^2$ dan seterusnya.

Dengan teori pressure bulb ini, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa alat pemadat dengan roda baja, tidak baik untuk memadatkan lapisan-lapisan homogen yang terlalu tebal. Hal ini diterangkan dengan contoh pada gambar 3.14.



Gambar.3.14. Perbedaan pengaruh roda baja dengan roda ban angin

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Jr. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Sebuah *3 wheel roller* memadatkan tanah setebal 25 cm (20 cm sesuai dengan spesifikasi) ; ukuran roda adalah dengan lebar 40 cm dan berat muatan pada roda = 5 ton dan seluruh berat roller 12 ton. Setelah beberapa lintasan, maka lebar daerah singgung didapatkan 5 cm. Luas contact area $= 40 \times 5 = 200 \text{ cm}^2$ dan tekanan roda pada permukaan tanah menjadi $= 5000 \text{ kg} : 200 \text{ cm}^2$. Pada kedalaman 10 cm ($=2D$), maka tekanan kepada tanah $0,09 \times 25 \text{ kg/cm}^2 = 2,25 \text{ kg/cm}^2$.

Apabila dalam keadaan yang sama, kita memanfaatkan *pneumatic roler*, pada tekanan angin (*inflation pressure* di dalam ban) = 7 atm, dan muatan bank = 2 ton, maka luas bidang singgung yang dianggap berbentuk lingkaran dengan luas = (2000

kg : 7 kg/cm²) = 300 cm² dan berdiameter = 20 cm, maka permukaan tanah = 7 kg/cm² yang jauh lebih besar dari tekanan oleh roda-roda baja, meskipun ada permukaan tanah, tekanan oleh roda bajalah yang lebih besar.

Kesimpulan inilah yang memberikan keterangan, mengapa 3 *wheel rollers* tidak begitu baik untuk keperluan mendapatkan kepadatan yang sesuai pada tanah-tanah urgan ; lapisan permukaan lekas menjadi keras, sedangkan yang ada di bawahnya masih belum memenuhi persyaratan kepadatan, dan dengan demikian memerlukan jumlah lintasan yang amat banyak sehingga menjadi tidak ekonomis.

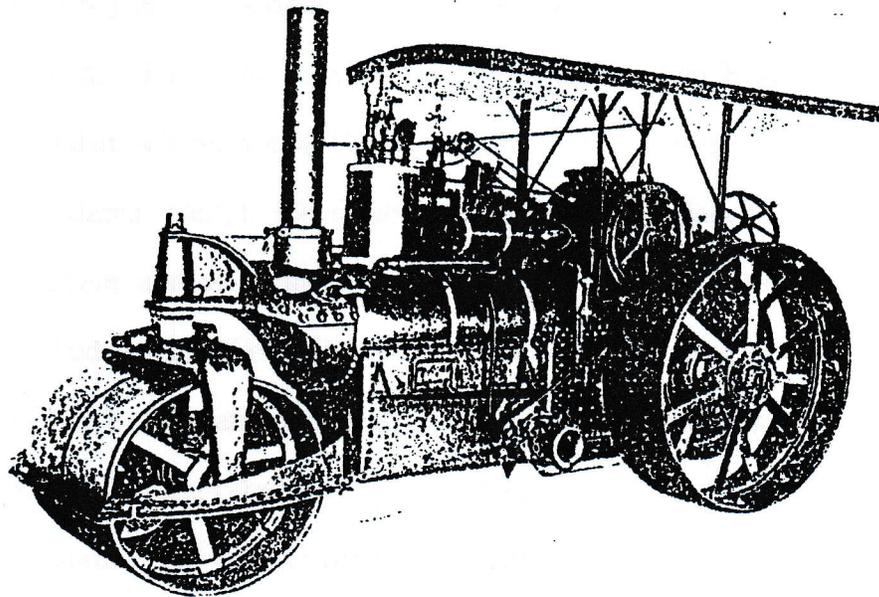
Berbeda dengan roller roda-roda ban karet, yang tekanan per satu satuan permukaan tanah mengikuti tekanan di dalam bannya sendiri (muatan tetap), seolah-oleh boleh dikatakan tetap.

3.3 Alat-alat yang Digunakan Untuk Pematatan

3.3.1 Penggilas Besi Berpermukaan Halus (*Plain Wheel Rollers*)

Penggilas ini adalah yang tertua dari jenis-jenis alat untuk usaha memadatkan tanah/ konstruksi jalan. Jenis compactor ini tidak ekonomis untuk keperluan pematatan tanah sebagai subgrade .

Rollers jenis ini masih juga dapat dipergunakan karena tidak tersedianya rollers dan jenis yang sesuai.



Gambar 3.15. Penggilas besi berpermukaan halus (stoorn wals)

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

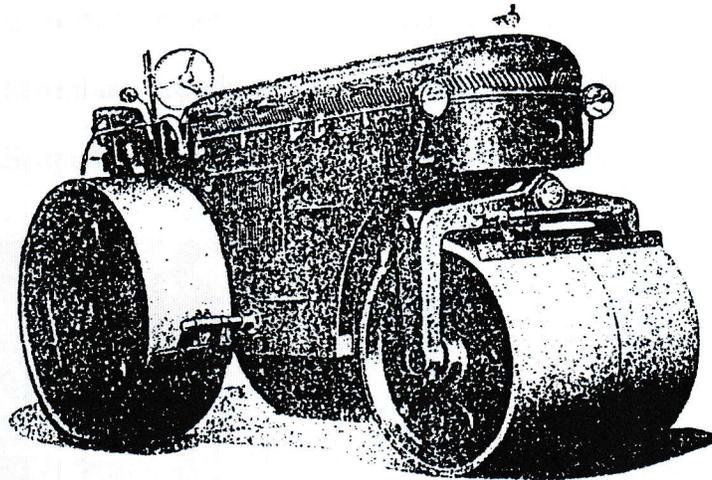
Kekurangan mesin penggilas ini adalah kecepatan jalannya yang demikian rendah; hal ini disebabkan karena design dari rollers ini ialah untuk bagian konstruksi yang memang memerlukan kecepatan yang akan dicapai adalah dari 1 km/jam sampai 5 km/jam, dan dengan demikian dihindari timbulnya gaya-gaya horizontal pada permukaan tanah semaksimal mungkin.

Three Wheel Rollers

Jenis rollers dalam kategori ini dapat dilihat pada gambar 3.15 meskipun sudah banyak mengalami penyempurnaan-penyempurnaan sejak awal abad XX ini, namun tidak banyak perubahan di dalam hakekat kerjanya. Bentuk yang lebih modern dari jenis ini dapat dilihat pada gambar 3.16.

Rollers jenis ini dinamakan *Macadam Roller*, sesuai dengan tujuan rencana pembuatannya, yaitu untuk menggilas padat lapisan-lapisan batu pecah berukuran tertentu di dalam sebuah lapisan konstruksi yang disebut konstruksi Macadam.

Pelindasan efektif dikerjakan oleh roda-roda belakang, mereka kecuali konsentrasi berat alat sebagian besar diberikan padanya, juga lebar rod relatif adalah kecil pula. Pada kebanyakan roller jenis ini, roda-roda belakang dapat diperberat lagi dengan mengisinya muatan tambahan (*ballast*) yang berupa minyak bekas ataupun pasir biasa ; air kadang-kadang juga digunakan untuk keperluan ini, namun tidak dianjurkan karena bahaya karat yang ditimbulkan olehnya.



Gambar 3.16. Three Wheel Roller

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

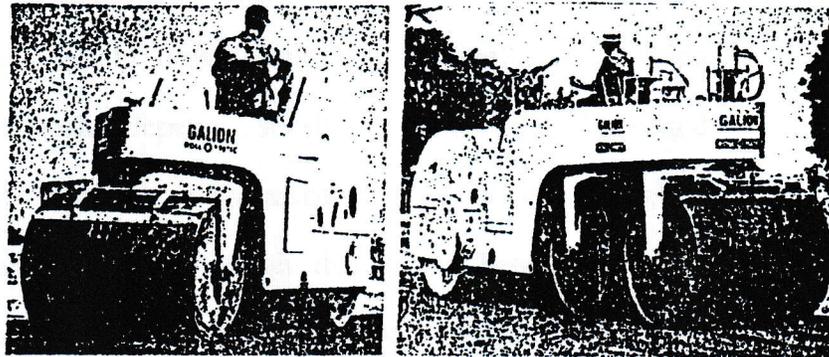
Tekanan yang besar ini diperlukan untuk menekan masuk butir-butir batu pecah ke dalam lapisan konstruksi yang dikerjakan. Geseran antar butir batu-batu pecah memang cukup besar, dan memang itulah sifat yang dikehendaki oleh konstruksi macadam, konsentrasi berat roller serta bidang singgung antara roda dan

permukaan lapisan batu-batu yang tidak terlalu padat susunannya menyebabkan bahwa tekanan diberikan seolah-olah pada masing-masing butir baik yang terkena permukaan roda-roda roller yang relatif jadinya sangat besar.

Penggunaan roller ini sebaiknya dihindarkan untuk pemadatan tanah kohesif, karena tenaga geser yang ditimbulkan oleh roda gerah roller dapat menyobekkan permukaan tanah yang dilindas, sehingga kepadatan homogennya tidak tercapai.

Tandem Roller

Konstruksi roller jenis ini biasanya memiliki roda yang dipasang dalam susunan tandem (berurutan depan dan belakang) dan karena itu dinamakan tandem rollers untuk keperluan-keperluan khusus, maka roda-roda tandem disusun tiga berurutan dan dinamakan 3 axle tandem roller (gambar 3.17.).



Gambar 3.17. Two axle dan Tree axle tandem rolles

Sumber : Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Dengan makin lebarnya roda, bidang singgung antara permukaan tanah dengan roda semakin besar dan tekanan per satu satuan luas permukaan tanah

menjadi semakin kecil sehingga semakin tidak menguntungkan untuk dipergunakan melindas padat dan rata, lapisan-lapisan tipis konstruksi jalan, seperti konstruksi beton aspal.

3.3.2. Penggilas dengan Permukaan Bergigi-gigi (*Tamping Rollers*)

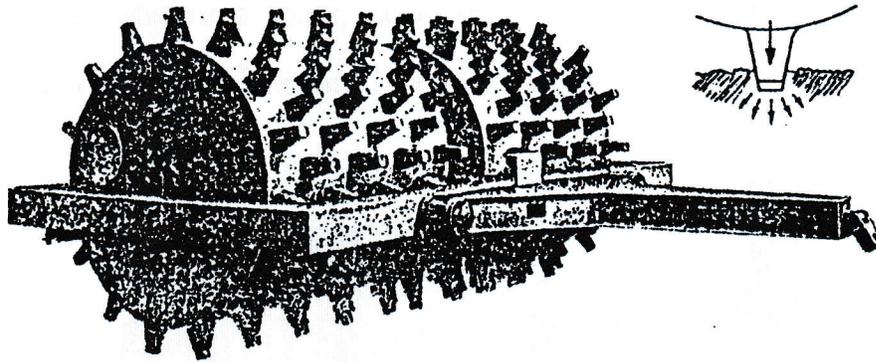
Meningkat kurang berhasilnya pemadatan oleh rollers roda baja permukaan halus karena luasnya bidang singgung (*contact area*), maka orang berusaha menguranginya dengan cara memusatkan tekanan berat roller kepada permukaan-permukaan yang kecil-kecil yang terciptalah jenis roller dari kategori tamping rollers.

Penggilas Kaki Kambing (*Sheepsfoot Roller*)

Carakerja rollers ini ialah dengan menariknya dengan suatu prime mover yang biasanya adalah sebuah buldozer, *crawler mounted*. Maksudnya ialah agar kecepatan gerak tidak terlalu besar ($\text{max} = 6 \text{ km/jam}$) sedang buldozernya sendiri dapat meratakan tanah didepannya sebelum dilindas oleh roller yang ditariknya.

Keuntungan dari memadatkan tanah dengan *sheepsfoot roller*; lapisan tanah dipadatkan mulai dari bawah dan secara berangsur, lapisan-lapisan di atasnya dipadatkan dengan cara yang sama. Dengan demikian telah dieliminasi kekurangan dari jenis roda baja dengan permukaan halus, yang tidak dapat mencapai kedalaman lapisan yang bawah dengan tekanan roda-rodanya.

Kerugiannya ialah, bahwa kecepatan gerak alat ini tidak boleh terlalu besar karena keluarnya kaki dari dalam lubang akan "mengacak" lapisan yang dilindas, dan dengan demikian sukar didapatkan kepadatan homogen.



Gambar 3.18. Kaki baja

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imarn Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

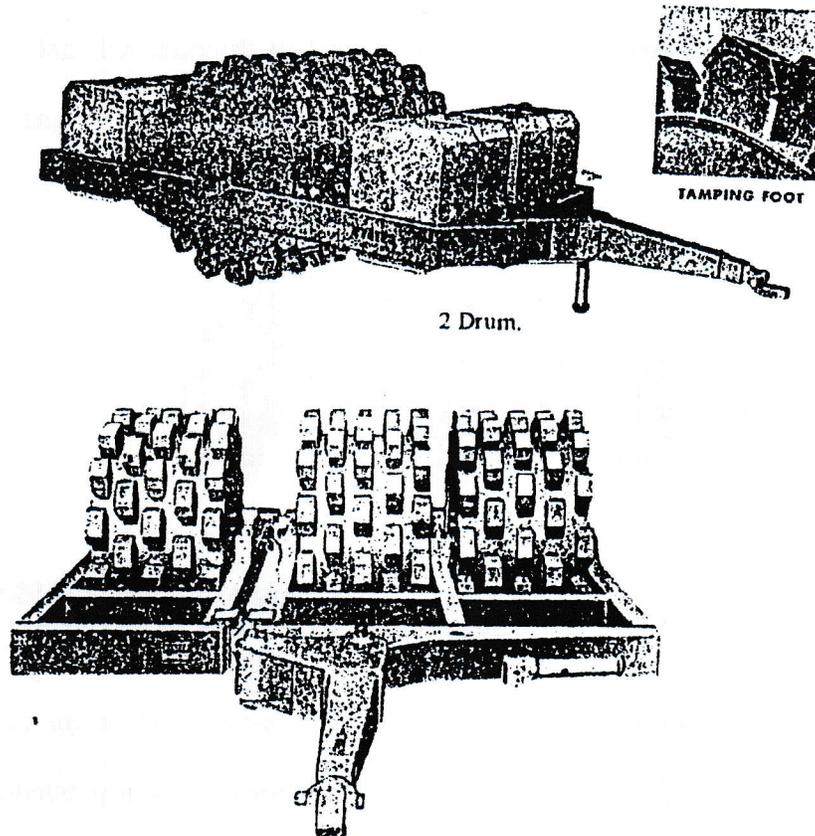
Tamping Roller

Meskipun prinsip dari kerjanya sheepfoot roller adalah sangat baik bagi pemadatan tanah-tanah yang kohesif, bentuk kaki-kaki roller membatasi kecepatan gerak alat dan dengan demikian tidak dapat mendapatkan bentuk kaki yang lain, dengan lebih memperhatikan kemungkinan kecepatan gerak yang lebih tinggi. Sudah barang tentu, keuntungan-keuntungan yang dapat dicapai tidak dapat dihindarkan pengurangan-pengurangan dari keuntungan pada alat yang semula.

Kekurangan yang hendak dihilangkan ialah kelambatan kerja oleh *sheepfoot roller* dengan memberikan bentuk kaki-kaki rollers sedemikian rupa sehingga tidak merusak susunan lapisan tanah, kalau diberikan kecepatan gerak yang tinggi pada roller. Tamping roler seperti Hyster C400b pada gambar 3.19. adalah salahs atu contoh dari usaha dan mengecil ke arah ujungnya, maka masalah kecepatan yang terbatas dapat diatasi.

Namun demikian, luas ujung-ujung kaki merupakan luas bidang singgung antara alat pemadat dengan permukaan tanah menjadi lebih besar dari yang kita

dapati pada sheepfoot roller, pada roller tersebut di atas, didapatkan tekanan pemadatan = 18 kg/cm^2 dengan *coverage* = +36%.



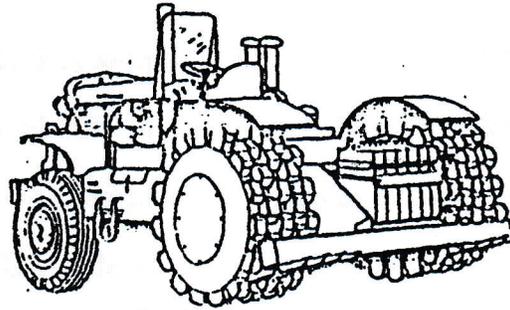
Gambar 3.19. Tamping roller

Sumber : Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Para ahli yang merencanakan roller ini berpendapat bahwa berkurangnya tekanan pada permukaan tanah ini dapat diatasi oleh kecepatan kerjanya ; pada kecepatan sekitar 15 km/jam, maka frekuensi dan penekanan kepada tanah adalah sekitar 800 per menit sehingga boleh dikatakan penekanan kaki-kaki roller kepada tanah ini merupakan suatu tumbukan. Pada sheepfoot roller yang bekerja pada

kecepatan 5 km/jam, frekuensi ini adalah sekitar 350 per menit dan belum berakibat efek tumbukan.

Tamping roller seperti ini biasanya ditarik oleh sebuah wheel traktor yang mampu berjalan dan menarik muatan lebih dari 15 km/jam; kalau kurang dari itu, maka efek yang baik kurang dapat dimanfaatkan.



Gambar 3.20 Hubless conversion.

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Keuntungan dan tamping roller jenis ini ialah, bahwa di dapat dipergunakan pada tanah-tanah granular (non-kohefif), bahkan batu-batuan yang tidak terlalu keras, dapat dilindas hancur olehnya sehingga didapatkan gradasi yang lebih baik dan kepadatan dapat dicapai lebih sempurna.

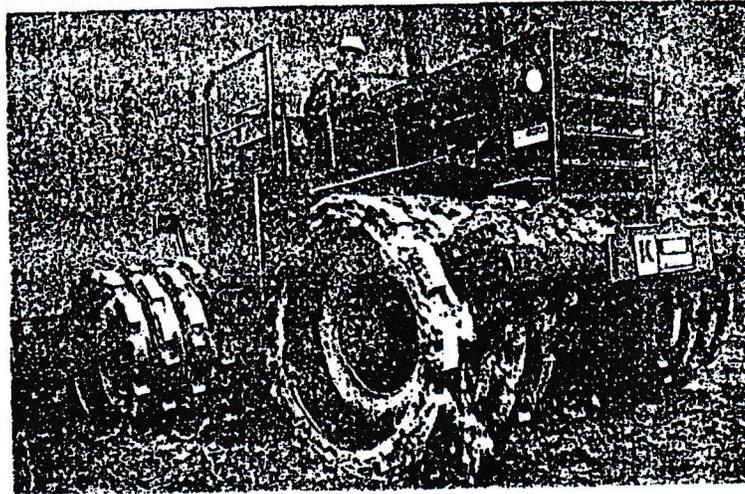
Segmented Wheel Rollers

Pada usaha pemadatan tanah yang dijalankan dengan kecepatan tinggi, tidak diperlukan tekanan statis (kg/cm^2) yang terlalu tinggi seperti yang kita jumpai pada sheepsfoot rollers, maka dibuat orang sejenis tamping roller dengan luas permukaan singgung yang lebih besar, roda-roda roller diberikan kaki-kaki yang merupakan

segmen-segmen yang mempunyai luas permukaan yang sama dengan pangkalnya. Segmented wheel roller ini antara lain dikembangkan oleh *koehring/ buffalofield*, seperti pada gambar 3.21 di bawah (K.550 kompactor).

Prinsip roller ini adalah seperti *hubbles conversion* pada tamping rollers yang dikemukakan pada gbr. 3.20, hanya saja dibuat secara khusus sejak semula, maka keadaanya tentu lebih sempurna. Pada K.550 kompactor dipergunakan traktor dengan 318 HP dan dapat dijalankan sampai 20 km/jam. Berat total dapat mencapai 25 ton dan dapat memberikan tekanan statis sebesar 12 kg/cm^2 . Coverage mencapai 60% luas lintasan dan dapat dipergunakan untuk tanah-tanah kohesif atau setengah kohesif.

Apabila dijalankan pada kecepatan 20 km/jam, maka ditambah dengan efek tumbukan oleh "tamping pads" (kaki-kaki *segmented wheel roller*), maka lapisan tanah biasa setebal 20 cm dapat dipadatkan hanya dalam 5-6 pass. Untuk tanah granular/ non-kohesif, roller ini tidak dapat berhasil dengan baik, khususnya karena oleh kecepatan tinggi, lapisan roller, maka lapisan tanah biasa setebal 20 cm dapat dipadatkan hanya dalam 5 - 6 pass. Untuk tanah granular / non-kohesif, roller ini tidak dapat berhasil dengan baik, khususnya karena oleh kecepatan tinggi, lapisan-lapisan akan teracak berantakan sehingga usaha pemadatan tidak tercapai seperti yang diharapkan.



Gambar 3.21. Segmented Wheel Rollers/Compactor

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Jr. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Apabila bahan yang dipadatkan berupa batu-batu pecah bergradasi, khususnya yang tidak terlalu keras dan dapat menghasilkan debu batu kalau dilindas, maka hasilnya adalah sangat baik; kecepatan pemadatan yang telah dicapai. Mencampur bahan granular dengan tanah yang kohesif (seperti misalnya pasir urug) maka hasilnya akan lebih baik lagi.

3.3.3. Penggilas Ban Karet (*Pneumatik*)

Roda-roda pada rollers jenis ini terdiri dari roda-roda dengan ban karet seperti halnya dengan kendaraan-kendaraan biasa ; oleh karena itu dinamakan *pneumatic tyred rollers*.

Keuntungan-keuntungan dari rollers jenis ini antara lain adalah bahwa luas permukaan singgung antara ban dan permukaan tanah tidak terpengaruh oleh kepadatan lapisan-lapisan tanah yang dilindas (lihat *pressure bulb*). Kecuali itu

rolling dengan cara yang dilakukan dengan alat ini lebih sesuai dengan maksud memberikan olehnya di dalam massa tanah itu, serupa benar dengan yang akan ditimbulkan oleh lalu lintas di kemudian hari.

Pneumatik roller baik sekali untuk keperluan pemadatan tanah-tanah yang kohesif karena dengan alat ini akan terjadi hanya sedikit pemindahan tempat (*displacemant*) dari massa tanah dan pergeseran butir-butir satu dari yang lain terjadi lebih sempurna dan dengan demikian akan berlangsung proses masuknya butir-butir yang bergeser ke dalam rongga udara antar butir.

Proses ini sangat penting di dalam tanah-tanah kohesif, karena ikatan antar abutir demikian kuatnya sehingga tidak dapat tertarik lepas, satu-satunya cara untuk mengadakan perubahan di dalam kedudukan butir-butir tanah satu dengan lainnya dapat dilakukan dengan usaha di lapangan, yaitu dengan menggeserkan butir-butir itu terhadap butir lain yang mengikatnya (tidak dilepaskan, hanya di"luncur"kan saja melewati permukaannya) yang mengakibatkan udara/ air yang ada di dalam massa tanah itu. Sifat ini dapat diperoleh dengan alat pemadat *pneumatic rollers*.

Melindas padat terjadi secara berangsur, yaitu setelah butir-butir tanah itu tergeserkan menyusup ke dalam rongga-rongga udara tadi, pada saat tekanan roda roller berarah vertikal penuh. Udara dan air ini terdorong keluar dari rongga-rongganya oleh penyusupan butir-butir tersebut tadi, dan mudah terjadi karena kesempatan itu memang masih ada (tanah belum terlalu padat, dan luas melebar ke arah samping tidak terlalu besar). Udara dan air yang masih belum sempat ditekan keluar dari rongga-rongga, akan menyebabkan tanah yang sudah termampatkan itu

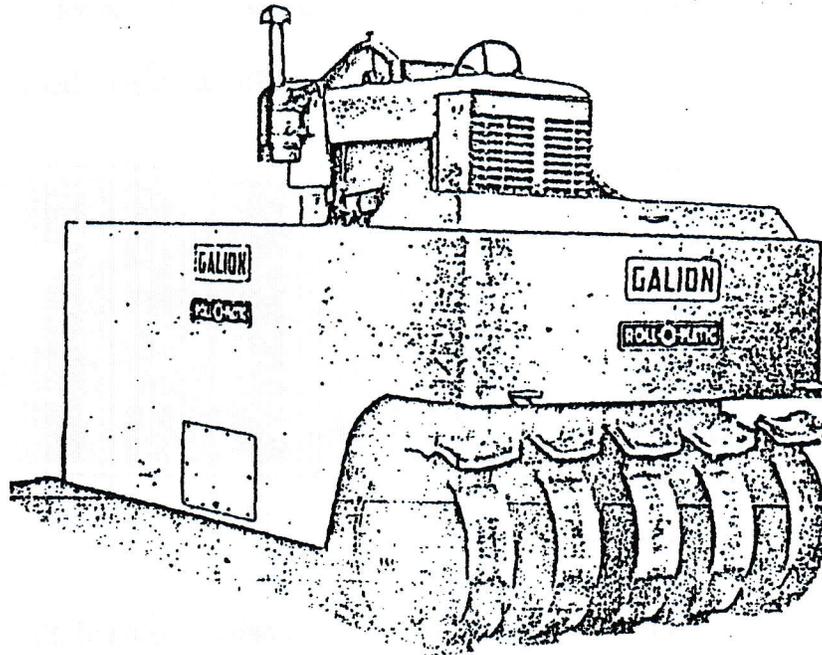
memuai kembali sedikit, dengan pass-pass berikutnya dan secara berangsur-angsur, udara ini dapat ditekan keluar.

Keuntungan lain dari *pneumatic rollers* ialah bahwa tekanan angin (*inflation pressure*) di dalam ban dapat diatur, dan demikian pula tekanan kepada satuan-satuan permukaan tanah. Apabila tanah masih lembek, maka ban-ban agak dikempeskan sehingga bidang singgung dengan permukaan tanah diperbesar dari pengaruh tekanan itu, dapat terasa sampai jauh ke dalam lapisan tanah, makin dicapai kepadatan lapisan, ban-ban tersebut dapat dipertinggi tekanan anginnya, untuk mendapatkan konsentrasi tekanan yang lebih besar.

Berat roller dibuat orang berbagai keperluan pemadatan tanah berkisar antara 15 ton – 50 ton; bahkan ada dibuat yang 100 ton. Pada jenis roller yang berat, yaitu 25 ton ke atas, maka faktor kecepatan jalan roller bukanlah merupakan kriteria yang penting benar. Kecuali jumlah pass yang diperlukan relatif kecil, juga faktor ekonomi merupakan sesuatu yang harus dipertimbangkan.

Oleh karena itu, roller di atas 25 ton biasanya adalah jenis yang ditarik dengan crawler tractor, sedang yang dibawah 25 ton ada yang dapat berjalan sendiri (*self propelled*).

Self propelled pneumatik roller seperti yang terlihat pada gambar 3.22 dibawah ini, adalah alat pemadat yang sangat berguna dalam operasi-operasi pembuatan jalan dan lapangan terbang. Alat ini bermanfaat pada semua tahap konstruksi, mulai dari pemadatan subgrade, sampai pada base course dan bahkan lapisan aspalnya sendiri.



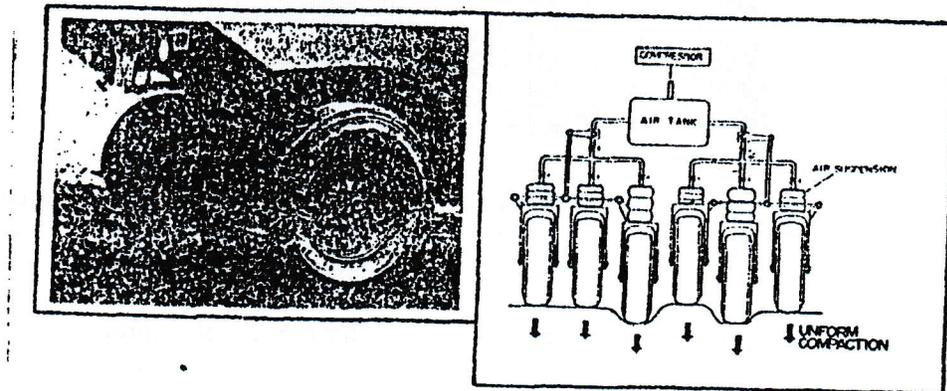
Gambar 3.22. Self Propelled Pneumatic Roller

Sumber : Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, Penerbit PU., 1984

Roller ini di konstruksikan di atas roda-roda yang dipasang pada dua as (= sumbu) yang masing-masing tidak merupakan sebuah batang yang utuh; tiap pasang roda dibuatkan batang as tersendiri, antara lain untuk memudahkan bongkar/pasangannya. Jumlah roda-roda depan dibuat berselisih sebuah dengan roda-roda belakang. Maksudnya agar bagian permukaan tanah yang tidak dilewati roda-roda depan dapat dilindas oleh roda-roda belakang di dalam pass yang sama, sehingga setiap lintasan adalah pass yang sempurna untuk sebuah lebar roller.

Pemasangan pada sebatang sumbu berpasang (dua roda per batang) dimaksudkan agar tidak terjadi muatan yang tidak sama kepada masing-masing roda, yang disebabkan oleh tertahannya muatan roller oleh dua buah roda saja per sumbu,

hal ini dapat terjadi pada permukaan tanah yang tidak rata sehingga ada roda-roda yang menggandul (gambar 3.23)

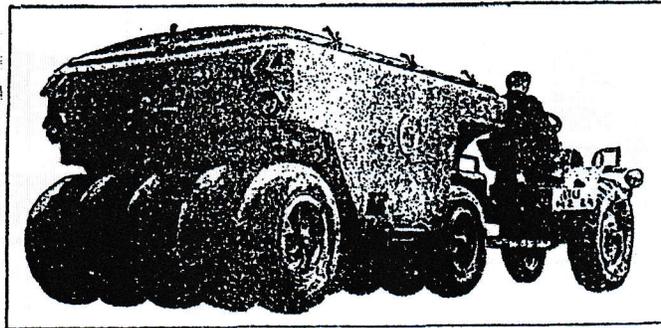


Gambar 3.23. Suspension dan roda-roda untuk membagi rata muatan pada permukaan tanah yang tidak rata

Sumber : Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Pada pneumatik rollers, biasanya dibuatkan tanki-tanki air yang kecuali dipergunakan untuk membasahi roda-roda dengan maksud agar bahan yang dilindas tidak lengket pada ban, juga merupakan ballast sehingga berat alat dapat divariasikan. Variasi dan Gallion roller pada gambar 3.23 adalah dari 4 ton sampai 15 ton. Jumlah ban tergantung dari variasi-variasi ini, dan angka-angka jumlah yang biasa dijumpai adalah lima, tujuh, sembilan, sebelas dan tiga belas.

Apabila daerah yang hendak dipadatkan itu luas sekali, seperti misalnya pembuatan landasan terbang, jalan-jalan raya yang multi lane, urugan-urugan tanah untuk bendungan, dan sebagainya, kadang-kadang lebih menguntungkan untuk mempergunakan pneuniatik rollers yang ditarik (gambar 3.24).



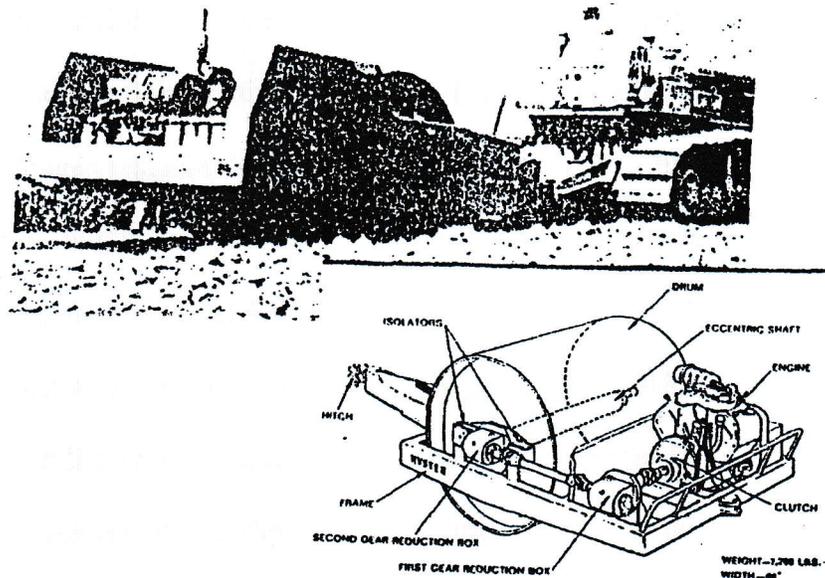
Gambar 3.24 Pneumatic Rollers, 9 wheel, towed

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Jr. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Disamping lebih murah harga pengadaannya, juga pemeliharaannya lebih sederhana karena tidak dilengkapi dengan mesin penggerak sendiri. Apabila medannya luas dan cukup untuk memutar roller ini, maka hasil produksinya besar sekali kalau dibandingkan dengan jenis-jenis roller lainnya untuk keperluan pemadatan.

3.3.4 Vibrating Rollers

Rollers ini diusahakan untuk menambah tekanan statis roller dengan muatan dinamis yang berupa gaya *centrifugal* oleh sebuah bobot yang diletakkan pada sumbu eksentris RPM (frekuensi) yang tinggi yang biasanya diberikan kepada sumbu eksentris ini menimbulkan juga tenaga “*angkatan*” pada saat bobot mencapai titik tertinggi ; dengan demikian, maka terjadi yang disebut “getaran” (vibration) pada roller.



Gambar 3.25 Prinsip kerja towed vibrating rollers

Sumber: Mempersiapkan lapisandasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

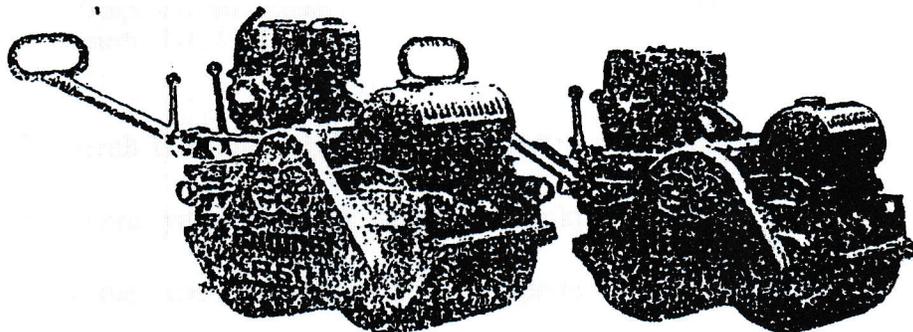
Oleh karena itu, dibuatlah jenis roller yang diklasifikasikan kepada "towed rollers" geteran-getaran yang ditimbulkan pada gandengan antara roller dan kendaraan tariknya.

Prinsip kerja roller (gambar 3.25) ini yaitu sebuah proses eksentrik diputar dengan kecepatan tinggi di dalamroda (drum) roller sehingga menimbulkan getaran-getaran yang pada kedua ujungnya melimpahkan getaran ini kepada drum yang dimaksud.

Pengaruh getaran rollers pada lapisan tanah yang dipadatkan ialah bahwa kaitan antara butir tanah menjadi lepas dan menyusun diri kembali kepada susunan butir yang lebih rapat. Vibrating rollers ini sebenarnya lebih efektif untuk tanah-tanah yang non-kohefif dengan PI (*Plastis Index*) antara 8-12 %.

Untuk tanah-tanah kohesif ($PI > 20\%$) getaran-getaran ini sama sekali tidak berpengaruh karena butir-butir tidak terlepas oleh getaran tersebut, satu-satunya jalan ialah dengan tekanan vertikal melepaskan kohesi yang tinggi itu, tekanan harus cukup besar, untuk itu diberikan vibrating unit kepada tamping roller, yang mengadakan penumbukan berkali-kali kepada sesuatu permukaan yang sama.

Dengan keuntungan-keuntungan efek getaran ini, maka sekarang ini banyak dibuat orang roller ukuran dengan dynamic force yang besar (gambar 3.26). Alat ini (handguided rollers), dapat dipergunakan untuk pekerjaan-pekerjaan kecil seperti pemdatan urugan-urugan kembali galian pondasi bangunan, untuk halaman-halaman serta pekerjaan pembuatan tempat parkir, pemadatan selokan-selokan dan sebagainya. Alat ini relatif lebih murah dibandingkan dengan 3 wheel roller dan dapat bekerja di tempat-tempat yang sulit dijangkau alat lainnya.

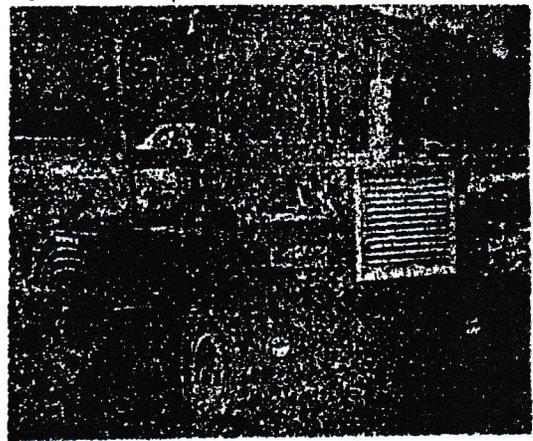
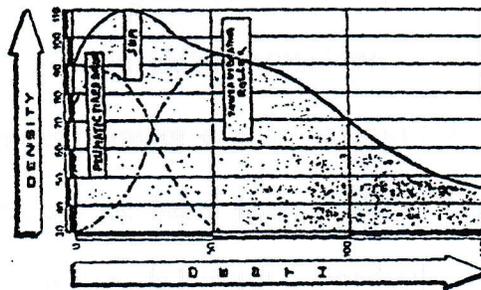


Gambar 3.26 Handguided Vibrating Rollers

Sumber: Mempersiapkan lapisan dasar konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Suatu invention baru dibidang vibrating compactors ini adalah yang disebut Vibro Tyred Rollers, yaitu suatu kombinasi antara vibrating compactor dengan

pneumatic tyred rollers dengan menggunakan segi-segi baiknya dan kedua rollers tersebut. Dianggap bahwa pneumatic tyred rollemya menarik/ mendorong vibrating compactornya (atau sebaliknya).



Gambar 3.27 Vibro Tyred Rollers dan Synergetic Effect

Sumber : Mempersiapkan Lapisan Dasar Konstruksi, Ir. Imam Soekoto, Cetakan Pertama, jilid 2, penerbit PU., 1984

Pengaruh dari alat ini disebut *synergetic effect*, yaitu yang didapatkan dari *pneumatic tyred* yang bergerak segera mengikuti vibrating drumnya ; gerakan memadatkan oleh roda-roda pneumatisnya dipertegas oleh karena bahannya sedang digetarkan itu mengalami pula lindasan dari roda-roda itu.

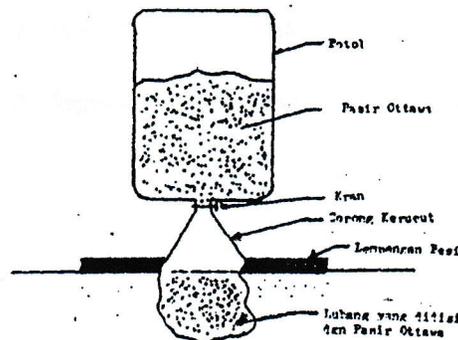
Perlu diperhatikan pengaruh dari vibrating rollernya, yang mencapai optimum compactionnya tidak dipermukaan tanah, melainkan lebih kurang sepertiga dari kemampuan pengaruh dari vibrating rollingnya, sedang pada pneumatic rollernya didapatkan pengaruh pemadatan dekat pada permukaan, kedua pengaruh ini kalau

dijumlahkan (*superposisi*) dinamakan *synergetic effect*, dan lebih baik dari operasi dua alat (*vibrating dan pneumatic roller*) sendiri-sendiri.

3.4 Kontrol Hasil Pemadatan Lapangan

Pengujian di lapangan akan dibutuhkan untuk menentukan apakah spesifikasi untuk kepadatan relatif telah dipenuhi. Karena pada waktu pekerjaan pemadatan, berat isi yang telah ditentukan apakah tercapai atau tidak. Untuk menentukan berat isi di lapangan akibat pemadatan dapat diadakan kontrol hasil pemadatan lapangan dengan prosedur standar biasanya dipakai metode Kerucut Pasir (*Sand Cone Method*) atau metode balon karet (*Rubber Balloon Method*). Adapun prosedur pelaksanaan dengan metode kerucut pasir adalah yang paling umum digunakan.

Kerucut pasir (*sand cone*) terdiri atas sebuah botol plastik atau kaca dengan sebuah kerucut logam dipasang di atasnya. Botol plastik dan kerucut ini diisi dengan pasir ottawa kering bergradasi buruk. Setelah itu berat tabung, kerucut logam dan pasir dalam botol ditimbang ($=W_1$).



Gambar 4.19 Sand Cone (Kerucut Pasir)

Sumber : Joseph E. Bowles, Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis tanah, Penerbit Erlangga. 1991

Kemudian sebuah lubang kecil digali pada permukaan tanah yang telah dipadatkan. Maka setelah kita mengetahui berat tanah basah pada permukaan tanah yang telah dipadatkan. Maka setelah kita mengetahui berat tanah basah digali tersebut (W_2) kita dapat menentukan berat kering tanah (= W_3) sebagai berikut:

$$W_3 = \frac{W_2}{1 + \frac{W(\%)}{100}} \dots\dots\dots(4-7)$$

Dimana:

W = kadar air dalam persen (%)

Setelah lubang digali, maka kerucut dengan botol berisi pasir diletakkan di atas lubang tersebut (gambar 4-19). Pasirnya dibiarkan ke luar dan botol dan mengisi seluruh lubang yang digali tersebut. Kemudian sisa pasir yang terdapat didalam tabung ditimbang (= W_4).

Maka:

$$W_3 = W_1 - W_4 \dots\dots\dots(4-8)$$

Dimana :

W_5 = berat pasir yang mengisi lubang yang digali

Volume lubang yang digali dapat ditentukan sebagai berikut :

$$V = \frac{W_5 - W_c}{\gamma_{d(pasir)}}$$

Dimana :

W_C = berat pasir yang mengisi kerucut saja (kg)

γ_d (pasir) = berat isi kering dari pasir ottawa (kg/cm^3)

Harga –harga W_C dan γ_d (pasir) dikalibrasikan dilaboratorium. Maka berat isi kering hasil pemadatan di lapangan adalah :

$$\gamma_d = \frac{\text{Berat kering dari tanah yang digali}}{\text{Volume lubang}} = \frac{W_3}{V} \dots\dots\dots(3-8)$$

Nilai berat isi kering ini (γ_d (lapangan)) nantinya akan dipakai untuk memperoleh spesifikasi dari pemadatan relatif, dengan perbandingan antara berat isi kering di lapangan banding dengan berat isi kering di laboratorium.

3.4.1 Korelasi Hasil Uji Pemadatan di Lapangan terhadap Hasil Uji Pemadatan di Laboratorium

Telah kita ketahui bahwa tujuan pemadatan adalah untuk meningkatkan sifat-sifat teknis suatu jenis tanah. Spesifikasi berat isi kering sebesar 90 sampai 95% dari berat isi kering maksimum tanah, harus dicapai untuk kepadatan lapangan. Berat isi kering maksimum diperoleh dari percobaan dengan uji pemadatan standar maupun modifikasi di laboratorium.

Spesifikasi dari pemadatan relatif R (relative compaction) adalah sebagai berikut :

$$R(\%) = \frac{\gamma_d(lap)}{\gamma_d(maks)lab} \times 100\% \dots\dots\dots(3-9)$$

Pada pemadatan tanah berbutir, spesifikasi pemadatan diberikan dalam bentuk kerapatan relatif D_r (relatif density). Kerapatan relatif dan pemadatan relatif tidak sama. Definisi dari D_r adalah sebagai berikut :

$$D_r = \frac{\gamma_d(lap) - \gamma_d(maks)}{\gamma_d(maks) - \gamma_d(min)} \times \frac{\gamma_d(maks)}{\gamma_d(lap)} \dots\dots\dots (3-10)$$

Dengan membandingkan persamaan (3-9) dan (3-10) dapat ditentukan bahwa :

$$R = \frac{R_0}{1 - D_r(1 - R_0)} \dots\dots\dots (3-11)$$

Dimana :

$$R_0 = \frac{\gamma_d(min)}{\gamma_d(maks)} \dots\dots\dots (3-12)$$

Dimana : R_0 = Perbandingan antara berat isi kering min dan berat isi kering Max.

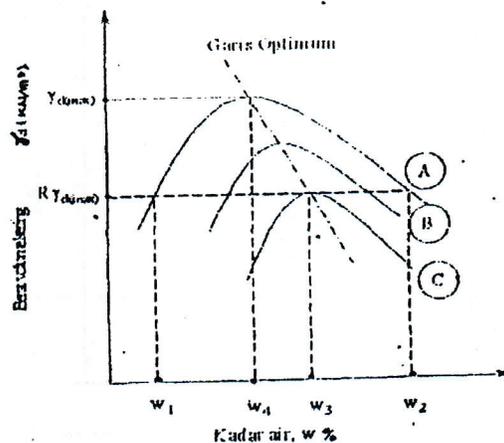
Berdasarkan pengamatan terhadap 47 buah contoh tanah. Lee dan Sigh (1971) memberikan korelasi antara R dan D_r dari tanah berbutir :

$$R = 80 + 0,2 D_r \dots\dots\dots (3-13)$$

Spesifikasi untuk pemadatan di lapangan dengan memakai pemadatan relatif ataupun kepadatan relatif adalah produk spesifikasi yang terakhir. Para kontraktor masih diharapkan dapat mencapai (atau) melebihi harga berat volume kering minimum kering (tertentu), tanpa memperdulikan jenis prosedur lapangan yang dilakukan untuk pemadatan tersebut. Kondisi pemadatan yang paling ekonomis dapat diterangkan pada gambar 3.29 (dengan anggapan bahwa penetapan kadar air

bukan merupakan parameter yang penting setiap W di dalam zona B yang akan menghasilkan efisiensi pemadatan yang maksimum). Terdapat tiga kurva kepadatan kualitatif untuk tanah yang sama tetapi usaha pemadatan yang berbeda.

Kurva-kurva A, B, C adalah kurva pemadatan untuk tanah yang sama tetapi dengan usaha pemadatan yang berbeda. Misalkan dapat dicapai dengan peralatan yang ada. Misalkan pula bahwa berat volume kering minimum yang harus dicapai adalah γ_d (lapangan) = $R \gamma_d$ (maks). Untuk mencapai syarat tersebut, kadar air harus berkisar antara W_1 dan W_2 . Akan tetapi, sebagaimana terlihat pada kurva pemadatan c, harga γ_d (lapangan) yang dibutuhkan dapat juga dicapai dengan usaha pemadatan yang lebih rendah pada suatu kadar air $W = W_3$.



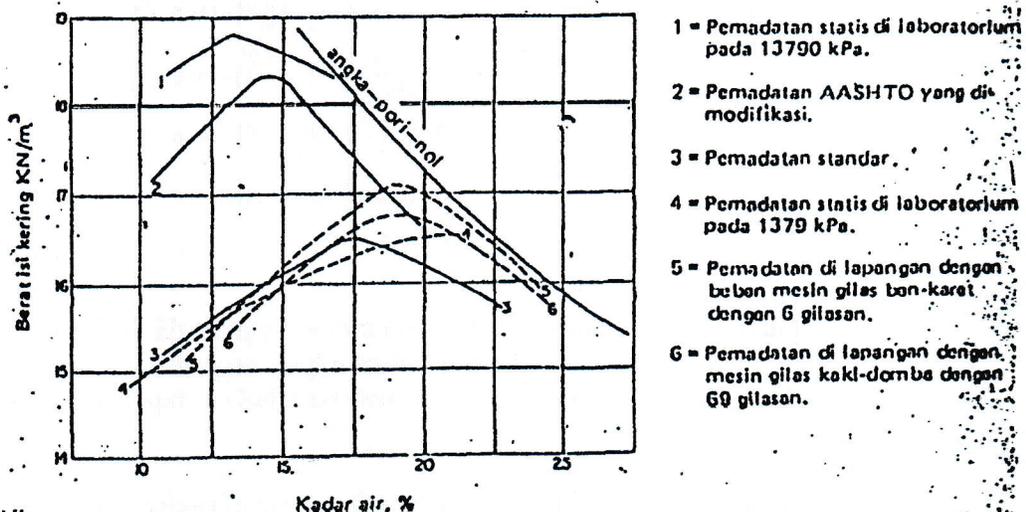
Gambar 3.29 Kurva berat isi kering vs kadar air yang memperlihatkan kondisi kepadatan di lapangan yang paling ekonomis

Sumber : Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M. Das, Penerbit Erlangga.

Pada kenyataannya di lapangan, harga γ_d (lapangan) = $R \gamma_d$ (maks) tidak dapat dicapai dengan usaha pemadatan yang rendah tersebut. Jadi, harus digunakan

peralatan yang menghasilkan usaha yang lebih tinggi (dan usaha pemadatan c). Kurva pemadatan B mewakili keadaan tersebut. Sekarang terlihat pada gambar 3.29, bahwa kadar air yang paling ekonomis diantara W_3 dan W_4 . Harap diingat bahwa $W = W_4$ adalah kadar air optimum untuk kurva A merupakan usaha pemadatan terbesar.

Sayangnya, seringkali kita suka mendapatkan perbandingan langsung antara tanah yang dipadatkan dengan metode lapangan dan dengan metode laboratorium, seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.30 bahwa terdapat perbedaan kadar optimum untuk setiap metode, yang pada kenyataannya berat isi kering juga tergantung pada metode yang dipakai.



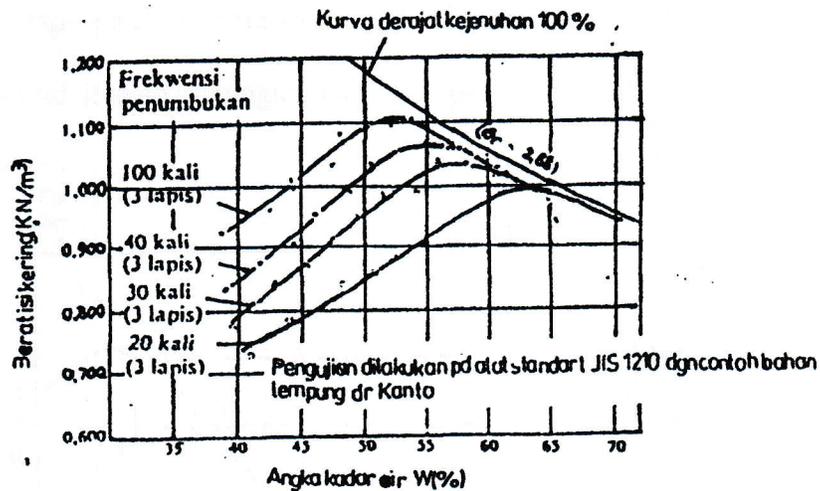
Gambar 3.30. Perbandingan antara berat isi di lapangan dan di laboratorium untuk tanah yang sama

Sumber : Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik (Mekanika Tanah), Braja M. Das, Penerbit Erlangga.

3.4.2 Energy yang Dibutuhkan Untuk Pemadatan

Pada pengujian suatu bahan yang dilakukan dengan berbagai variasi jumlah penumbukan (besarnya energy yang diberikan) menunjukkan bahwa kepadatan dan kadar air optimum bahan tersebut biasanya berubah pula (periksa gambar 3.31).

Jika pemberian energi bahan tersebut ditingkatkan, berat isi keringnya akan meningkat, sedang kadar air optimumnya akan bergerak ke arah yang lebih kering.



Gambar 3.31 Hubungan antara besarnya energi yang diberikan pada pemadatan dengan angka kadar air baban tanah

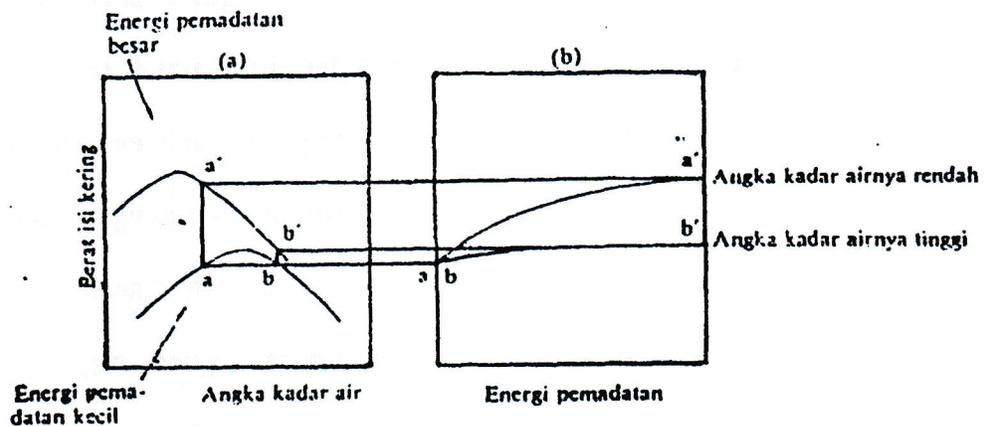
Sumber : Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M. Das, Penerbit Erlangga.

Pada pelaksanaan pembangunan suatu konstruksi, apabila diinginkan berat isi timbunan yang lebih baik, dibutuhkan energi pemadatan yang lebih besar, yang biasanya dengan menggunakan alat-alat berat.

Pada suatu timbunan dengan tanah yang banyak mengandung butiran kasar, apabila energi pemadatan ditingkatkan, maka kekuatan gesernya meningkat tetapi permeabilitasnya menurun, hal mana berarti bahwa pengujian-pengujian pemadatan

di lapangan pelaksanaan, maka supaya diingat agar tingkat-tingkat pemadatan yang dapat dilakukan di laboratorium supaya disesuaikan sedemikian rupa sehingga dapat pula dilakukan pada kondisi dilapangan pelaksanaan.

Akan tetapi peningkatan energi pemadatan yang diberikan pada suatu bahan tanah tertentu tidaklah selalu diimbangi oleh peningkatan berat isinya, terutama pada tanah yang berkadar air tinggi, dimana walaupun energi pemadatan terus menerus ditambah, tetapi setelah mencapai tingkattingkat tertentu berat isi bahan yang bersangkutan tidak akan meningkat lagi, lihat pada gambar 3.32.



Gambar 3.32. Hubungan antara besarnya energi pemadatan dengan angka kadar air suatu contoh bahan

Sumber : Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M. Das, Penerbit Erlangga.

Untuk mengetahui jumlah energi yang diberikan, pada saat melaksanakan pemadatan bahan tanah, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$E_c = \frac{W.H.N.L}{V} \dots\dots\dots(3-14)$$

Dimana:

E_C = Jumlah energi pemadatan (kg/cm^2)

W = Berat palu (kg)

H = Tinggi jatuh palu (cm)

N = Frekuensi penumbukan pada setiap lapisan

L = Jumlah lapisan

V = Volume cetakan (cm^3)

Biasanya pelaksanaan pemadatan di lapangan untuk bahan tanah berbutir kasar dipadatkan dengan mesin giling yang berat-berat, karenanya bahan-bahan tersebut masih harus diuji lagi dalam skala yang lebih besar disamping pengujian laboratorium tersebut. Mengingat terdapatnya perbedaan-perbedaan hasil antara pengujian-pengujian di laboratorium dengan pengujian di lapangan pelaksanaan seperti diuraikan terdahulu.

Dengan menggunakan persamaan (3-14), energi pemadatan untuk masing-masing percobaan proctor standar dan proctor dimodifikasi adalah sebagai berikut :

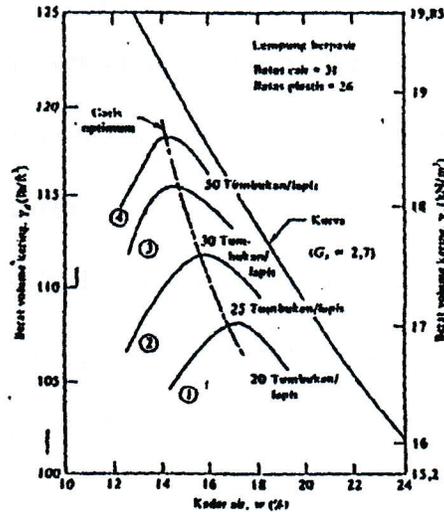
- Metode Proctor Standar :

$$E_C = \frac{(25).(3).(5,5).(1)}{1/30} = 12375 \text{ ft-lb} / \text{ft}^3$$
$$= 592,5 \text{ k/m}^3$$

- Metode Proctor dimodifikasi

$$E_C = \frac{(10 \text{ lb}).(1.5 \text{ ft/jatuhan}).(25 \text{ tumbukan/ lapis}).(5 \text{ lapisan})}{1/30 \text{ ft}^3}$$
$$= 592,5 \text{ k/m}^3$$

Untuk mengetahui besarnya perbedaan usaha pemadatan, dapat dilihat pada gambar 3.33, yaitu kurva pemadatan untuk lempung berpasir dengan usaha pemadatan yang berbeda.



Gambar 3.33 Pengaruh energi pemadatan pada pemadatan suatu lempung berpasir
 Sumber: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M.Das, Penerbit Erlangga, hal 242

Dengan menggunakan persamaan 3.14, energi pemadatan untuk masing-masing percobaan pada gambar 3.32, dapat dicari sebagai berikut:

Nomor Kurva pada gbr 4-24	Jumlah tumbukan per lapis	Energi pemadatan (ft-lb/ft ³)
1	20	9900
2	25	12375
3	30	14850
4	50	24750

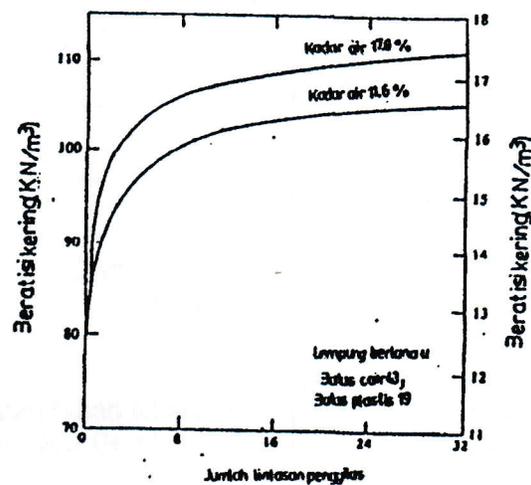
Dari tabel di atas dan gambar. 3.33 dapat ditarik kesimpulan:

- Berat isi kering maksimum tanah hasil pemadatan akan bertambah bila energi pemadatan bertambah.

- Sedangkan kadar air optimum menurun bila energi pemadatan bertambah.

Untuk pemadatan di lapangan, usaha pemadatan dapat dilihat melalui banyaknya jumlah gilasan. Penggilasan mula-mula dilaksanakan pada bagian sebelah bawah dan lift. Berat isi kering dari tanah berubah menurut banyaknya jumlah lintasan penggilas. Tingkat pemadatan tanah berkurang menurut kedalaman karena tekanan yang diberikan pada permukaan tanah berkurang menurut kedalamannya.

Kurva kepadatan tanah (gambar. 3.34), terhadap jumlah lintasan penggilas pada tanah tanah lempung berlanau. Dengan makin bertambahnya jumlah lintasan penggilas, maka berat isi kering dari tanah pada kadar air tertentu akan meningkat. Umumnya kira-kira 10 sampai 15 lintasan secara ekonomis akan dapat dicapai berat isi kering maksimum.

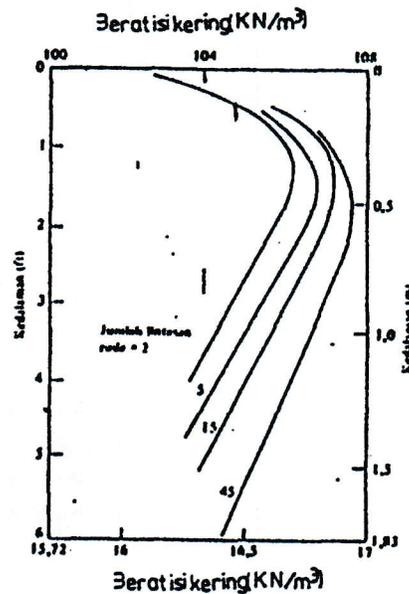


Gambar 3.34 Kurva kepadatan tanah lempung berlanau

Sumber: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik (Mekanika Tanah), Braja M.Das, Penerbit Erlangga, hal 242

Gambar di atas, menunjukkan hubungan antara berat isi kering dan jumlah lintasan penggilas tiga roda dengan berat 9,5 ton (84,5 KN), bilamana tebal lapisan tanah lepas yang dipadatkan adalah inchi (228,6 mm) dengan kadar air yang berbeda.

Variasi berat isi tanah terhadap kedalaman tanah dapat dilihat pada gambar 3.35, dimana tanah adalah tanah pasir bergradasi buruk, harga berat isi kering dari tanah meningkat dengan bertambahnya jumlah lintasan penggilas, laju kenaikan berat isi kering secara berangsur-angsur akan berkurang setelah kira-kira 15 lintasan.

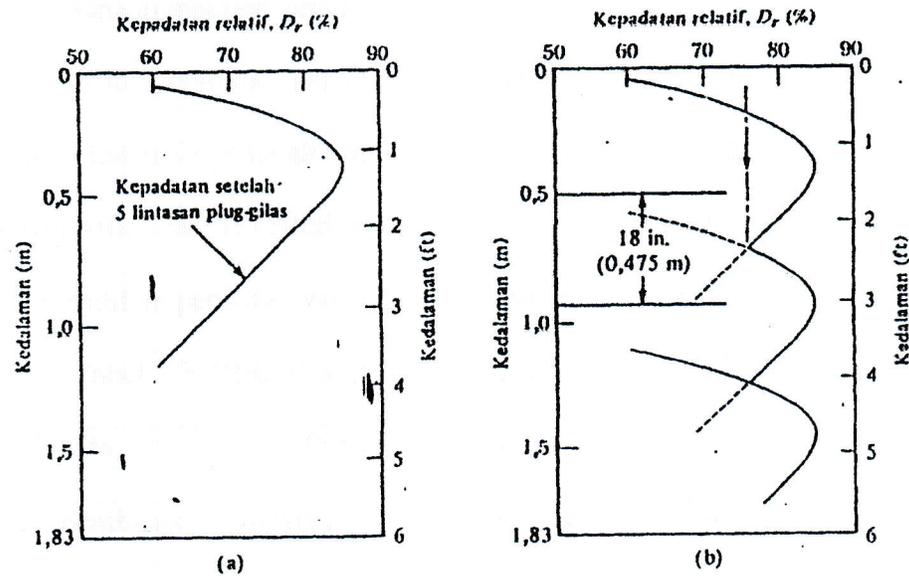


Gambar 3.35. Pemadatan tanah untuk tanah pasir dengan penggilas getar.

Sumber: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M.Das, Penerbit Erlangga, hal 242

Berat isi kering, juga ekuivalen dengan kepadatan relatif (D_r - nya) mencapai harga maksimum pada kedalaman kira-kira 1,5 ft (0,5 m) dan berangsur-angsur berkurang pada kedalaman yang lebih dangkal.

Pada gambar 3.35 di atas, pemadatan dilaksanakan dengan penggilas getar dimana getaran yang dihasilkan oleh beban eksentris yang berputar pada silinder/drum. Berat penggilas 12,5 kips (55,6 KN) dan diameter drum adalah 47 inchi (1,19 m). Tebal lift diusahakan sebesar 8 ft (4,44 m).



Gambar 3.36. Perkiraan tebal lapisan pemadatan untuk mendapatkan kepadatan relatif minimum yang disyaratkan sebesar 75 % dengan menggunakan lima lintasan penggilas

Sumber: Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis (Mekanika Tanah), Braja M. Das, Penerbit Erlangga

Bila hubungan antara kedalaman dan kepadatan relatif (berat isi kering) untuk suatu jenis tanah pada suatu lintasan tertentu dapat diketahui, maka dengan mudah ketebalan untuk tiap-tiap lift dapat ditentukan lihat (gambar. 3.36).

3.4.3 Pemilihan Peralatan Pemadatan

Pemilihan peralatan pemadatan tergantung kepada keadaan tanah di lapangan dan kemudahan kepadatan yang diinginkan. Masing-masing peralatan pemadatan mempunyai spesifikasi tersendiri yang memiliki kelebihan dan kekurangan baik dalam pelaksanaan maupun dengan hasil yang dicapai.

Selain itu pemilihan peralatan pemadatan masih ditentukan oleh jenis tanah seperti tanah kohesif dan tanah non kohesif. Karena untuk masing-masing jenis tanah mempunyai sifat dan karakteristik yang berbeda pada saat dilakukan pemadatan sehingga pemilihan peralatan yang tepat akan turut memberikan hasil yang maksimal.

Tabel 3-3. Pemilihan peralatan terhadap pengaruh jenis tanah.

Metode	Peralatan mesin gilas	Tanah
Tekanan – pembatas (confinent) getaran	Mesin penggilas beroda halus Mesin gilas kaki domba	Tanah tidak kohesif
Meraemas (kneading)	Mesin gilas beroda karet	Tanah kohesif

Sumber : Sifat-sifat dan Geoteknis Tanah, Joseph E. Bowles, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1991.

BAB IV

APLIKASI PENGARUH PEMADATAN TERHADAP SIFAT DAN KARAKTERISTIK TANAH

Pada tugas akhir ini dibuat aplikasi pemadatan tanah, yaitu untuk tanah kohesif dan tanah non kohesif dimana data-data untuk masing-masing jenis tanah diambil dari data percobaan pada proyek yang berbeda.

4.1 Pemadatan pada tanah non – kohesif

Data-data diperoleh dari data percobaan pada proyek peningkatan jalan Medan – Marelan Tanah 600 – Batas (Sumber data dari PU. Bina Marga). Tanah seberat 100 KN (berat isi tanah 1600 kg/m^3) digali dari sebuah lubang yang kemudian ditutup lagi dengan tanah lain yang mempunyai massa jenis butiran = 2,698. Data-data dari tanah pengisi ini seperti yang terlihat pada lampiran (1 s/d 6) sebagai berikut:

- Ukuran butiran

Ukuran ayakan (inchi)	Lolos Ayakan (%)
3/8	30,71
# 4	26,48
# 10	22,66
# 40	11,64
# 200	2,07

- Atterberg Limit

Batas plastisitas	Persen (%)
LL	NP
PL	NP
PI	NP

- Menurut sistem klasifikasi AASTHO tanah tersebut termasuk pada jenis fragmen batuan. Kerikil dan pasir
- Data dari hasil pemadatan standar pada tanah pengisi ini adalah :

volume cetakan (cm ³)	Berat tanah basah Dalam cetakan (gr)	Kadar air (%)
2124	4485	4,20
2124	4752	6,43
2124	4870	8,14
2124	4884	10,34
2124	4774	12,28

Jika pemadatan tanah pengisi ini adalah untuk mencapai 100% massa jenis kering maksimum dalam test standar :

- Berapa derajat kejenuhan maksimum yang diizinkan
- Berapa KN tanah pengisi yang dibutuhkan pada derajat kejenuhan tersebut
- Berapa persentase kadar udara ketika tercapai kadar air optimum.

Penyelesaian

- Berat isi basah tanah (γ)

Dari data pemadatan dapat dicari berat isi basah tanah (γ) dengan persamaan

(4-1) :

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

$$\gamma_1 = \frac{4482}{2124} = 2,110 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_2 = \frac{4725}{2124} = 2,225 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_3 = \frac{4870}{2124} = 2,293 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_4 = \frac{4884}{2124} = 2,299 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_5 = \frac{4774}{2124} = 2,248 \text{ gr/cm}^3$$

➤ Berat isi kering tanah γ_d

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{W(\%)}{100}}$$

$$\gamma_{d1} = \frac{2,110}{1 + \frac{4,20}{100}} = 2,025 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_{d2} = \frac{2,225}{1 + \frac{6,43}{100}} = 2,090 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_{d3} = \frac{2,293}{1 + \frac{8,14}{100}} = 2,120 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_{d4} = \frac{2,293}{1 + \frac{10,34}{100}} = 2,084 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_{dl} = \frac{2,248}{1 + \frac{12,28}{100}} = 2,002 \text{ gr/cm}^3$$

➤ Derajat kejenuhan maksimum (Sr)

$$\gamma_{d(\text{maks})} = 2120 \text{ gr/cm}^3, \text{ ambil } 1\text{m}^3 \text{ tanah ini, } W_{s(\text{berat butir})} = 2120 \text{ kg}$$

$$V_s = \frac{2120}{G_s \times \gamma_w} = \frac{2120}{2,689 \times 1000} = 0,786 \text{ m}^3$$

$$V_v = 1 - 0,786 = 0,214 \text{ m}^3$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \rightarrow w = 8,14 \%$$

$$W_w = \frac{w \times W_s}{100} = \frac{8,14 \times 2120}{100} = 172,568 \text{ kg}$$

$$V_w = \frac{172,568}{1000} = 0,172568 \text{ m}^3$$

➤ Persentase kadar udara (a) ketika tercapai kadar air optimum

$$V_a = 1 - 0,172568 - 0,786 = 0,041 \text{ m}^3$$

$$a = \frac{0,041}{1} \times 100\% = 4,143\%$$

➤ Jumlah tanah baru yang dibutuhkan :

$$\begin{aligned} \text{Berat isi tanah} &= W_w + W_s \\ &= 172,568 + 2120 = 2292,568 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

$$\text{Berat tanah baru} = 100 \times \frac{2292,568}{1600} = 143,286 \text{ KN}$$

➤ Garis zero air void (γ_{zav}) dapat dihitung sebagai berikut

$$\gamma_{zav} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + w \cdot G_s} = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}}$$

$$\gamma_{zav(1)} = \frac{1000}{4,2\% + \frac{1}{2,698}} = 2423 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{zav(2)} = \frac{1000}{6,43\% + \frac{1}{2,698}} = 2299 \text{ kg/m}^3$$

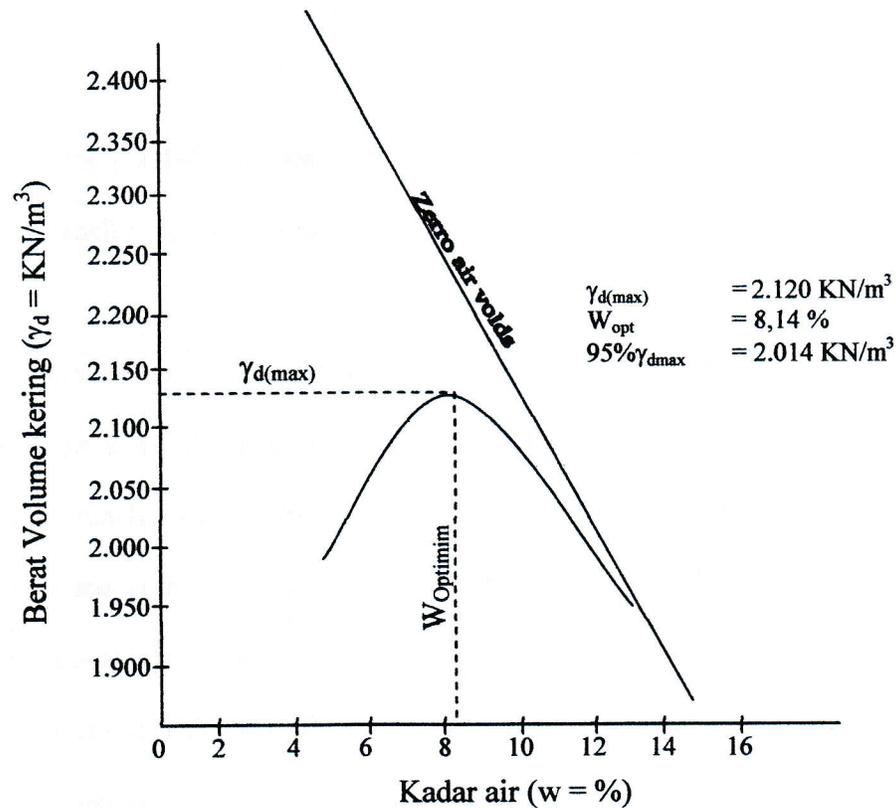
$$\gamma_{zav(3)} = \frac{1000}{8,14\% + \frac{1}{2,698}} = 2212 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{zav(4)} = \frac{1000}{10,34\% + \frac{1}{2,698}} = 2109 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{zav(5)} = \frac{1000}{12,28\% + \frac{1}{2,698}} = 2026 \text{ kg/m}^3$$

$$S_r = \frac{V_w}{v_v} = \frac{0,172568}{0,214} = 0,81 = 81\%$$

➤ Kemudian harga γ_d ini dapat digambarkan pada sebuah grafik terhadap berat isi kering maksimum dan kadar air optimum sebagai berikut:



Gambar 4-1 Berat isi kering maksimum vs kadar air optimum

4.2 Pemadatan pada tanah Kohesif

Data-data diperoleh dari data percobaan pada proyek peningkatan jalan Medan Tenggara.

Tanah seberat 100 KN (berat isi tanah 1600 kg/m³) digali dari sebuah lubang yang kemudian ditutup lagi dengan tanah lain yang mempunyai massa jenis butiran = 2,57. Data-data dari tanah pengisi ini seperti yang terlihat pada lampiran (1 s/d 6) sebagai berikut :

BAB.IV PENUTUP

Dari uraian dan pembahasan penulisan diatas penulis dapat memberikan suatu kesimpulan adalah sebagai berikut:

1. Suatu tanah yang mempunyai struktur tanah yang asli bila dipadatkan dilapangan akan dipengaruhi oleh nilai krateristik fisik tanah antara lain., berat isi tanah, volume dan nilai angka pori, sedangkan karakter tanah yang dipengaruhi oleh proses pemadatan adalah nilai daya dukung pengurunan serta laju konsolidasi.
2. Usaha pemadatan dan energi pemadatan adalah tolak ukur energi mekanis terhadap suatu massa tanah.
 - a. Pada ,tanah kohesif akan diperoleh kepadatan yang baik dengan penematic tyred roller, karena dengan alat ini proses masuknya butir-butir tanah yang tergeser kedalam rongga akan lebih sempurna.
 - b Pada tanah non-kohesif efektif bila dipadatkan dengan virbrating roller karena akibat getarannya kaitan antara butiran tanah menjadi lepas kareana menyusun kembali yang lebih rapat.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Anonim (1997) "Indonesian Highway Capacity Mananuaql" Republik Indonesia, Dirktorat Jenderal Bina Marga Jakarta.
- Ashley, Ca, (1994) : "Trffic And Highway For Devolevment" 'Blackwell Scientific Publications.
- Azwar Saifuddin (2003), Metode Penelitian , Edisi Kesatu , Yokyakarta, Pustaka Pelajar.
- Budi,(1999),*Pembangunan Kota, Tinjauan Regional Dan Lokal*, Penerbit Pustaka Sinar Harapan Jakarta
- Kadiyali, L.R, (1973), "Traffic Engineering And Transfortation Planning" Khanna Publishers.
- Macmillan (1991),"Underwood RT. Geometric Design Of Roads ,Australia
- Mannering (2000) Fed L.Walter P.Kilare "Principles Of Highway Et Traffic Analysis, Jhon ,W.
- Makalah Simposium (1988) Porum Studi Transportasi Perguruan Tinggi, Penerbit ITB, Bandung.
- Miller,Gt (1985) "Living Inthe Environment An Intruduction To Environmetal Science 4th Ed.Wadsworth Publishing Company Inc, Belmont, California.
- Mannering Fed L, Walter, Pkilareski (1998) " Prncipel of Highway Engineering And Traffic Analysis :John Wiley & Sons Inc.
- Moestikahadi , S (2000) "Pencemaran Udara Penerbit , ITB , Bandung.