

# IDENTIFIKASI BENTUK HUBUNGAN TAHANAN PENETRASI DAN BERAT VOLUME KERING PADA TANAH PASIRAN

Oleh:

**Abdul Rozaq<sup>\*)</sup>**

## Pendahuluan

Pemakaian penetrometer sebagai alat untuk mengukur tingkat kekuatan atau kepadatan tanah pertanian banyak dilakukan terutama di lapangan, karena pertimbangan kecepatan dalam memperoleh data. Hal ini penting, karena penelitian di lapangan selalu dihadapkan pada kendala faktor cuaca yang dapat berubah setiap saat. Dengan menggunakan peralatan penetrometer, pengukuran kekuatan tanah dapat dilakukan dengan cepat, sehingga seluruh percobaan, yang umumnya dipengaruhi oleh lengas tanah, dapat diselesaikan secara cepat. Dengan demikian hasil percobaan dapat dianggap diperoleh pada kondisi tanah yang sama.

Meskipun demikian, penafsiran terhadap tahanan penetrasi sulit dilakukan karena ketidakpastian reaksi tanah pada kerucut penetrometer. Penafsiran tersebut juga relatif kompleks, karena harganya tergantung pada karakteristik tanah dan interaksi kerucut dengan tanah (Tollner, 1985). Di samping itu, karakteristik patahan tanah dan interaksi tanah-kerucut sangat dipengaruhi oleh kadar lengas, tekstur tanah dan intensitas tegangan yang pernah diderita tanah. Pada tanah dan penetrometer yang sama, tahanan penetrasi tidak dapat sekaligus

menggambarkan kekuatan tanah atau kepadatan tanah, karena pengaruh faktor kandungan lengas. Tahanan penetrasi akan berkurang apabila kandungan lengas tanah meningkat, meskipun tingkat kepadatan tanah atau harga berat volume kering tanahnya sama. Dengan demikian, pengukuran tahanan penetrasi harus selalu disertai dengan pengukuran kadar lengas pada titik sampel yang sama, untuk mengoreksi harga tahanan penetrasi.

Kenyataan bahwa pengukuran penetrometer sangat tergantung pada kandungan lengas dan memiliki koefisien variasi lebih besar dibanding pengukuran berat volume tanah (Tollner, 1985), telah menyebabkan adanya kecenderungan menyertakan data berat volume kering sebagai pendamping dalam penelitian-penelitian pemadatan tanah pertanian (Soane, 1983).

Dalam penelitian pemadatan tanah yang bertujuan untuk mengetahui pola pemadatan yang terjadi akibat lintasan traktor, misalnya, diperlukan suatu pengukuran variabel yang sedapat mungkin paling peka dalam menggambarkan terjadinya perubahan tingkat kepadatan tanah. Dengan demikian, pencantuman data tahanan penetrasi dan berat volume kering dalam studi pemadatan tanah sesungguhnya, secara metodologis, masih dapat disederhanakan terutama apabila tinjauannya adalah mendeteksi distribusi pemadatan yang terjadi.

---

<sup>\*)</sup> Staf Pengajar FTP - UGM Jurusan Mekanisasi Pertanian.

Dengan mengetahui hubungan matematis antara tahanan penetrasi dan berat volume kering tanah, maka diharapkan akan dapat diketahui kemampuan penetrometer dalam menggambarkan perubahan berat volume. Penetrometer dapat dikatakan lebih peka dalam menggambarkan terjadinya pemadatan tanah apabila hasil tahanan penetrasi dapat memperkuat pembacaan perubahan berat volume tanah yang ada.

**Tujuan**

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan bentuk hubungan matematis antara tahanan penetrasi dan berat volume kering pada tanah pasiran.

**Kegunaan**

Dari hubungan matematis antara tahanan penetrasi dan berat volume tanah tersebut, diharapkan akan diperoleh informasi tentang kemampuan penetrometer dalam mendeteksi perubahan berat volume kering tanah, yang sangat penting artinya dalam penggunaan penetrometer sebagai alat untuk menggambarkan distribusi pemadatan tanah yang terjadi akibat gaya tertentu.

**Landasan Teori**

Sebagian besar teori yang berhubungan dengan studi dinamika penetrasi penetrometer kerucut diturunkan dari hasil penelitian Prandtl (1920) dan Reissner (1924) dalam Das (1979) tentang perhitungan daya sangga fondasi sebagai berikut.

$$R_p = C \cdot N_c + \sigma' \cdot z \cdot N_q \dots \dots \dots (1)$$

R<sub>p</sub> = Tekanan runtuh  
 C = kohesi

- N<sub>c</sub>, N<sub>q</sub> = konstanta yang tergantung dari u
- φ = sudut gesek dakhil tanah
- σ' = berat volume tanah
- z = kedalaman penetrasi

Beberapa peneliti lainnya menemukan adanya analogi antara watak fondasi sempit dan masuknya suatu penetrometer. Analogi ini terlihat pada bentuk patahan yang timbul di dalam tanah, sehingga formula berikut ini diterima untuk memperhitungkan tekanan runtuh di bawah fondasi atau penetrometer.

$$R_p = C \cdot N_c + \sigma' \cdot z \cdot N_q + \sigma' \cdot b/2 \cdot n \cdot \sigma' \dots \dots \dots (2)$$

Untuk penetrometer, komponen paling kanan dari persamaan (2) dapat diabaikan karena harga b yang kecil (Meyerhof, 1956 dalam Das, 1979). Dengan demikian formula (2) di atas menjadi sama dengan formula sebelumnya.

Untuk tanah pasir harga C dapat dianggap dengan nol, sehingga rumus (1) menjadi:

$$R_p = \sigma' \cdot z \cdot N_q \dots \dots \dots (3)$$

Secara matematis R<sub>p</sub> atau tahanan penetrasi merupakan fungsi linier dari kedalaman penetrasi dan berat volume tanah basah. Hubungan linier antara tahanan penetrasi dan kedalaman tersebut berlaku sampai kedalaman tertentu yang disebut kedalaman kritis, atau kedalaman yang bertepatan dengan bertemunya kurva spiral logaritmik yang membatasi pengaruh penetrometer pada tanah (zone pengaruh) dan sumbu penetrasi. Di bawah kedalaman tersebut harga tahanan penetrasi akan menjadi konstan (Kerisel, 1960 dalam Sanglerat, 1972). Hal ini menunjukkan bahwa tahanan penetrasi tidak akan seluruhnya termobilisasi sebelum zone pengaruh disekitar kerucut penetrometer mengenai lapisan yang cukup kuat.

Pada zone pengaruh tersebut, tanah bergerak ke atas relatif terhadap luasan kerucut dan deformasi tanahnya dicirikan oleh pemadatan atau regangan geser. Pola deformasi tanahnya tergantung pada: kemampuan tanah untuk memadat dan kemampuan tanah untuk berubah bentuk, dimensi kerucut dan sifat gesek tanah-kerucut (Koolen et al, 1983).

Pada konsep kurva spiral logaritmik, besarnya tahanan penetrasi diartikan sebagai jumlah tegangan geser vertikal yang terjadi pada permukaan luasan spiral logaritmik yang menyelimuti volume tanah disekitar kerucut dan batang penetrometer. Secara matematis persamaan spiral logaritmik dapat dinyatakan sebagai berikut (Das, 1972).

$$R = R_0 \cdot e^{\theta \tan \varphi} \dots \dots \dots (4)$$

$R$  = jari-jari spiral  
 $\varphi$  = sudut gesek dakhil tanah  
 $R_0$  = jari-jari spiral pada  $\theta = 0$   
 $\theta$  = sudut antara  $R$  dan  $R_0$

Luas permukaan spiral logaritmik ( $A$ ) dapat diperoleh dengan melakukan integral secara berturut-turut rumus (4) dalam koordinat polair,

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (1/2) R (R d\theta) \dots \dots \dots (5)$$

Dengan mengganti  $R$  dari persamaan (4) diperoleh:

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (1/2) R_0^2 \cdot e^{2\theta \tan \varphi} \cdot d\theta \dots \dots \dots (6)$$

$$A = \frac{R_0^2}{4} \tan \varphi (e^{2\theta \tan \varphi} - 1) + \frac{R_0 e^{2\theta \tan \varphi} \sin 2(13\pi/12 - \theta)}{4} \dots \dots \dots (7)$$

Dari rumus di atas terlihat bahwa luasan

spiral logaritmik sangat tergantung antara lain pada tekstur dan lengas tanah (sudut gesek dakhil  $\varphi$ ) dan disain penetrometer (panjang sisi miring  $R_0$ ). Luasan  $A$  akan menentukan volume tanah yang dipengaruhi oleh kerucut. Makin besar  $A$  maka tegangan geser vertikal yang mungkin timbul pada permukaan selimut spiral logaritmik juga secara teoritis akan semakin besar. Dengan perkataan lain, harga tahanan penetrasi akan meningkat apabila luasan  $A$  bertambah.

Tegangan geser yang timbul sangat tergantung pada gravitasi, sehingga harganya bervariasi terhadap kedalaman (Koolen et al, 1983). Ketergantungan tegangan terhadap kedalaman ini akan mempengaruhi bentuk zone pengaruh. Hal ini sesuai dengan pernyataan de Beer (1984) dalam Sanglerat (1972) tentang perubahan geometri zone pengaruh terhadap kedalaman. Efek gravitasi akan meningkat apabila: zone pengaruh makin besar, tegangan yang timbul karena gesekan tanah-tanah serta tanah-logam lebih besar dari yang timbul karena kohesi, dan kepadatan tanah berkurang.

Koolen et al (1983) mengemukakan dua tipe perkembangan zone pengaruh pada awal penetrasi, yaitu tipe yang terjadi dengan pemadatan tanah yang banyak (pada tanah kering) dan tipe yang tidak terlalu memadatkan tanah. Pada tipe pertama, zone pengaruh akan berkembang sampai suatu keadaan di mana jumlah aliran tanah yang bergerak ke atas sama dengan ke bawah. Bekas lubang penetrasi akan tetap terbuka sebesar luas penampang kerucut, disertai dengan retakan-retakan horizontal di dalam lubang. Pada tipe kedua, zone pengaruh akan berkembang sampai aliran tanah ke atas berubah menjadi aliran ke arah lubang penetrasi di atas kerucut.

Keadaan yang tercapai setelah zone pengaruh tidak berkembang lagi disebut

keadaan steady. Kondisi ini mungkin ada hubungannya dengan pernyataan Kerisel (1960) dalam Sanglerat (1972) tentang kedalaman kritis, yaitu bertemunya kurva spiral logaritmik dengan sumbu penetrasi.

Dengan demikian, harga A atau luasan spiral logaritmik yang menentukan volume tanah yang dipengaruhi oleh kerucut, bersifat dinamis dan sangat tergantung pada kedalaman penetrasi, kondisi fisik tanah di samping disain kerucutnya sendiri. Karena tegangan geser yang timbul dalam proses penetrasi bekerja kurang lebih pada volume tanah yang dibatasi oleh luasan A tersebut, maka secara hipotetis tingkat kepadatan tanah atau berat volume tanah pada volume tanah yang dibatasi oleh luasan spiral logaritmik akan mempengaruhi harga tahanan penetrasi. Bentuk hubungan antara tahanan penetrasi dan berat volume kering tanah (laju perubahan) pada kadar lengas yang sama secara hipotesis akan berbeda pada interval berat volume kering yang rendah dan yang tinggi. Pada berat volume kering rendah pengaruh komponen gravitasi akan lebih menonjol dan perkembangan zone pengaruh terjadi dengan tingkat pemadatan yang kecil. Pada interval ini peningkatan berat volume kering tidak akan meningkatkan tahanan penetrasi terlalu besar. Sebaliknya, pada harga berat volume kering tinggi, perkembangan zone pengaruh akan disertai dengan pemadatan yang besar, sehingga perubahan berat volume kering akan mengakibatkan perubahan tahanan penetrasi secara menyolok.

### Metoda Penelitian

Untuk keperluan percobaan digunakan pasir Fontainebleau yang sedikit mengandung lempung. Textur tanah pasiran tersebut dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tanah pasir di variasi kadar lengasnya, sehingga diperoleh kadar lengas 5,7; 7,2; 8,1; 9,1; dan 9,4 persen. Interval kadar lengas diambil atas dasar percobaan Proctor, dengan pertimbangan bahwa pada interval tersebut tanah berada dalam keadaan peka terhadap pemadatan.

Tabel 1. Hasil analisa tekstur

Lempung	$0 < 2 \mu$	9,5%
Debu halus	$2 \mu < 0 < 20 \mu$	0,5%
Debu kasar	$20 \mu < 0 < 50 \mu$	0,1%
Pasir medium	$50 \mu < 0 < 100 \mu$	0,7%
	$100 \mu < 0 < 200 \mu$	28,1%
Pasir kasar	$200 \mu < 0 < 500 \mu$	61,0%
	$500 \mu < 0 < 1000 \mu$	0,1%
	$1000 \mu < 0 < 2000 \mu$	0,0%

Tanah pasiran yang sudah siap dimasukkan ke dalam kotak berukuran  $30 \times 30 \times 30$  cm yang bagian bawahnya diberi lubang dan ditutup dengan kertas saring untuk menghindari keluarnya massa tanah. Selanjutnya tanah ditekan dengan piston yang digerakkan oleh pompa hidrolis. Variasi tekanan yang dilakukan sebesar 0; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5 bar. Tekanan minyak hidrolis dalam pipa diukur dengan menggunakan transducer tekanan dan diperkuat untuk kemudian direkam dalam alat perekam ultraviolet. Tekanan diberikan selama satu menit, untuk menghindari terjadinya proses pengembangan setelah tekanan dilepas.

Untuk masing-masing perlakuan dilakukan pengukuran berat volume tanah dengan menggunakan gamma densimeter ganda LPC-INRA (lampiran 1). Karena pertimbangan keamanan, kotak dimasukkan ke dalam tanah (soil bin). Pengukuran berat volume tanah dilaksanakan dengan memasukkan tabung yang berisi sumber radioaktif (5 Mci Cs 137) pada sisi luar kotak tanah dan tabung detektor yang berfungsi

menangkap pancaran sinar gamma pada sisi luar kotak lainnya. Sebelum pengukuran, dilakukan kalibrasi untuk memperhitungkan ketebalan kotak baja yang digunakan untuk menampung tanah. Kalibrasi dilakukan dengan cara mengukur berat volume massa yang sudah diketahui, sehingga diperoleh hubungan antara berat volume material terukur dan berat volume material sesungguhnya.

Penyerapan sinar gamma oleh tanah adalah proporsional dengan massa tanah yang dilewatinya. Detektor akan menangkap jumlah sinar yang ditangkap dalam satuan pukuran per detik, dan dengan bantuan grafik akan diperoleh ekuivalen berat volume tanah basah. Harga berat volume basah selanjutnya dikoreksi sesuai dengan kadar air pada saat pengukuran.

Pengukuran berat volume tanah dilakukan setiap interval kedalaman 2 cm. Dengan jarak sumber radioaktif dan detektor sebesar 30 cm, pengukuran berat volume tanah ini meliputi volume tanah sebesar kurang lebih 200 cm<sup>3</sup>. Setelah selesai diukur berat volumenya, kotak tanah diambil untuk diukur tahanan penetrasinya.

Tahanan penetrasi diukur dengan menggunakan penetrometer semi otomatis yang dilengkapi dengan transducer tarikan 50 daN, dan kerucut yang berpenampang 0,25 cm<sup>2</sup> dengan sudut kerucut 90 derajat. Variasi tahanan penetrasi langsung direkam pada kertas yang sensitif terhadap panas, dengan bantuan jarum yang dipanaskan. Penurunan kerucut penetrometer dilakukan dengan jalan memutar engkol pada kecepatan yang diusahakan sama kurang lebih 1,5 cm per detik.

Pengukuran tahanan penetrasi dilakukan sebanyak 15 kali pada bidang tengah sampel tanah, searah dengan penya-

puan sinar gamma pada saat pengukuran berat volume tanah. Dengan demikian harga tahanan penetrasi rata-rata dapat diperoleh sebagai berikut.

$$R_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^{j=15} R_{pji}}{15}$$

i = indeks kedalaman  
j = indeks lebar

Dari seri data pasangan tahanan penetrasi-kedalaman (R<sub>pi</sub>, Z<sub>i</sub>) kemudian diolah dengan cara eliminasi Z agar diperoleh data pasangan berat volume kering-tahanan penetrasi (j<sub>d</sub>, R<sub>p</sub>) pada sepuluh harga tekanan pemadatan.

### Hasil dan Pembahasan

Perhitungan pasangan harga berat volume kering (j<sub>d</sub>) dan tahanan penetrasi (R<sub>p</sub>) untuk berbagai tekanan pemadatan dan kadar lengas dapat dilihat pada tabel 2.

Kurva hubungan tahanan penetrasi dan berat volume kering tanah dapat dilihat pada gambar 1.

Dengan menggunakan analisa regresi, dicari bentuk hubungan matematis yang paling sesuai. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tahanan penetrasi merupakan fungsi eksponensial dari berat volume kering tanah, sehingga secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

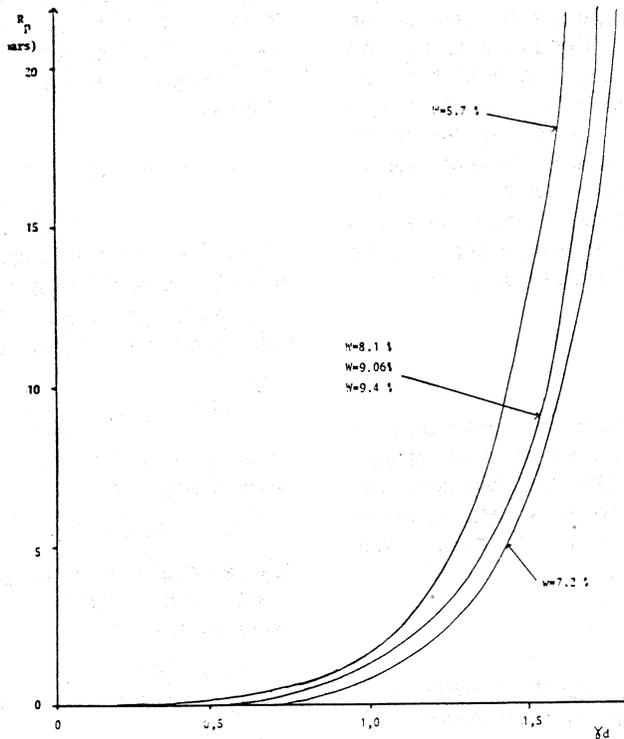
$$R_p = k \exp^{\alpha \cdot d} \dots \dots \dots (1)$$

R<sub>p</sub> = tahanan penetrasi  
k, α = koefisien

Harga-harga k dan α pada interval kadar lengas 5,7 — 9,4% dapat dilihat dalam tabel 3.

Tabel 2. Harga tahanan penetrasi ( $R_p$ ), berat volume kering ( $\gamma_d$ ) pada berbagai kadar lengas ( $w$ ) dan tingkat pemadatan (PA)

PA (bars)	w = 5,7%		w = 7,2%		w = 8,1%		w = 9,06%		w = 9,4%		Rp (bars)
	Rp (bars)	$\gamma_d$									
0	0,8	0,80	0,6	0,90	0,7	0,95	0,6	1,11	0,6	1,07	0,8
0,03	1,2	0,91	1,1	0,99	1,0	1,03	0,9	0,16	—	—	—
0,5	6,5	1,32	5,0	1,37	5,0	1,40	4,1	1,55	4,0	1,42	3,3
1	9,0	1,41	7,6	1,46	6,7	1,46	5,4	1,63	5,2	1,61	4,7
1,5	12,3	1,46	8,6	1,47	7,3	1,48	6,7	1,65	5,7	1,65	5,3
2	13,9	1,49	9,7	1,49	8,1	1,51	7,9	1,68	7,5	1,68	6,7
2,5	15,3	1,51	10,1	1,53	8,7	1,54	8,1	1,70	8,1	1,69	7,0
3,5	15,9	1,54	11,9	1,56	11,3	1,56	9,6	1,71	9,0	1,72	8,2
4,5	18,7	1,56	11,9	1,57	11,5	1,57	10,4	1,75	10,4	1,74	9,6
5,5	20,6	1,57	14,7	1,58	—	—	—	—	—	—	9,5



Gambar 1. Hubungan tahanan penetrasi dan berat volume kering tanah pasir

Tabel 3. Harga k dan  $\alpha$

Kadar Lengas (%)	5,7	7,2	8,1	9,1	9,4
k (bar)	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
$\alpha$ (tanpa satuan)	4,37	4,39	4,47	4,49	4,52

Dari bentuk hubungan tahanan penetrasi dan berat volume kering yang cenderung eksponensial, dengan korelasi yang cukup tinggi ( $0,99 < R^2 < 1$ ), jelas bahwa tahanan penetrasi dan berat volume kering merupakan dua variabel ukur yang berkaitan satu sama lain. Pada harga berat volume tanah yang besar ( $> 1,0 \text{ g/cm}^3$ ) peningkatan harga tahanan penetrasi jauh lebih besar dibanding pada berat volume kering yang rendah. Hal ini sesuai dengan hasil kajian teoritik yang telah dikemukakan pada landasan teori. Dengan demikian pada tanah yang relatif padat, tahanan penetrasi dapat memperbesar kenyataan adanya perbedaan berat volume kering tanah. Dengan perkataan lain, pengukuran tahanan penetrasi cenderung lebih peka untuk mendeteksi perubahan tingkat kepadatan tanah dibanding pengukuran berat volume kering, pada kondisi tanah yang sama.

### Analisa Hasil

Secara matematis, diperlukan cara untuk menyatakan tahanan penetrasi sebagai besaran mekanik. Dari landasan teori telah diperoleh hubungan antara tahanan penetrasi dan berat volume basah tanah pasiran.

$$q_c = D \cdot \sigma \cdot N_q + C \cdot N_c \dots \dots \dots (1)$$

Harga  $N_q$  sangat tergantung pada sudut gesek dakhil  $\varphi$  yang dapat dinyatakan:

$$N_q = \text{tg}^2 (\pi/4 + \varphi/2) \cdot e^{\pi \text{tg} \varphi} \dots \dots (2)$$

$$N_c = (N_q - 1) / \text{tg} \varphi \dots \dots \dots (3)$$

Dengan demikian harga tegangan runtuh atau tahanan penetrasi pada penetrometer dapat dituliskan:

$$q_c = R_p = \sigma \cdot D \cdot \text{tg}^2 (\pi/4 + \varphi/2) \cdot e^{\pi \text{tg} \varphi} + C / \text{tg} \varphi \{ \text{tg}^2 (\pi/4 + \varphi/2) e^{\pi \text{tg} \varphi} - 1 \}$$

Untuk mencari  $q_c$  diperlukan harga  $\sigma$ ,  $D$ ,  $C$  dan  $\varphi$ . Pada tanah pasir yang digunakan, dilakukan pengukuran  $C$  dan  $\varphi$  dengan bantuan peralatan triaxial, percobaan tipe UU. Hasilnya dapat dilihat dalam lampiran 2.

Kesulitan yang dihadapi dalam menyiapkan sampel tanah telah mengakibatkan hanya ada satu pengukuran pada kadar lengas 10,3% dan berat volume kering  $\sigma \cdot d = 1,5$ . Hasil yang diperoleh adalah kohesi  $C = 0$ , dan sudut gesek dakhil  $\varphi = 29^\circ$ . Dengan demikian rumus (4) dapat dituliskan:

$$R_p = \sigma \cdot D \cdot \text{tg}^2 (\pi/4 + \varphi/2) \cdot \exp^{\pi \text{tg} \varphi} \dots \dots \dots (5)$$

Menurut Caquot dan Kerisel (1948) dalam Costet et al (1979), antara nisbah pori  $e$  dan sudut gesek dakhil tanah  $\varphi$  terdapat hubungan yang mendekati proporsional.

$$e \text{tg} \varphi = A \dots \dots \dots (6)$$

karena  $e = G / \sigma \cdot d - 1$  ( $G = 2,7$ , berat jenis tanah), maka

$$(G / \sigma \cdot d) \text{tg} \varphi = A \dots \dots \dots (7)$$

Dengan memasukkan harga  $\sigma \cdot d$ ,  $\varphi$  dan  $G$  dapat diperoleh harga  $A = 0,4$ . Harga  $\text{tg} \varphi$  dapat dituliskan:

$$\text{tg} \varphi = A/e$$

$$\text{tg} \varphi = 0,4 \sigma \cdot d / (G - \sigma \cdot d) \dots \dots \dots (8)$$

Hubungan antara tahanan penetrasi dan berat volume tanah kering dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$R_p = \sigma \cdot D \cdot \text{tg}^2 \left\{ \frac{\pi}{4} + \text{arc tg} \left( \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot \frac{jd}{(2,7 - jd)} \right) \right\} \cdot \exp^{\pi \cdot 0,4 \cdot \frac{\sigma d}{(2,7 - \sigma d)}}$$

karena  $\sigma d = \sigma / (1 + m)$

$m = \text{kadar lengas}$

maka persamaan tersebut dapat dituliskan:

$$R_p = \sigma d (1 + m) \cdot \text{tg}^2 \left\{ \frac{\pi}{4} + \text{arc tg} \left( \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot \frac{jd}{(2,7 - jd)} \right) \right\} \cdot \exp^{\pi \cdot 0,4 \cdot \frac{\sigma d}{(2,7 - \sigma d)}}$$

Formula matematis tersebut di atas menggambarkan hubungan tahanan penetrasi dan berat volume kering tanah pasir yang cenderung eksponensial. Dengan demikian dapat disimpulkan adanya kesamaan bentuk hubungan, baik yang diperoleh secara experimental maupun yang diperoleh dari pendekatan matematis.

### Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa pada tanah pasir yang memiliki interval kadar lengas di bawah optimum Proctor, tahanan penetrasi yang diperoleh lewat penetrometer dapat menggambarkan harga berat volume kering tanah. Dari bentuk hubungan yang cenderung eksponensial, tahanan penetrasi lebih peka dalam menggambarkan tingkat pemadatan tanah dibanding dengan pengukuran berat volume kering, terutama untuk harga berat volume yang relatif besar.

### Daftar Pustaka

- Braja, D.M. (1979). Introduction to soil mechanics. The Iowa State University Press, Ames.
- Costet, J., Sanglérat, G. (1969). Cours pratique mécanique des sol Dunod, Paris.

Koolen, A.J., Kuipers, H. (1983). Agricultural Soil Mechanics. Springer Verlag, Berlin.

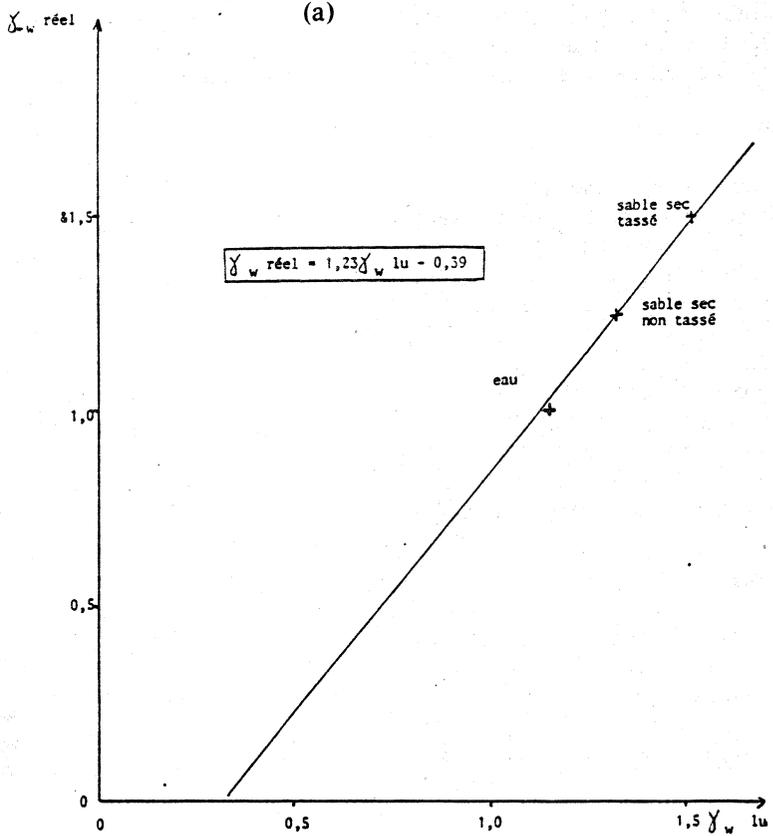
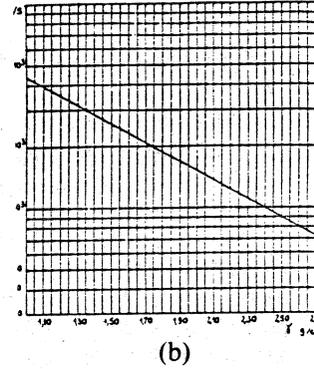
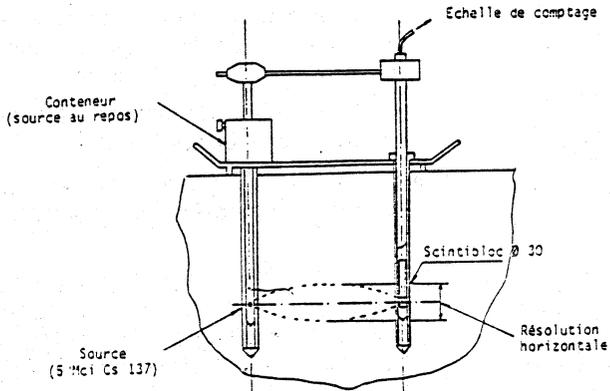
Rozaq, A. (1987). Etalonnage du pénétromètre dans le milieu révélateur de tassement. Session sur le perfectionnement du travail du sol. INA-Cémagref.

Sanglérat, G (1972). Soil penetrometer and soil exploration. Elsevier, Amsterdam.

Soane, B.D. (1983). Compaction by agricultural vehicles. SIAE Technical Report 5.

Tollner, E.W. (1985). Perspectives for using the cone penetrometer in quantifying soil mechanical impedance. Proceeding of Int. Conf. on Soil Dynamics. Auburn, Alabama.

Lampiran 1. Alat pengukur berat volume tanah (a) dan hasil kalibrasi (b) serta kalibrasi perhitungan tebal baja kotak tanah (c)



Lampiran 2. Hasil percobaan Triaxial-uu tanah pasir

Ministere de l'Agriculture  
C. E. M. A. G. R. E. F.

Division Mecanique des Sols  
et Genie Civil

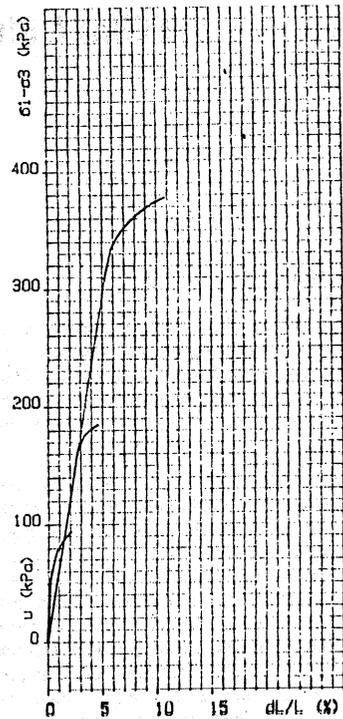
ESSAI TRIAXIAL UU

Dossier No  
Provenance  
Date de l'essai

Echantillon O  
Profondeur m  
Operateur

So (cm<sup>2</sup>) = 9.62      WL = 0      G sol = 2.7  
Lo (mm) = 80      WP = 0      Vitesse = 0.102  
d'ecras. (mm/mn)

Etat initial				σ <sub>3</sub>	Etat final			
w%	&d	e	Sr%		w%	&d	e	Sr%
11.3	1.5	.805	37.9	50	0	0	0	0
0	0	0	0	100	0	0	0	0
0	0	0	0	200	0	0	0	0
Observation:								



Ministere de l'Agriculture  
C. E. M. A. G. R. E. F.

Division Mecanique des Sols et Genie Civil

ESSAI TRIAXIAL UU

Dossier No  
Provenance

Echantillon No O  
Profondeur m  
Date de l'essai

σ <sub>3</sub>	σ <sub>1</sub>	u	dh/h %	σ <sub>1</sub> -σ <sub>3</sub>
50	144.9	0	2.1	94.9
100	285.5	0	4.6	185.5
200	578.6	0	10.9	378.6

