



PENINGKATAN DAYA DUKUNG TANAH DASAR DENGAN TEKNIK PEMADATAN DINAMIS

M. Suherman

RINGKASAN

Pemadatan dinamis merupakan salah satu cara dari metode-metode perbaikan tanah lunak yang sering disebut konsolidasi dinamis atau penumbukan.

Pemadatan tanah dengan penumbukan berat, yaitu menjatuhkan beban berat pada permukaan tanah. Metode ini bertujuan menambah kekuatan geser tanah dan mereduksi penurunan yang terjadi di bawah struktur.

Teknik ini telah berkembang sebagai bentuk perbaikan tanah pada areal yang luas serta mencapai kedalaman 30 meter, yang dipelopori oleh Menard (1974).

Bila diterapkan pada tanah jenuh sebagian, maka proses pemadatan tanah pada dasarnya sama seperti halnya dengan pemadatan Proctor di laboratorium.

SUMARRY

Dynamic compaction is one of the soil improvement methods, sometimes referred to as dynamic consolidation or pounding. Soil compaction by heavy tamping involves repeated dropping of heavy weight onto the ground surface.

This method aims to increase the shear strength of the soil and reduce of settlement that will occur under the structure to built at the site.

The technique as developed in its present form for improvement of the large areas to depths of up 30 meters was pioneered by Menard (1974). When applied to partly saturated soils, the dencificationa process is essentially the same as that for impact (Proctor) compaction in laboratory.

I. PENDAHULUAN

Metode perbaikan tanah dengan cara pemadatan dinamis (Dynamic Compaction) adalah melakukan penumbukkan dengan beban berat yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu ke permukaan tanah, agar tanah tersebut menjadi lebih padat.

Metode ini merupakan salah satu alternatif dari beberapa metode perbaikan tanah dasar lainnya, dengan tujuan mengurangi bahaya likuifaksi (liquefaction) atau mempercepat konsolidasi. Lapisan tanah dasar yang tersusun dari lapisan kurang baik seperti pasir halus atau pasir lanauan akan kehilangan daya dukungnya akibat suatu proses meningkatnya tekanan air pori yang berlebihan sewaktu atau setelah gempa terjadi.

Hal ini akan banyak berpengaruh terhadap pondasi suatu bangunan, baik pondasi langsung maupun pondasi tiang, pada saat lapisan tanah pasir sebagai pendukung pondasi mengalami pencairan atau likuifaksi akibat gelombang getar. Dengan demikian maka kerusakan akan terjadi pula pada struktur bagian atas seperti miringnya bangunan ataupun amblesnya badan jalan.

Pemadatan dinamis yang dilakukan dengan maksud menciptakan gaya kejut pada lapis permukaan tanah agar timbul suatu gelombang transien yang kompleks yang dapat merusak ikatan butiran tanah serta dapat pula mengatur kembali posisi partikel-partikel tanah ke arah semula yang lebih padat.

Gelombang transien yang timbul akibat dari gaya kejut yang terjadi pada permukaan tanah, akan menyebar ke dalam lapisan di bawahnya mencapai kedalaman tertentu sehingga pengaruh peningkatan daya dukung tanahpun akan terbatas pada kedalaman tertentu pula.

Pada pemadatan dinamis ini lobang hasil tumbukkan diisi dengan lapisan pasir kasar atau kerikil dan ditumbuk agar masuk ke dalam lapisan tanah dasar, sehingga menjadi tiang-tiang pasir atau tiang kerikil. Tiang ini akan berfungsi sebagai perbaikan tanah dalam peningkatan daya dukung permukaan, di mana beban bangunan dapat ditahan oleh dua komponen yaitu tanah dasar dan tiang-tiang tersebut. Secara umum pemadatan dinamis ini berfungsi sebagai perbaikan tanah meliputi :

- Memperbaiki sifat-sifat mekanik dari tanah yang berada di antara tiang-tiang tersebut, yang disebabkan adanya pemampatan selama atau sesudah penumbukkan
- Memperbaiki drainase dimana tiang-tiang ini berfungsi sebagai vertikal drain.
- Menambah tahanan geser terhadap material yang mengalami pengaruh getaran, dengan tersusunnya partikel baru.

II. PEMADATAN DINAMIS

Pemadatan dinamis ini pada prinsipnya membuat gaya kejut pada permukaan tanah, sehingga menimbulkan gelombang transien (transient wave) yang kompleks pada tanah yang kurang baik.

Metode ini dikembangkan untuk pertama kali oleh ahli geoteknik Perancis, Louis Menard, 1974 yaitu suatu teknik perbaikan tanah dengan cara menjatuhkan beban berat dari suatu ketinggian tertentu ke permukaan tanah dasar dengan berulang kali.

Gelombang transien yang terjadi dari setiap tumbukan terdiri dari gelombang kompresi (Primary Wave), gelombang geser (Shear Wave) dan gelombang permukaan (Rayleigh Wave).

Gelombang kompresi ini akan menyebabkan timbulnya tekanan air pori yang dapat merusak ikatan-ikatan struktur tanah, sedangkan gelombang geser dan gelombang permukaan akan dapat mengatur kembali susunan partikel-partikel tanah menjadi posisi yang lebih rapat (gambar 2).

Metode perbaikan tanah dengan cara pemadatan dinamis ini ada dua macam istilah, yang mana keduanya adalah berprinsip sama.

2.1. Pemampatan Dinamis (Dynamic Consolidation)

Metode pemadatan dinamis dengan cara ini, akan lebih cocok untuk tanah material berbutir kasar seperti tanah nonkohesip, walaupun bisa juga diterapkan untuk tanah kohesip, tetapi mempunyai efektifannya jauh lebih kecil. Proses kepadatan tanah yang dicapai akan sama seperti halnya pada pemadatan proktor di laboratorium. Untuk tanah nonkohesif dalam kondisi jenuh air bahaya likuifaksi dapat berkurang dan proses kepadatannya serupa dengan metode blasting ataupun vibrocompaction. Kedalaman rata-rata tanah yang terpadatkan adalah 10.0 meter dengan menggunakan alat tradisional crawl crane.

2.2. Pendesakan Dinamis (Dynamic Replacement)

Metode pemadatan dinamis dengan cara ini akan lebih cocok pada tanah kohesif dimana tanah tersebut mempunyai tingkat kompresibilitas yang tinggi seperti lempung atau lanau plastis tinggi.

Metode ini merupakan pembuatan tiang-tiang material berbutir kasar yang berdiameter relatif besar yang dimasukkan melalui lapisan tanah lembek hingga mencapai kedalaman lapisan tanah dasar atau kedalaman yang diinginkan.

Penumbukan dilakukan berulang - ulang, sehingga lobang dari hasil penumbukan diisi dengan material pasir atau kerikil yang telah disediakan terlebih dahulu sebelum penumbukan dimulai.

Dengan terbentuknya tiang-tiang material berbutir, maka perbaikan tanah dengan cara ini, disamping dapat meningkatkan daya dukung tanah juga dapat mempercepat proses konsolidasi serta mereduksi besarnya penurunan.

Hasil tumbukan biasanya berupa lobang yang berbentuk persegi atau lingkaran dengan lebar beberapa meter saja, tergantung dari berat penumbuk, jenis tanah permukaan dan banyaknya tumbukan.

Fungsi dari pemadatan dinamis ini, disamping untuk mengurangi bahaya likuifaksi, juga berfungsi sebagai perbaikan tanah, yang berupa tiang pendek dari material berbutir yang sering disebut sand pile atau stone column, tergantung dari material pengisi lobang tersebut di atas.

Bila tiang-tiang dari material berbutir ini berfungsi sebagai penambah daya dukung disebabkan mempunyai modulus deformasi yang lebih besar dari material tanah dasar, maka beban yang bekerja akan lebih terkonsentrasi kepada tiang tersebut.

2.3. Peralatan

Peralatan yang digunakan sangat sederhana yaitu terdiri dari penumbuk dan alat pengangkat (Gbr. 3).

a. Alat penumbuk

Alat penumbuk terdiri dari material baja atau beton atau sel-sel baja yang diisi dengan beton cor atau diisi pasir. Berat penumbuk antara 5.0 sampai 50.0 ton yang dijatuhkan secara bebas dari ketinggian 10.0 m sampai 40.0 meter.

b. Alat pengangkat

Untuk mengangkat penumbuk mencapai ketinggian tertentu diperlukan alat pengangkat, dalam hal ini dapat di gunakan crawl crane atau tripod kaki tiga.

2.4. Pola Pemadatan

Sistem dari pola pemadatan dapat berupa pola bujur sangkar (square pattern) atau pola segitiga sama sisi (triangular pattern).

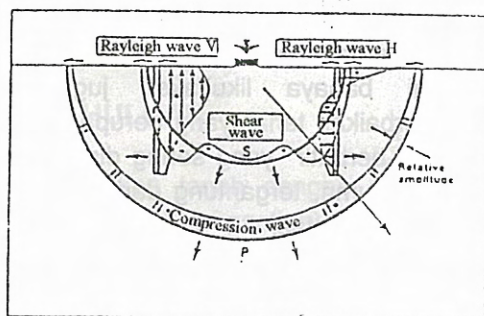
Salah satu cara penempatan dari pemasangan adalah pola segi tiga samasisi dengan lintasan seperti di bawah ini. Lintasan pertama dibuat titik-titik penumbukan yang mencakup seluruh areal yang akan dilakukan pemadatan, dengan jarak antar titik-titik penumbukan dibuat jarak yang paling besar dan membentuk pola segi empat pada seluruh areal yang akan dipadatkan.

Lintasan kedua titik-titik penumbukan ditempatkan pada tengah-tengah kotak di antara empat titik-titik pertama.

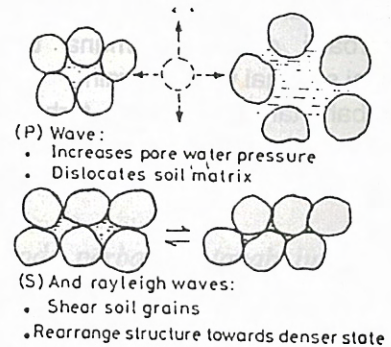
Lintasan ketiga titik-titik penumbukan ditempatkan pada tengah-tengah titik-titik pertama pada jalur garis lurus, baik arah memanjang maupun arah melintang.

Lintasan keempat titik-titik penumbukan ditempatkan pada tengah-tengah kotak antara titik-titik lintasan satu, lintasan dua dan lintasan tiga (gambar 4).

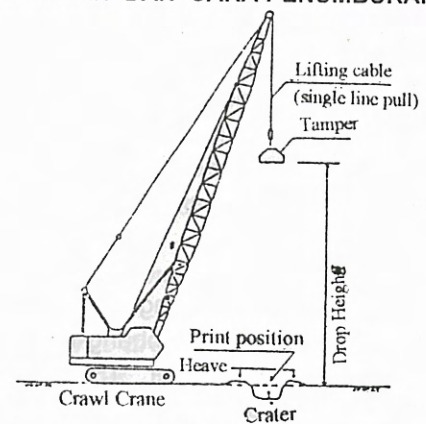
Gambar 1.
RAMBATAN GELOMBANG PADA TANAH SAAT PEMADATAN DINAMIS (GAMBIN, 1979)



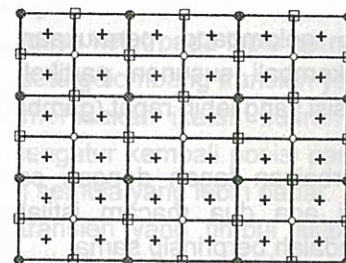
Gambar 2.
GELOMBANG KEJUT SAAT PEMADATAN DINAMIS



Gambar 3.
PERALATAN DAN CARA PENUMBUKAN

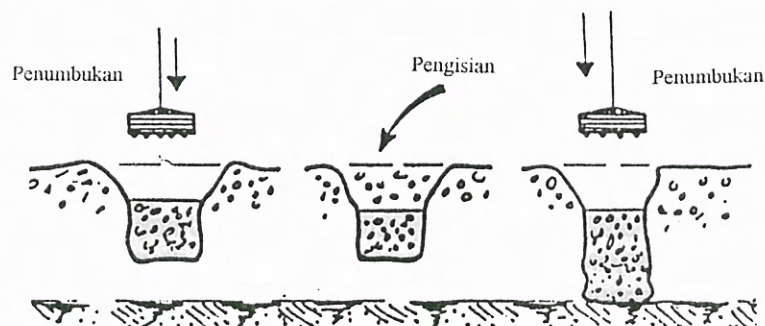


Gambar 4.
POLA PEMADATAN



- Lintasan I □ Lintasan III
- Lintasan II + Lintasan IV

Gambar 5.
PERILAKU PEMADATAN



III. TEORI DASAR

Prinsip utama dari pemadatan dinamis adalah diharapkan bahwa getaran yang berupa gelombang transien agar dapat banyak berpengaruh terhadap lapisan tanah yang lebih dalam.

3.1. Pengaruh Terhadap Kedalaman

Teknik pemadatan dinamis ini disamping memadatkan tanah pada bagian atas, juga dapat berpengaruh terhadap kepadatan lapisan yang lebih dalam, yaitu dengan timbulnya gelombang getar merambat ke segala arah. Dengan kenaikan energi perblow yang diberikan secara komulatif, maka akan bertambah pula tingkat kepadatan tanah yang terjangkau oleh pemadatan dinamis.

Kedalaman tanah yang terpengaruh oleh pemadatan dinamis ini akan dinyatakan dengan perubahan nilai SPT (Test Penetration Standard) atau nilai sondir (Cone penetrometer). Untuk mendapatkan sejauh mana kedalaman tanah yang dipengaruhi oleh pemadatan dinamis ini, L. Menard dan Broise, 1975 memberikan persamaan empiris seperti di bawah ini :

$$D = n \sqrt{W.H} \quad \dots\dots\dots \text{pers 1}$$

dimana :

- D = kedalaman pengaruh pemadatan dinamis (m)
- W = berat penumbuk (ton)
- H = tinggi jatuh penumbuk (m)
- n = faktor efisiensi, berkisar antara 0.3 dan 0.8 (Gambin, 1979)

Leonard dkk (1980) menganalisis tujuh kasus dan menghasilkan persamaan

$$D = 0.5 \sqrt{W.H} \quad \dots\dots\dots \text{pers 2}$$

Kemudian Lucas (1980) mengusulkan persamaan :

$$D = (0.65-0.80) \sqrt{W.H} \quad \dots\dots\dots \text{pers 3}$$

3.2. Potensi Likuifaksi

Seperti telah diuraikan di muka bahwa likuifaksi ini terjadi karena pencairan tanah akibat timbulnya tekanan air pori yang berlebih.

Sampai saat ini cara untuk mengevaluasi potensi likuifaksi pada tanah dasar masih menggunakan dari hasil SPT (Test Penetration Standard). Cara ini pertama kali dikembangkan oleh Seed dan Idriss, 1971 dan kemudian diperbaiki oleh Seed dkk, 1984

Untuk menentukan lapisan tanah berpotensi likuifaksi atau tidak berpotensi, maka dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan berikut :

1. Nisba tegangan siklik

Untuk menentukan besaran nisba tegangan siklik akibat gempa, persamaan yang sering digunakan adalah :

$$\frac{\tau_{av}}{Tv'} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{Tv}{Tv'} rd \quad \dots\dots\dots \text{pers 3}$$

dimana :

- τ_{av} = tegangan geser siklik
- a_{max} = percepatan permukaan tanah maksimum
- Tv = tekanan vertikal tanah total
- Tv' = tekanan vertikal tanah efektif
- g = percepatan gravitasi
- rd = faktor reduksi tegangan

2. Nilai SPT

Tingkat kepadatan tanah di lapangan dapat ditentukan dari hasil penyelidikan geoteknik dengan cara SPT, yaitu dengan menumbuk tabung split barrel dari ketinggian tertentu.

Hasil uji SPT lapangan yang akan digunakan untuk tujuan evaluasi, maka di perlukan koreksi terlebih dahulu.

Normalisasi nilai SPT lapangan (N_i) ke nilai SPT nisba energi 60 % adalah :

$$N_i(60) = C_n \cdot E_{Rm} \cdot N_i/60 \quad \dots\dots\dots \text{pers 4}$$

dimana :

- $N_i(60)$ = nilai SPT terkoreksi
- C_n = faktor koreksi SPT tekanan tanah total
- E_{Rm} = nisba energi efektif

Nilai C_n merupakan faktor koreksi terhadap SPT sehubungan adanya tekanan tanah penutup bagian atas (overburden pressure). Banyak cara untuk mendapatkan faktor koreksi ini seperti yang sering dijumpai dalam literatur Mekanika Tanah, tetapi dalam hal ini faktor koreksi yang digunakan adalah yang dikemukakan oleh Liao dan Whitman (Committee On Earthquake Engineering, 1985) :

$$C_n = \sqrt{(10/Tv')} \quad \dots\dots\dots \text{pers 5}$$

dimana :

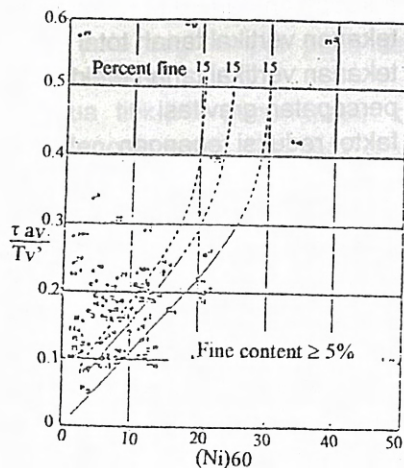
harga Tv' adalah tekanan vertikal efektif tanah (ton/m².)

Nilai E_{Rm} adalah nisba energi efektif dari metode uji SPT, yang besarnya tergantung dari panjang stang pada waktu melakukan pengujian uji SPT di lapangan.

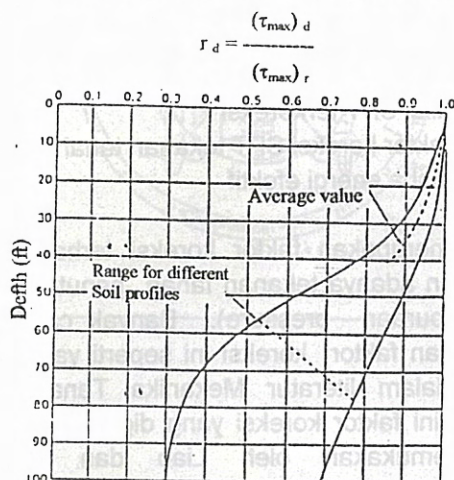
3. Nilai Kritis N1 (60)

Hasil perhitungan yang didapat dari persamaan pada no 1 adalah tegangan geser siklik diplotkan dengan kurva Evaluasi potensi likuifaksi pasir kelanauan untuk gempa skala 7.5 yang dikemukakan oleh SEED dkk, 1984.

Gambar 6
KURVA EVALUASI POTENSI LIQUIFAKSI PASIR
KELANAAN UNTUK GEMPA SKALA 7,5
(SEED dkk, 1984)



Gambar 7.
FAKTOR REDUKSI TEGANGAN



3.3. Likuifaksi

Gelombang getar akan menyebar dalam tanah ke segala arah sampai suatu batas tertentu sehingga kecepatan rambat serta pengaruhnya terhadap perubahan struktur tanah akan tergantung dari jenis tanah itu sendiri.

Pada saat getaran ini mengenai lapisan tanah pasir, dimana kondisinya jenuh air, maka pasir ini cenderung akan menjadi padat dan volumenya menjadi berkurang. Getaran ini datang secara tiba-tiba dan membuat kejutan, sehingga air pori yang

berada dalam tanah tidak sempat lagi untuk lari keluar dan terkekang didalamnya. Dengan terkekangnya air pori yang tidak sempat mengalir keluar, maka tidak terjadi pengurangan volume dan mengakibatkan timbulnya tekanan air pori yang berlebih.

Tekanan air pori yang berlebih ini, bila nilainya lebih atau sama dengan tekanan tanah total, maka akan menjadikan tekanan efektif bernilai nol. Hal tersebut mengakibatkan tanah pasir menjadi cair seperti bubur dan kehilangan daya dukungnya.

IV. PELAKSANAAN DI LAPANGAN

Perbaikan tanah dengan menggunakan metode pemadatan dinamis telah di aplikasikan baik di luar maupun dalam negeri, sehingga cara ini menjadikan suatu teknik dalam memperbaiki tanah yang kurang baik daya dukungnya. Metode pemadatan dinamis ini salah satunya telah diterapkan di lapangan yaitu pada proyek pembuatan tanki dan bangunan perkebunan di Ashuganj Bangladesh tahun 1977/1978.

Penyelidikan tanah telah dilakukan pada lokasi ini, dimana daerah penyelidikan merupakan dataran banjir S Megna didekat delta S Gangga. Lapisan tanah terdiri dari lapisan pasir, pasir kelanauan dan lanau plastisitas rendah.

4.1. Areal

Daerah yang dilakukan perbaikan tanah meliputi 2 bagian areal yang luas yaitu :

- Areal seluas 140.000 m² yang harus dipadatkan sampai dengan kedalaman D = 10.0 meter.
- Areal seluas 35.000 m² yang harus dipadatkan sampai dengan kedalaman D = 20.0 meter.

4.2. Penyelidikan Tanah

Stratigrafi Tanah setempat

Berdasarkan penyelidikan tanah di lapangan dan pengujian di laboratorium, maka stratigrafi lapisan tanah memberikan hasil sebagai berikut :

- Pasir halus : kedalaman 0.0 sampai 5.0 m.
Lapisan pasir ini mempunyai butiran sangat halus sampai halus bergradasi seragam serta bercampur lanau dan mika.
Lapisan ini mempunyai nilai SPT N = 18-23-22 dan 17.
- Lanau : kedalaman 5.0 sampai 8.0 m.
Lapisan lanau bercampur lempung sehingga dalam grafik plastisitas termasuk CL atau CH akibat adanya komposisi dari mika.

- c) Pasir : kedalaman 8.0 sampai 15.0 m.
Lapisan ini mempunyai sifat gradasi jelek (poorly graded) pasir halus berlapis mika, lanau kelembungan dengan kepadatan medium.
Nilai SPT N = 15 dan 12
- d) Lanau dan pasir : kedalaman 15.0 sampai 20 m.
Lapisan ini terdiri dari lapisan pasir lanauan, lanau dan lanau lempungan dengan variasi kedalaman. Lapisan lanau dan lanau lempungan yang didapat menunjukkan sifat yang kurang plastis. Lapisan ini mempunyai nilai SPT N = 18-22 dan 25.
- e) Pasir halus : kedalaman > 20.0 m.
Formasi ini terdiri dari lapisan pasir halus kelanauan.

4.3. Alat penumbuk

Menara kaki tiga (tripod Menard) untuk mengangkat penumbuk seberat G = 40 ton dengan ketinggian H = 23.0 m

Energi yang diperlukan untuk melakukan dynamic compaction adalah berkisar antara 263 sampai 411 tm/m².

Sedangkan untuk pemadatan kedalaman D = 10m diperlukan energi 333 tm/m² dan untuk kedalaman 20.0 m diperlukan energi sebesar 430 tm/m².

4.4. Energi Rata-Rata Setiap Lintasan

Pemadatan dilakukan sebanyak lintasan, baik pada perbaikan tanah setebal D = 10.0 m maupun setebal D = 20.0m, sehingga energi tumbukan rata-rata pada setiap lintasan yang diterima permukaan tanah adalah sebagai berikut :

- Lintasan ke 1 sebesar $E_n = 67 \text{ tm/m}^2$
- Lintasan ke 2 sebesar $E_n = 57 \text{ tm/m}^2$
- Lintasan ke 3 sebesar $E_n = 56 \text{ tm/m}^2$
- Lintasan ke 4 sebesar $E_n = 74 \text{ tm/m}^2$
- Lintasan ke 5 sebesar $E_n = 65 \text{ tm/m}^2$

A. Perbaikan tanah tebal D = 10,0 m

Tabel 1.
KENAIKAN NILAI SPT (N)

No.	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Sebelum	Nilai SPT (N)				
				Sesudah				
				L1	L2	L3	L4	L5
1.	Pasir halus	1.0	18	19	20	21	22	22
		2.0	24	28	33	34	35	36
		3.0	23	28	33	35	37	38
		4.0	17	22	27	27	30	31
2.	Lanau	5.0	14	16	21	23	27	29
		6.0	12	17	21	21	25	27
		7.0	16	20	24	21	26	28
3.	Pasir kasar	8.0	21	23	26	24	31	32
		9.0	25	22	26	27	29	29
		10.0	24	24	27	30	29	30

4.5. Monitoring

Monitoring telah dilakukan terhadap hasil pekerjaan pemadatan dinamis dengan menggunakan alat SPT (Test Penetration Standard), static penetrometer sounding dan pressuremeter sounding. Pengamatan kepadatan terhadap tanah dengan nilai SPT (N) dilakukan baik pada tanah sebelum dilaksanakan pemadatan dinamis maupun sesudahnya. Untuk mendapatkan besarnya peningkatan daya dukung tanah yang terjadi, maka pengujian SPT dilakukan beberapa hari setelah setiap lintasan pemadatan dinamis dikerjakan.

Cara pemadatan dinamis ini dilaksanakan sebanyak lima lintasan, sehingga getaran akibat penumbukkan tanah pada permukaan dapat diharapkan mencapai kedalaman lapisan yang direncanakan.

Pengamatan terhadap kuat geser tanah dengan static penetrometer dan pressuremeter dilakukan setelah pemadatan dinamis berumur 25,40 dan 60 hari. Hal ini untuk memberikan kesempatan terhadap struktur tanah untuk menyusun kembali butirannya menjadi lebih mampat.

Hasil konsolidasi tanah yang telah mengalami perubahan komposisi akibat terjadinya kenaikan tekanan air pori ini akan dinyatakan oleh nilai tekanan batas (limit pressure) dan modulus deformasi (deformation modulus).

4.6. Hasil Monitoring

Hasil pengamatan di lapangan baik untuk perbaikan tanah setebal D= 10 m maupun untuk perbaikan tanah D= 20 m dapat disajikan seperti tabel di bawah ini.

Tabel 2.
TEKANAN BATAS (PL)

No.	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Sebelum	Tekanan Batas (PL) kg/cm ²			
				Sesudah			
				L1	L2	L3	L4
1.	Pasir halus	1.0	8	7	-	-	-
		2.0	-	-	11	16.5	17
		2.5	7	10	-	-	-
		3.0	-	-	16.5	19	20
2.	Lanau	4.0	6	9	14	16	17
		5.0	-	-	10	11	12
		5.5	5	6	-	-	-
		6.0	-	-	8	11	12
3.	Pasir kasar	7.0	6	10	11	12	12.5
		8.0	-	-	12	12	12.5
		8.5	8	10	-	-	-
		9.0	-	-	11	12	13
		10.0	9	10	10	11	12

Tabel 3.
MODULUS DEFORMASI (E)

No.	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Sebelum	Tekanan Batas (PL) kg/cm ²			
				Sesudah			
				L1	L2	L3	L4
1.	Pasir halus	1.0	65	70	-	-	-
		2.0	65	80	115	150	160
		3.0	60	80	180	215	220
		4.0	55	75	140	150	155
2.	Lanau	5.0	50	70	85	105	110
		6.0	50	70	70	105	110
		7.0	55	90	110	110	115
3.	Pasir kasar	8.0	65	90	105	110	115
		9.0	80	95	95	110	115
		10.0	85	90	80	105	105

B. Perbaikan tanah tebal D = 20.0 m

Tabel 4.
KENAIKAN NILAI SPT (N)

No.	Jenis Tanah	Kedalaman	Nilai SPT (N)	
			Sebelum	Sesudah (L5)
1.	Pasir halus	1.0	15	20
		2.0	25	32
		3.0	21	39
		4.0	20	36
2.	Lanau	5.0	11	35
		6.0	11	35
		7.0	12	40
3.	Pasir kasar	8.0	25	32
		9.0	23	31
		10.0	23	37
		11.0	25	39
		12.0	30	39
		13.0	31	44
4.	Lanau campur pasir	14.0	30	32
		15.0	28	30
		16.0	26	28
		17.0	24	26
		18.0	24	26
		19.0	25	27
		20.0	26	30

Tabel 5.
KENAIKAN MODULUS DEFORMASI (E) DAN TEKANAN BATAS (PL)

No.	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Modulus Deformasi (E) Kg/cm ²		Tekanan batas (PL) Kg/cm ²	
			Sebelum	Sesudah (L4)	Sebelum	Sesudah (L4)
1.	Pasir halus	1.0	82	77	7.5	8.5
		2.0	80	170	-	-
		2.5	-	-	7	13
		3.0	70	180	-	-
		4.0	30	100	4	14
2.	Lanau	5.0	30	110	-	-
		5.5	-	-	2.5	11
		6.0	35	90	-	-
		7.0	30	100	4	14
		8.5	-	-	8	16
3.	Pasir kasar	9.0	45	125	-	-
		10.0	42	105	6	12
		11.0	60	110	-	-
		11.5	-	-	8	14
		12.0	62	110	-	-
		13.0	80	90	9	13
		14.0	75	85	-	-
		14.5	-	-	8	10
		15.0	60	80	-	-
		16.0	58	70	9	11
4.	Lanau campur pasir	17.0	50	65	-	-
		17.5	-	-	9	10
		18.0	52	60	-	-
		19.0	55	60	8	11
		20.0	65	110	-	-

V. ANALISIS DAN EVALUASI

Untuk mendapatkan hasil yang optimal dari kegiatan yang telah dilakukan, maka data yang diperoleh dari pelaksanaan lapangan dianalisis dan dievaluasi seperti di bawah ini.

5.1. Penentuan Energi Tumbukan (En)

Penentuan energi yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman pengaruh pemadatan, digunakan persamaan :

$$D = n \sqrt{W \cdot H}$$

- Kedalaman pemadatan yang dicapai $D = 10.0$ m dengan nilai n diambil 0.7 , maka diperlukan energi $En = W.H = 204$ tm.
- Kedalaman pemadatan yang dicapai $D = 20.0$ m dengan nilai n diambil 0.7 , maka diperlukan energi $En = W.H = 816$ tm.

Untuk mencapai kepadatan tanah sampai kedalaman $D = 10.0$ m diperlukan tinggi jatuh $H = 204/16 = 12.75$ m, dalam pelaksanaan tinggi jatuh $H' = 25.0$ meter.

Untuk mencapai kepadatan tanah sampai kedalaman $D = 20.0$ m diperlukan tinggi jatuh $H = 816/40 = 20.40$ m, dalam pelaksanaan tinggi jatuh $H' = 23.0$ meter.

5.2. Peningkatan Daya Dukung Tanah

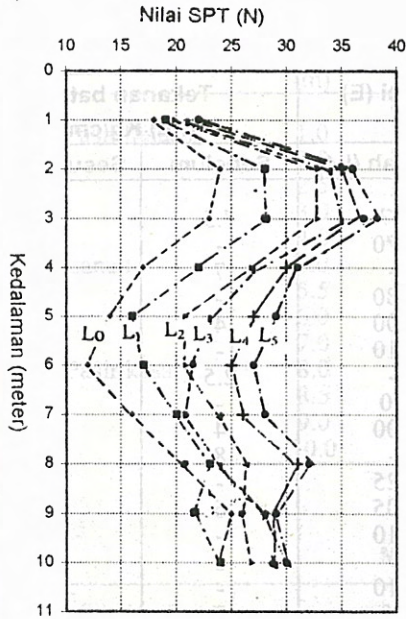
Peningkatan daya dukung tanah dapat dinyatakan dari hasil observasi terhadap tanah sebelum dilakukan pemadatan dinamis dan sesudah pemadatan dinamis. Berdasarkan data hasil monitoring yang telah dilakukan, maka dapat dibuatkan suatu grafik, seperti terlihat pada gambar 8 dan 9.

Peningkatan daya dukung tanah dinyatakan dalam :

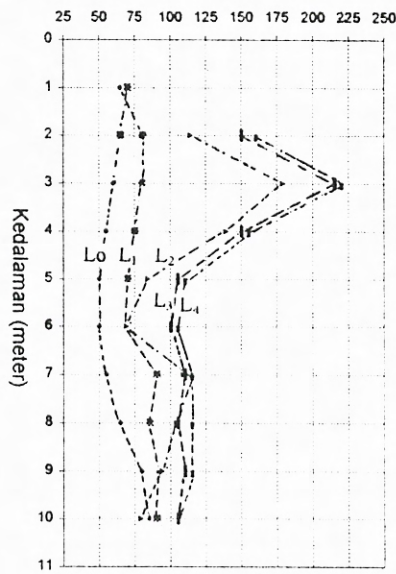
- Hubungan nilai SPT antara sebelum dan sesudah pemadatan pada setiap kedalaman.
- Hubungan nilai tekanan batas antara sebelum dan sesudah pemadatan pada setiap kedalaman.
- Hubungan nilai modulus deformasi antara sebelum dan sesudah pemadatan pada setiap kedalaman.

Berdasarkan grafik tersebut daya dukung tanah setelah dilakukan pemadatan cenderung meningkat yaitu dengan adanya bertambah besar nilai SPT (N), tekanan batas maupun nilai modulus deformasinya.

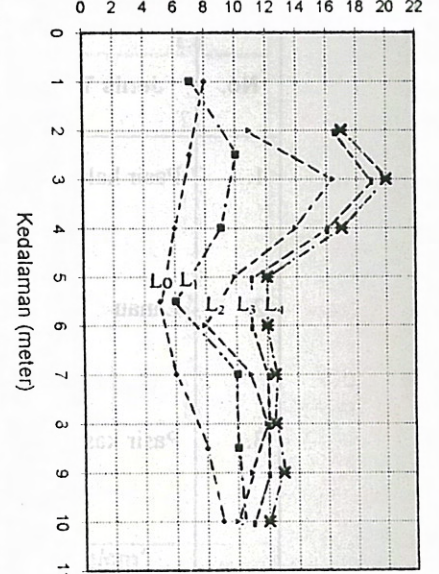
Profil bor



Modulus Deformasi (E) kg/cm²



Tekanan Batas (PL) kg/cm²

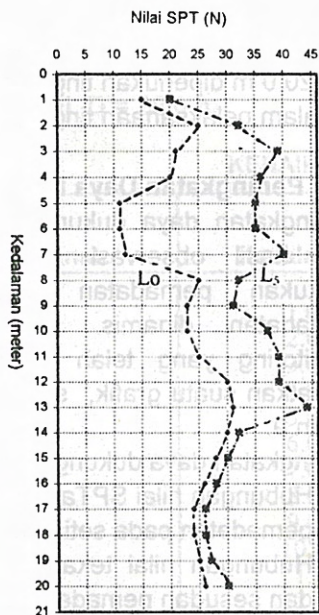


Keterangan :

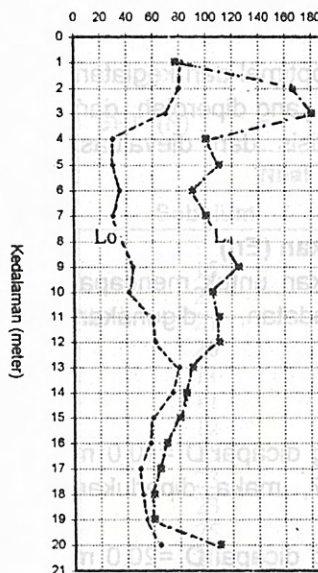
- Lo = Sebelum pemadatan
- L₁ = Lintasan ke 1
- L₂ = Lintasan ke 2
- L₃ = Lintasan ke 3
- L₄ = Lintasan ke 4
- L₅ = Lintasan ke 5

Gambar 8 : Peningkatan Daya Dukung Tanah Pada Ketebalan D = 10.0 m

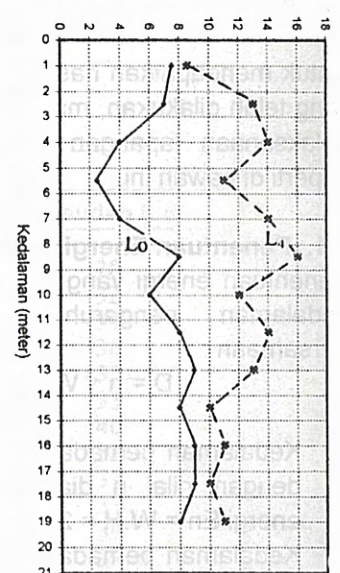
Profil bor



Modulus Deformasi (E) kg/cm²



Tekanan Batas (PL) kg/cm²



Keterangan :

- Lo = Sebelum pemadatan
- L₄ = Lintasan ke 4
- L₅ = Lintasan ke 5

Gambar 9 : Peningkatan Daya Dukung Tanah Pada Ketebalan D = 20.0 m

5.3. Perbaikan tanah setebal D = 10.0 meter

a) Peningkatan nilai SPT.

Pada lapisan pasir halus yang terletak di permukaan tanah, bahwa setelah dilakukan penumbukan, maka terjadi peningkatan daya dukung tanah dari asal nilai SPT $N = 23$ menjadi $N = 38$ yang didapat pada kedalaman $D = 2.0$ dan 3.0 meter

Peningkatan daya dukung terbesar terjadi pada dua lintasan penumbukan.

Pada lapisan lanau peningkatan daya dukung terjadi pada kedalaman 6.0 meter yaitu berasal dari nilai SPT $N = 12$ menjadi $N = 27$. Peningkatan terbesar terjadi setelah dilakukan empat lintasan penumbukan.

b) Peningkatan nilai tekanan batas PL

Seperti halnya dengan uraian di atas, maka peningkatan nilai tekanan batas PL terjadi pada lapisan pasir halus yaitu dari nilai $PL = 6$ kg/cm² menjadi $PL = 17$ kg/cm².

Sedangkan pada lapisan lanau, peningkatan tekanan batas terjadi dari $PL = 6$ kg/cm² menjadi $PL = 12$ kg/cm².

c) Peningkatan modulus deformasi (E)

Peningkatan modulus deformasi pada lapisan pasir berasal dari $E = 60$ kg/cm² menjadi $E = 220$ kg/cm². yang didapat pada kedalaman $D = 3.0$ dan 4.0 meter. Peningkatan daya dukung terbesar terjadi pada dua lintasan penumbukan. Sedangkan pada lapisan lanau berasal dari $E = 55$ kg/cm² menjadi $E = 115$ kg/cm². Peningkatan daya dukung terbesar terjadi pada dua lintasan.

5.4. Perbaikan tanah setebal D = 20.0 meter

Untuk perbaikan tanah setebal 20.0 meter. kenaikan daya dukung tanah hampir sama dengan ketebalan 10.0 meter, tetapi dimulai kedalaman $D = 14.0$ meter sampai ke bawah, kenaikannya relatif kecil.

VI. KESIMPULAN

Dari analisis dan evaluasi terhadap pelaksanaan pemadatan dinamis, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

6.1 Perbaikan tanah dengan cara dynamic consolidation dapat meningkatkan daya dukung tanah dasar mulai jenis pasir kerikilan sampai lempung plastis. Tingkat kenaikan daya

dukung tergantung dari kedalaman dan ketebalan tanah serta besarnya energi tumbukan yang diberikan.

6.2 Untuk lapisan jenis tanah pasir, untuk mencapai kepadatan yang optimal dapat dilakukan sebanyak 2-3 lintasan, sedangkan untuk tanah jenis lanau dapat dilakukan 4 -5 lintasan. Tetapi hal ini juga masih tergantung dari kedalaman tanah yang akan ditingkatkan daya dukungnya.

6.3 Cara pemadatan dinamis ini, dapat pula dikombinasikan dengan metode lain seperti vertikal drain, sehingga proses penurunan tekanan air dapat dipercepat, sehingga tanah yang mengalami pemadatan akan lebih cepat pula.

6.4 Untuk mengetahui sejauhmana pengaruh metode pemadatan dinamis terhadap tanah kohesif, maka masih perlu dilakukan penelitian yang lebih akurat, hal ini dikarenakan mengingat tanah kohesif mempunyai butiran yang lebih halus.

DAFTAR PUSTAKA

1. Edward William B and Rp. Peter B, Soft Clay Engineering, Elsevier Scientific Publishing Company 1981.
2. Gouw Tjie Liong, Ir, MEng, Dynamic Compaction On Coralline Soil, 5th Asian Regional Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Desember tahun 1991 Bangkok.
3. S. Varaksin, Recent Development in Soil Improvement Techniques and Their Practical Application, Sols Soils 1981.
4. H. Bolto Seed and I.M. Idriss, A Simplified Procedure For Evaluating Soil Liquefaction Potensial, California University Berkeley, California 1970.

Penulis :

Drs. M. Suherman, Peneliti muda bidang Geoteknik, Pusat Litbang Jalan.

Tabel 1. b
HARGA SATUAN JALAN TOL ELEVATED

Konstruksi	Negara	Harga Satuan (US. \$/sq.m)
Jalan layang Slipi	Indonesia	585
Jalan layang Semanggi	Indonesia	589
Cawang – Tanjung Priuk	Indonesia	336
Sunshine Skyway	Florida	1369
Penang Bridge	Malaysia	1943
Faro Bridge	Denmark	2250
Saudi – Bahrain Causeway	Arabian Gulf	1430
Ilederecauseway	France	1616
Foyle Bridge	England	2092
Niger River Bridge	Nigeria	2205

Tabel 1. c
HARGA SATUAN TIPIKAL JALAN TOL

Harga Satuan Material Jalan Tol Lebar 3,5 m/km	Negara	
	Indonesia (Rp)	Jepang (Yen)
Subgrade	6.590.500	-
Subbase (20 cm Agregat class A)	59.780.700	-
Base (15 cm ATB + Prime Coat 1 l/m ²)	99.848.140	-
Surfacing (5 cm AC + Tack Coat 0,2 l/m ²)	39.381.160	-
Harga Satuan Pembangunan Jalan Tol Lentur 3,5 m /km	205.600.500	-
Harga Satuan Pembangunan Jalan Tol Kaku Tebal 27 cm Lebar 3,5 m per km di Atas 20 cm Agregat Kelas A.	787.724.700	-
Material Beraspal untuk pelapisan Ulang (Asumsi tebal asphalt drainage 30 cm)		≈25.000.000

Kelompok A terdiri atas :

- 1) Perkerasan Lentur :
 - a. Indonesia (Plumbon-Kanci-Palimanan).
 - b. Jepang (Sagamihara, sebagai pembandingan).
 - c. India (Surat-Manor, sebagai pembandingan).

- 2) Perkerasan Kaku :
 - a. Indonesia (beberapa jalan tol seperti terlihat pada Tabel 1.a).
 - b. Jepang (Hita City, sebagai pembandingan).

Seperti diringkaskan pada Tabel 3.

Seperti terlihat pada Tabel 2. di bawah ini.

Tabel 2.
HARGA SATUAN PEMBANGUNAN JALAN TOL
TIPE LENTUR AT GRADE

Tipe	Jumlah Lajur	Harga Satuan (milyar Rupiah/lajur/km)		
		Indonesia	Jepang	India
Fleksibel.	2x2	2.766	30.180	1.875

Note : 1 Yen = Rp 60,- US\$ 1 = Rp 7500,-

Tabel 3.
HARGA SATUAN PEMBANGUNAN
JALAN TOL TIPE KAKU AT GRADE

Tipe	Jumlah Lajur	Harga Satuan (milyar Rupiah/lajur/km)			
		Indonesia		Jepang	
		Harga Satuan per km	Harga Satuan per lajur/ km	Harga Satuan per km	Harga Satuan per lajur/ km
Kaku	2 x 1	-	-	43.500	21.750
	2 x 2	23.030	5.757	-	-
	2 x 3	32.420	5.400	-	-

Note : 1 Yen = Rp. 60,-

Kelompok B seperti terlihat pada Tabel 4 berikut ini :

Tabel 4.
HARGA SATUAN PEMBANGUNAN
JALAN TOL ELEVATED

Konstruksi	Negara	Harga satuan (juta Rupiah /m ²)
Slipi-Semanggi-Tj. Periuk	Indonesia	4.388
Sunshine Sky Way	USA	10.268
Penang	Malaysia	14.573
Faro	Denmark	16.875
Saudi-Bahrain Cause Way	Arabic	10.725
Iledere Cause Way	Perancis	12.120
Foyle	Inggeris	15.690
Niger River	Nigeria	16.538

Note : US\$ 1 = Rp 7500,-

Kelompok C seperti terlihat pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5.
HARGA SATUAN TIPIKAL COST
UNTUK ASPHALTIC OVERLAID MATERIAL.

Material	Harga Satuan (juta Rupiah/ lajur/kilometer)	
	Indonesia	Jepang
AC wearing course 5 cm	39.500	250.000

Note : 1 Yen = Rp.60,-

V. PEMBAHASAN

Dari Tabel 2 terlihat bahwa unit cost per lajur per kilometer untuk perkerasan lentur (flexible pavement) di Indonesia lebih tinggi dari India, tetapi jauh lebih kecil dari Jepang. Apabila dibandingkan Indonesia, Jepang, India, dengan Indonesia sebagai tolok ukurnya maka didapat angka perbandingan 1 : 10.91 : 0.68. Kemungkinan penyebabnya adalah harga orang - bulan (man month) di Jepang jauh lebih mahal dari di Indonesia, sedangkan India kemungkinan lebih rendah.

Untuk perkerasan kaku (rigid pavement) harga satuan per lajur per kilometer di Indonesia ada perbedaan untuk 2x2 dan 2x3 lajur yaitu masing-masing 5.757 dan 5.400 milyar Rupiah seperti terlihat pada Tabel 3. Kalau dibandingkan dengan harga satuan per lajur per kilometer yang terdapat di Jepang harga satuan per lajur per kilometer untuk Indonesia sangat jauh dibawahnya. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor antara lain :

a. Sebagai negara yang jauh lebih maju, upah buruh (man month) di Jepang tentu jauh lebih tinggi dari Indonesia.

- b. Konstruksi rigid pavement pembanding yang diambil dari Jepang itu merupakan 2 arah 1 lajur yang tentunya biayanya lebih besar dari 2 lajur atau 3 lajur. Hal ini juga berlaku untuk kondisi Indonesia sendiri, apabila dibandingkan antara konstruksi yang 3 lajur dan 2 lajur, dimana harga satuan per km per lajurnya lebih murah untuk konstruksi 3 lajur.
- c. Umumnya konstruksi jalan di Jepang sudah mempertimbangkan pengembangan konstruksi untuk keperluan masa depan seperti bangunan-bangunan pelengkap lain, pengembangan elevated expresswaynya, tunnel, dan lain-lain sehingga menyebabkan harga satuan konstruksinya jauh lebih tinggi.

Untuk jalan tol elevated, terlihat bahwa harga satuan per meter persegi jalan tol di Indonesia paling rendah yaitu sebesar 4.388 juta Rupiah seperti terlihat pada Tabel 4. Sedangkan harga satuan tertinggi adalah untuk negara Denmark pada jalan tol Faro yaitu sebesar 16.875 juta rupiah per meter persegi. Teknologi yang ditemukan oleh putera Indonesia seperti Sosrobahu dan konstruksi yang menyerupai daun Semanggi mungkin banyak mempengaruhi penurunan harga satuan. Selain itu pemakaian bahan dalam negeri seperti besi produksi Krakatau Steel dan semen turut memberikan kontribusi terhadap harga satuan ini.

Dari Tabel 5 terlihat bahwa harga material beraspal untuk lapis aus (*wearing course*) di Indonesia jauh lebih kecil dibandingkan dengan Jepang. Hal ini disebabkan karena pemakaian jenis lapis aus yang berbeda. Di Jepang, jenis lapis aus yang digunakan adalah drainage asphalt dengan spesifikasi bahan yang lebih tinggi (contoh, CBR material <30% dan modified asphalt, sementara di Indonesia mensyaratkan CBR <40% dan menggunakan aspal Pertamina).

VI. KESIMPULAN

1. Secara keseluruhan harga satuan perkerasan lentur jalan tol di Indonesia sedikit lebih mahal dari India, tetapi jauh lebih murah dibandingkan dari Jepang.
2. Untuk perkerasan kaku harga satuan di Indonesia lebih murah dibandingkan dengan Jepang.
3. Contoh di Indonesia menunjukkan bahwa jumlah lajur mempengaruhi harga satuan, dimana harga satuan per lajur perkerasan kaku untuk 3 lajur lebih murah dibandingkan dengan 2 lajur.

4. Harga satuan permeter persegi untuk jalan tol layang di Indonesia paling murah dibandingkan negara-negara lain.
5. Harga satuan material beraspal untuk lapis aus di Indonesia lebih murah dibandingkan Jepang.
4. Nihon Doro Kodan, "New Construction Cost of Expressway", Company Record, Unpublished.
5. Internet, 1999, "Surat Manor Tollway Project" Load IND 29250-01,

DAFTAR PUSTAKA

1. Bintek, (1999) "Rekapitulasi Proyek Jalan Tol - Catatan Instansi. ", Bina Marga, Jakarta, tidak diedarkan.
2. Bintek, (1999) "Penjelasan Singkat Ruas Jalan Tol Serpong – Ulujami – Pondok Pinang", Bina Marga, Jakarta, tidak di edarkan.
3. Jasa Marga, (1999), "Harga Satuan Jalan Tol", Jasa Marga, Jakarta.

6. CMNP, " Cawang – Tanjung Priok Elevated Toll Road", CMNP, Investor Cawang - Tanjung Priok Toll Road, Jakarta

Penulis :

1. *Ir. R. Anwar Yamin, MSc, MIHT, TMIPENZ, Staff Balai Bahan dan Perkerasan Jalan, Pusat Litbang jalan.*
2. *DR. Ir. Sjahdanulirwan, MSc. Peneliti Madya Bidang Teknik Jalan, dan Kepala Bidang Penelitian, Pusat Litbang Jalan.*
3. *DR. Ir. Siegfried, MSc. , Staff Balai Bahan dan Perkerasan Jalan, Pusat Litbang jalan.*