

# STUDI GEOMETRI PROBE UNTUK SENSOR KELEMBAPAN TANAH DENGAN METODE TIME DOMAIN REFLECTOMETRY

Muhammad Amin Sulthoni<sup>1, 2\*</sup>, dan Ndaru Anggit Wicaksono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Mikroelektronika Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

\*E-mail: mamiens@stei.itb.ac.id

## Abstrak

Time Domain Reflectometry (TDR) adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengukur kelembapan tanah. Cepat rambat gelombang elektromagnetik pada suatu medium atau probe berupa susunan logam berbentuk silinder atau pelat dipengaruhi oleh kelembapan tanah. Besarnya pengaruh kelembapan tanah ditentukan oleh struktur dan dimensi probe yang digunakan. Pada makalah ini akan disampaikan hasil studi yang membandingkan probe sensor yang menggunakan geometri probe silinder, plat paralel dan plat koplanar; serta sensor yang terdiri dari 2 atau 3 silinder/pelat. Pengujian akan dilakukan dengan 2 metode yaitu pemodelan elektrostatik probe menggunakan software dan pengukuran di laboratorium. Hasil pemodelan dan percobaan menunjukkan bahwa probe plat koplanar merupakan geometri yang paling baik untuk diimplementasikan sebagai sensor pendeteksi kelembapan tanah dengan metode TDR karena memiliki sensitivitas dan error linieritas yang paling baik.

*Kata kunci: Time Domain Reflectometry, kelembapan tanah, probe sensor, dielektrik, sensitivitas*

## Abstract

Time Domain Reflectometry (TDR) is one of the methods used to measure soil moisture. The speed at which electromagnetic waves propagate on a medium or probe in the form of cylindrical or plate-shaped metal structures is affected by soil moisture. The amount of influence of soil moisture is determined by the structure and dimensions of the probe used. This paper will present the results of a study comparing sensor probes using cylindrical probe geometry, parallel plates and coplanar plates; and sensors consisting of 2 or 3 cylinders / plates. Testing will be done by 2 methods, namely electrostatic probe modeling using software and measurements in the laboratory. Modeling and experimental results show that coplanar plate probes are the best geometry to be implemented as a soil moisture detection sensor with the TDR method.

*Keywords: Time Domain reflectometry, soil moisture, sensor probe, dielectric, sensitivity*

## 1. Pendahuluan

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur kelembapan tanah adalah Time Domain Reflectometry (TDR) [1 - 4]. Sinyal masukan berupa gelombang elektromagnetik berbentuk pulsa dialirkan melalui probe logam yang berbentuk silinder atau plat, dan saat sinyal mencapai ujung probe akan terjadi pemantulan sebagian atau seluruhnya dari sinyal pulsa tersebut. Pada metode TDR, sinyal masukan yang bergabung dengan sinyal pantulan tersebut dianalisa, dan kecepatan rambat gelombang elektromagnetik dalam probe yang ditanam didalam tanah dihitung untuk mengetahui nilai konstanta dielektrik dari tanah, dan selanjutnya kelembapan tanah bisa diketahui. Konstruksi dari probe sensor dan jalur transmisi gelombang akan mempengaruhi bentuk dari sinyal gabungan ini. Proses analisa bentuk gelombang biasanya dilakukan secara elektronik. Beberapa pengembangan sistem instrumentasi di bidang ini

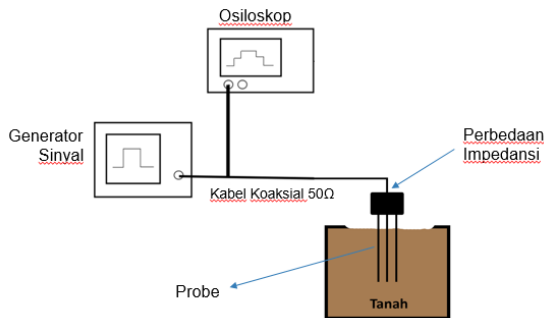
diantaranya dilakukan dengan menggunakan FPGA [5] maupun berbasis mikrokontroler untuk sistem yang lebih murah meskipun dengan unjuk kerja lebih rendah [6, 7]. Makalah ini akan membahas mengenai karakteristik dari gelombang sinyal dan pantulannya, dan desain bentuk probe sebagai sensor pengukuran kelembapan tanah dengan metode TDR.

## 2. Metode

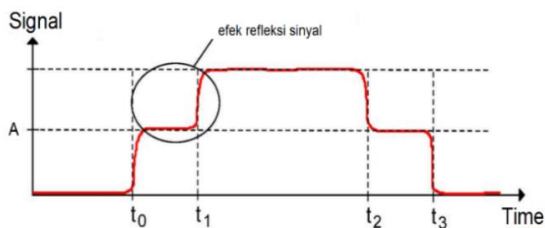
### 2.1. Metode Time Domain Reflectometry

Gambar 1 memperlihatkan skema rangkaian yang umum digunakan pada pengukuran menggunakan metode TDR [1, 8]. Generator sinyal berfungsi sebagai penghasil sinyal input pada sistem berupa sinyal berbentuk pulsa dengan frekuensi tertentu. Gelombang tersebut dirambatkan melalui kabel koaksial yang disambungkan pada probe yang ditancapkan ke tanah. Pantulan sinyal terjadi pada ujung probe dan bergabung dengan sinyal input, dan

selanjutnya gabungan sinyal tersebut dapat dianalisa atau diamati melalui osiloskop. Bentuk tipikal sinyal gabungan diperlihatkan gambar 2. Terlihat pada  $t_0$  terjadi kenaikan pada sinyal sesuai dengan sinyal input yang diberikan. Sinyal tidak berubah hingga pada  $t_1$  sinyal tersebut mengalami kenaikan lagi untuk kedua kalinya karena terjadinya fenomena refleksi yang dihasilkan oleh perbedaan permitivitas medium rambat, sehingga ada sinyal balik (feedback) positif yang diterima oleh osiloskop.



Gambar 1 Model sistem TDR.



Gambar 2 Bentuk Sinyal TDR

Pada  $t_2$ , sinyal umpan yang diberikan telah turun menjadi nol (falling edge) sehingga hanya sinyal hasil refleksi yang terbaca pada osiloskop. Sinyal refleksi tersebut kemudian habis di  $t_3$ , membuat nilai baca pada osiloskop menjadi nol. Besar sinyal refleksi yang dihasilkan bergantung pada besar perbedaan impedansi yang terjadi. Dalam beberapa kasus, sinyal refleksi yang dihasilkan dapat berupa sinyal negatif sehingga bentuk dari sinyal yang dihasilkan akan berbeda. Selain itu, besar dari impedansi medium maupun tanah uji juga akan mengurangi nilai tegangan A dari sinyal yang tercatat.

Dalam implementasi untuk alat ukur, metode TDR memanfaatkan jeda waktu refleksi yang dihasilkan pada refleksi sinyal tersebut ( $\Delta t$ ). Besar  $\Delta t$  yang dihasilkan adalah

$$\Delta t = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 \quad (1)$$

## 2.2. Teori Transmisi Gelombang

TDR akan mengukur waktu perambatan sinyal step yang memiliki frekuensi antara 20 kHz sampai 1.5 GHz.

Kecepatan dari sinyal akan dipengaruhi oleh konstanta dielektrik medium rambatnya. Persamaan cepat rambat sinyal elektromagnet dan material yang dilewatinya adalah sebagai berikut [1]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad (2)$$

Pada persamaan tersebut,  $v$  merupakan kecepatan sinyal yang merambat pada suatu medium yang memiliki konstanta dielektrik sebesar  $\epsilon_r$ . Sedangkan  $c$  dan  $K_a$  masing-masing adalah cepat rambat gelombang elektromagnetik di ruang hampa dan konstanta dielektrik. Pada sistem TDR, sinyal akan merambat melalui probe, yang ditancapkan pada tanah, memiliki panjang  $L$  dengan selang waktu tertentu ( $t$ ). Cepat rambat sinyal pada probe tersebut dapat dirumuskan sebagai :

$$v = 2L/t \quad (3)$$

## 2.3. Perhitungan Nilai Kelembapan Tanah

Nilai kelembapan tanah dapat ditentukan dengan mencari konstanta dielektrik pada tanah tersebut. Sesuai dengan persamaan (2), semakin besar konstanta dielektrik maka cepat rambat sinyal akan semakin lambat. Perbandingan nilai konstanta dielektrik dari air dan material lain yang ada di tanah seperti mineral dan udara sangat besar sehingga cepat rambat sinyal akan bergantung dengan banyak sedikitnya kandungan air pada tanah tersebut. Dari persamaan (2) dan (3) didapatkan hubungan antara cepat rambat sinyal, panjang medium rambat, dan konstanta dielektrik  $K_a$  dari medium rambatnya sebagai berikut :

$$K_a = \left[ \frac{vt}{2L} \right]^2 \quad (4)$$

Untuk mengubah nilai  $K_a$  menjadi persentase kelembapan tanah, digunakan persamaan berikut [1]:

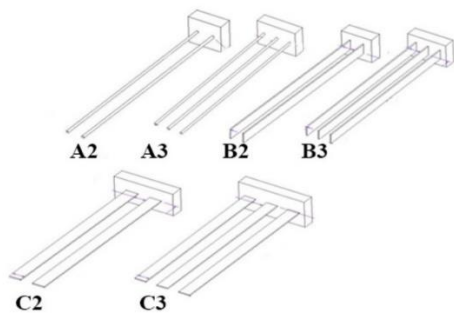
$$Rh = \frac{(-530 + 292K_a - 5.5K_a^2 + 0.043K_a^3)\%}{100} \quad (5)$$

## 2.4. Simulasi Sinyal TDR

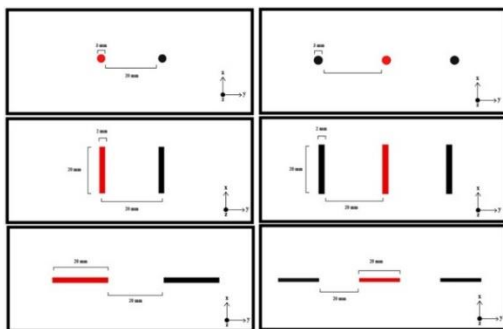
Simulasi laboratorium dilakukan dengan skema sebagaimana diperlihatkan gambar 1, dengan menggunakan input berupa sinyal persegi dengan frekuensi 1 MHz dan amplitudo 3V yang dihasilkan oleh generator sinyal. Sinyal dialirkan ke kabel koaksial dengan ujung berupa resistor variable dan kapasitor yang dapat diubah-ubah nilainya. Kedua komponen ini menggantikan atau merepresentasikan probe yang akan digunakan. Panjang kabel koaksial yang digunakan adalah 10 meter dengan impedansi 50Ω. Osiloskop dihubungkan pada kabel koaksial diantara generator sinyal dan resistor variable sehingga akan menangkap sinyal input dari generator sinyal, dan sinyal refleksi dari ujung.

### 2.5. Desain Probe

Perancangan probe TDR dilakukan dengan membuat beberapa alternatif bentuk geometri dan jumlah probe untuk kemudian dianalisis probe manakah yang dapat menjadi sensor paling baik. Probe yang baik adalah probe yang menghasilkan bentuk sinyal gabungan input dan refleksi yang paling memudahkan proses analisis selanjutnya serta paling sensitif terhadap konstanta dielektrik/kelembapan tanah. Probe yang paling merepresentasikan konstanta dielektrik dari tanah yang diukur adalah probe yang menghasilkan distribusi energi paling merata pada tanah yang diukurnya [1, 9]. Bentuk geometri probe juga perlu diperhatikan, karena probe yang terlalu panjang akan mengakibatkan atenuasi sinyal semakin besar namun jika probe terlalu pendek akan menyebabkan waktu yang ditempuh sinyal refleksi menjadi semakin kecil sehingga akan menyulitkan pengamatan. Kemudahan penggunaan pada lapangan juga merupakan faktor yang perlu dipertimbangkan.



Gambar 3 Desain probe yang digunakan: A. Silinder paralel, B. Plat paralel, C. Plat Koplanar



Gambar 4 Desain probe secara 2D yang digunakan dalam simulasi

Berdasarkan dari studi literatur dan probe TDR yang sudah digunakan pada alat-alat yang terstandarisasi, bentuk probe yang dijadikan alternatif adalah silinder, plat dan planar dengan jumlah probe 2 dan 3 dengan material stainless steel [10, 11]. Sebagaimana diperlihatkan pada gambar 3 dan gambar 4, panjang probe yang digunakan adalah 20 cm dengan jarak antar probe 2 cm. Untuk probe silinder,

diameter silinder yang digunakan adalah 0.3 cm sedangkan pada probe plat dan planar, lebar probe yang digunakan adalah 2 cm.

### 2.6. Desain Pemodelan Elektrostatik Probe

Probe yang ditancapkan ke tanah diberikan beda potensial sebesar 3V yang menyebabkan timbulnya medan elektrostatik. Potensial elektrostatik ( $\Phi$ ) tersebar diantara probe TDR yang mediumnya memiliki dielektrik yang bervariasi tergantung posisinya yang memenuhi persamaan Maxwell [12]:

$$\nabla(K_a \nabla \Phi) = 0 \tag{6}$$

Dimana  $\nabla$  adalah operator matematis diferensial. Hubungan differensial untuk medan elektrostatik E adalah

$$\nabla \times E = 0 \tag{7}$$

Dan hubungan antara medan elektrostatik dan potensial dapat didefinisikan sebagai:

$$E = -\nabla \Phi \tag{8}$$

Setelah medan elektrostatik didapatkan, energi W yang disimpan di antara 2 probe adalah:

$$W = \frac{1}{2} \epsilon \int E^2 dv \tag{9}$$

Atau energy yang disimpan di antara 2 probe per satuan volume sebagai fungsi konstanta dielektrik  $\epsilon$  adalah

$$W = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \tag{10}$$

Dari persamaan tersebut terlihat nilai dielektrik tanah dipengaruhi pola penyebaran medan listrik dan potensial di sekitar probe. Untuk menggambarkan pola penyebaran energi antar probe, dilakukan simulasi medan elektrostatik dua dimensi menggunakan software ANSYS MAXWELL 2D. Pada sensor yang menggunakan 2 buah probe, probe 1 berfungsi sebagai data dan probe 2 sebagai ground, sedangkan sensor dengan 3 buah probe, 1 probe di tengah berfungsi sebagai data dan dua probe yang mengapitnya sebagai ground. Pada probe data diberi potensial dipermukaannya sebesar 3V sedangkan di ground 0V. Kemudian nilai-nilai batas diatur dengan konstanta dielektrik 1 merepresentasikan udara dan fluks listrik 0.

## 3. Implementasi, Pengujian, dan Pembahasan

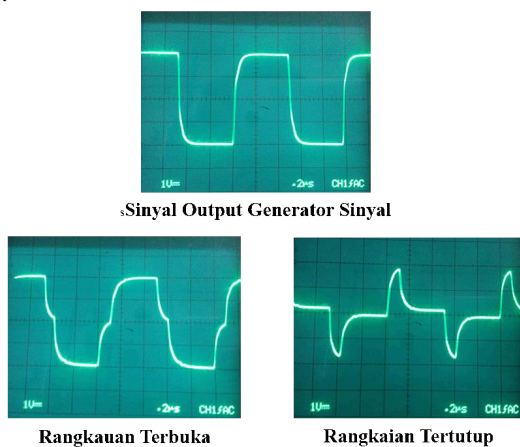
### 3.1. Implementasi Simulasi dengan Eksperimen terhadap Sinyal TDR

Simulasi Sinyal TDR diawali dengan mengamati karakteristik sinyal ketika  $Z_L$  belum dihubungkan pada

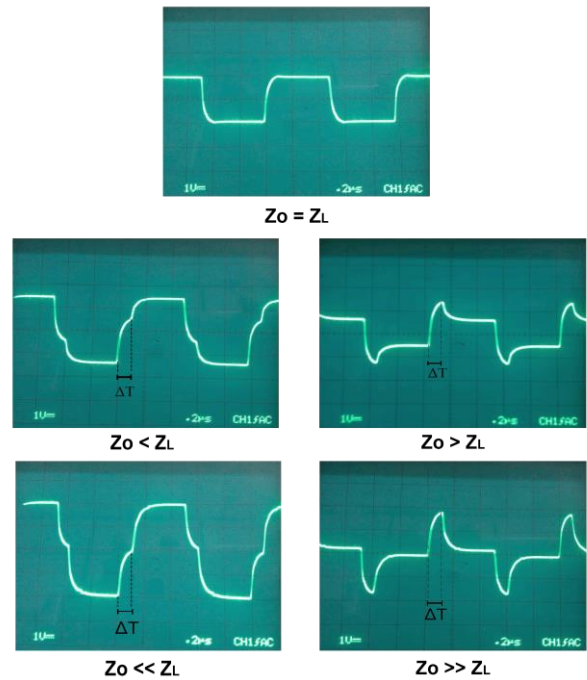
kabel koaksial sehingga rangkaian terbuka. Kemudian kabel data dan ground pada kabel koaksial dihubungkan sehingga rangkaian menjadi tertutup. Impedansi dari kabel koaksial ( $Z_0$ ) adalah  $50\Omega$ . Resistor variabel ( $Z_L$ ) dengan nilai maksimum  $1\text{ k}\Omega$  dipasang pada ujung kabel koaksial dan besarnya diubah-ubah sehingga dapat diketahui efek besarnya perbedaan antara  $Z_0$  dan  $Z_L$  terhadap sinyal yang ditangkap oleh osiloskop. Pemasangan resistor sebagai beban menyimulasikan bagian nyata (real) dari impedansi beban, dalam hal ini tanah, yang merupakan impedansi kompleks.

Sebagaimana diperlihatkan pada gambar 5 dan 6, saat  $Z_L = Z_0$ , sinyal yang ditangkap oleh osiloskop mengalami penurunan amplitudo dari  $4\text{V}$  menjadi  $2\text{V}$ . Penurunan tegangan ini terjadi karena adanya efek pembebanan pada ujung kabel koaksial sehingga rangkaian menjadi tertutup. Sinyal refleksi tidak tampak karena tidak ada perbedaan impedansi pada medium yang dilewati oleh sinyal. Sinyal refleksi mulai tampak seiring dengan perubahan  $Z_L$  ditandai dengan terdapat penambahan amplitudo setelah jeda waktu  $\Delta T$  pada saat  $Z_L > Z_0$  dan pengurangan amplitudo pada saat  $Z_L < Z_0$ . Semakin besar perbedaan antara  $Z_L$  dan  $Z_0$  maka besarnya amplitudo refleksi juga akan semakin besar.

Ketika  $Z_L$  bernilai  $100\ \Omega$  maka amplitudo sinyal refleksi akan sama dengan sinyal utama begitu pula ketika lebih dari  $100\Omega$ . Impedansi yang terlalu besar akan menyerupai rangkaian terbuka sehingga karakteristiknya akan sama dengan sinyal TDR pada saat rangkaian terbuka. Begitu pula ketika nilai  $Z_L$  mendekati  $0$ , amplitudo sinyal refleksi akan semakin besar namun dengan polaritas berkebalikan, rangkaian menyerupai rangkaian tertutup sehingga karakteristik sinyal TDR nya juga sama. Jeda waktu refleksi tidak dipengaruhi oleh perubahan resistansi, hanya bergantung pada panjangnya kabel. Jeda waktu refleksi yang dihasilkan oleh kabel  $10$  meter adalah  $100\text{ns}$ , berarti tiap  $1$  meter kabel akan memberikan jeda refleksi  $10\text{ns}$ .

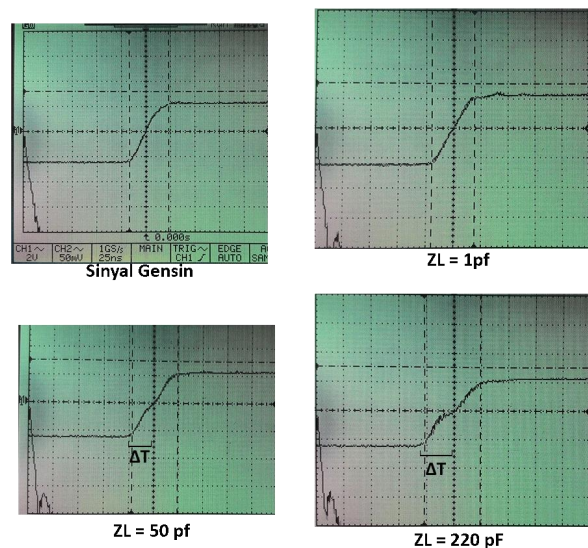


Gambar 5. Gelombang yang ditangkap saat  $Z_L$  belum dipasang, kondisi open dan short circuit.



Gambar 6. Sinyal TDR saat  $Z_L$  berupa resistor variabel yang berubah nilainya.

Selanjutnya,  $Z_L$  diubah menjadi kapasitor. Nilai kapasitansi yang dihasilkan probe ketika dielektriknya berupa udara ( $K_a = 1$ ) adalah sekitar  $1\text{-}2\text{ pF}$  sedangkan saat dielektriknya air ( $K_a=80$ ) akan bernilai  $80\text{-}160\text{ pF}$ . Berdasarkan data ini, nilai kapasitor yang digunakan untuk merepresentasikan probe adalah  $1\text{pf}$ ,  $50\text{ pf}$ , dan  $220\text{ pf}$ . Hasil sinyal yang ditangkap oleh osiloskop diperlihatkan pada gambar 7. Terlihat bahwa peningkatan nilai kapasitansi beban akan meningkatkan waktu delay sinyal refleksi, sebagaimana diprediksi sesuai dasar teori.



Gambar 7. Sinyal TDR saat  $Z_L$  berupa kapasitor dengan nilai kapasitansi berubah-ubah.

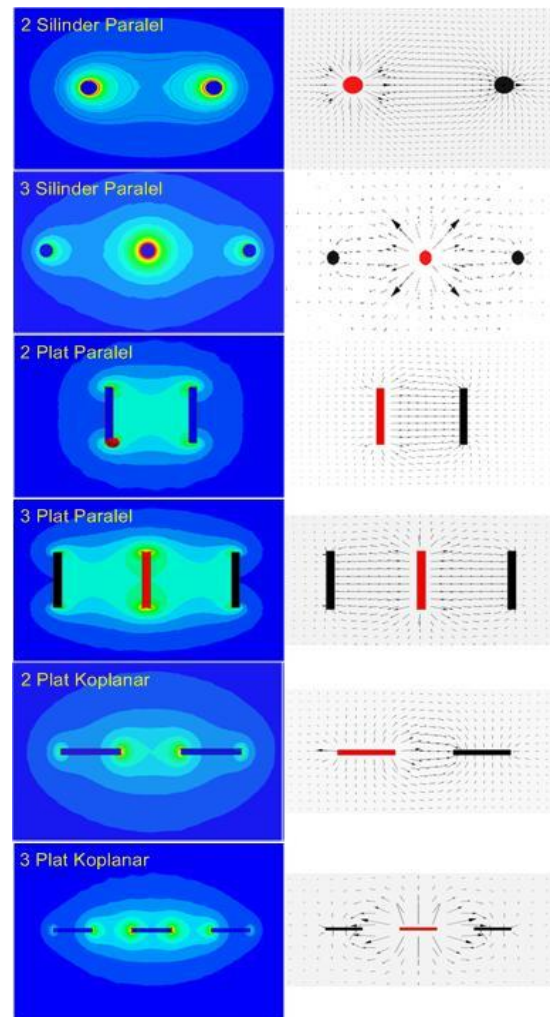
### 3.2. Implementasi Simulasi Elektrostatik

Hasil simulasi distribusi medan elektrostatik yang dihasilkan oleh probe dengan berbagai geometri menggunakan ANSYS-2D diperlihatkan pada gambar 8. Dari hasil simulasi terlihat pola distribusi medan listrik yang menunjukkan bagian/daerah material dielektrik yang mempengaruhi pengukuran, yang disebabkan karena medan listrik akan mempolarisasi material dielektrik disekitarnya. Banyaknya dielektrik yang terpolarisasi akan mempengaruhi panjang fluks listrik dimana semakin banyak polarisasi pada material dielektrik, maka semakin besar nilai dielektrik yang mempengaruhi probe, dan semakin panjang pula fluks listrik yang digambarkan [2].

Hasil simulasi probe menunjukkan jika distribusi medan listrik yang dihasilkan oleh plat paralel paling merata, diikuti oleh plat koplanar dan yang paling buruk adalah silinder. Penambahan jumlah probe menjadi 3 justru akan semakin rapatkan medan listrik ke permukaan probe sehingga probe akan cenderung hanya lebih peka terhadap dielektrik yang ada disekitar permukaannya saja, namun penambahan jumlah probe juga menambah daerah yang terpolarisasi sehingga sensitivitas juga akan bertambah.

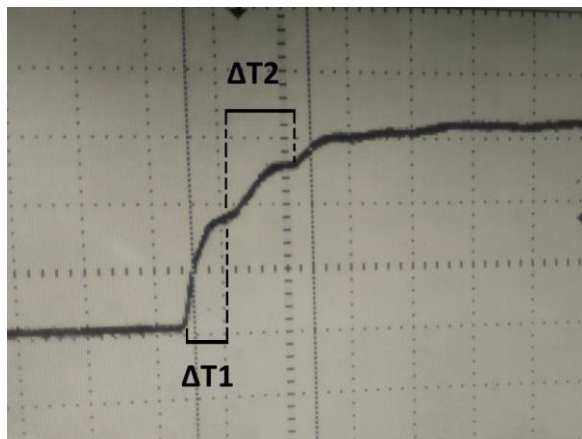
### 3.3. Pengujian dengan Eksperimen

Pengujian melalui eksperimen dilakukan dengan menggantikan  $Z_L$  dengan probe yang dibuat sesuai simulasi. Secara umum, sinyal refleksi yang diakuisisi pada masing-masing probe adalah ditunjukkan gambar 9. Terdapat 2 refleksi sinyal yang terbentuk pada sinyal TDR ini.  $\Delta T1$  merupakan jeda waktu refleksi yang disebabkan karena perbedaan impedansi antara kabel koaksial dan probe. Jeda waktu yang ditimbulkan konstan sebesar 20 ns karena perbedaan impedansi bersifat resistif sehingga hanya dipengaruhi oleh panjangnya kabel koaksial yang digunakan. Kemudian  $\Delta T2$  merupakan jeda waktu refleksi yang ditimbulkan ketika sinyal memantul pada ujung probe. Probe bersifat kapasitif dan ketika ditancapkan ke tanah maka konstanta dielektrik sesuai dengan dielektrik tanah tersebut. Semakin banyak kandungan air pada tanah, maka konstanta dielektrik tanah tersebut semakin besar sehingga nilai kapasitansi yang dihasilkan oleh probe akan semakin besar. Sesuai dengan uji simulasi sinyal TDR, ketika beban kapasitif semakin besar maka jeda waktu yang ditimbulkan akan semakin panjang. Dengan demikian, nilai kelembapan tanah dapat diukur sesuai dengan penambahan jeda waktu refleksi ketika probe ditancapkan ke tanah.



**Gambar 8. Simulasi dengan ANSYS 2D yang memperlihatkan pola medan listrik (kiri) dan fluks medan listrik (kanan) pada berbagai bentuk geometri. Elektroda yang berwarna merah mendapatkan potensial 3V terhadap elektroda berwarna hitam.**

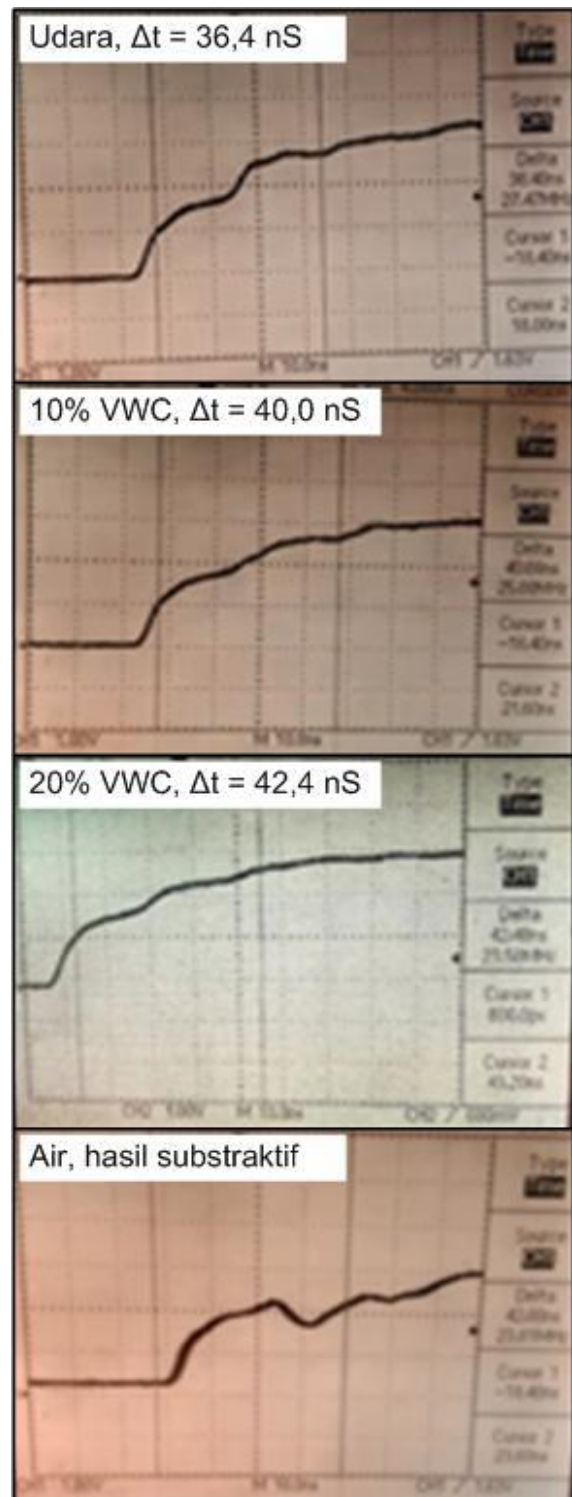
Kemudian probe digunakan pada 4 buah sampel tanah, yaitu udara, tanah dengan kadar volumetric water content (VWC) 10%, tanah dengan kadar VWC 20% dan air. Contoh hasil untuk eksperimen menggunakan probe 2 koplanar ditunjukkan oleh gambar 10. Dari hasil tersebut terlihat bahwa semakin banyak kandungan air, maka jeda waktu refleksi akan semakin panjang. Pada tabel 2, jeda waktu dihitung dari tegangan 1V sampai tegangan 2.8V. Namun pada saat probe digunakan pada air, hasil sinyal TDR yang terbentuk bersifat substraktif atau sinyal refleksi akan mengurangi sinyal utama. Keadaan ini harus dihindari karena modul pengolah data hanya bisa mengolah sinyal refleksi yang bersifat additif. Percobaan ini juga membuktikan jika probe memiliki sifat resistif dan kapasitif. Sifat resistif dapat diidentifikasi ketika probe ditancapkan ke tanah yang lebih lembab, maka amplitudo refleksi akan semakin kecil.



Gambar 9. Hasil umum sinyal TDR yang diakuisisi.

Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan antara hasil jeda waktu refleksi ( $\Delta T$ ) yang ditangkap oleh sensor dan nilai kelembapan yang diukur dengan metode perhitungan VWC [13]. Volumetric Water Content (VWC) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengukur kelembapan tanah dengan membandingkan berat/volum tanah basah dan berat/volum tanah kering. Sampel tanah diambil dari lapangan, kemudian diukur massanya. Setelah itu, sampel dikeringkan di mesin pengering selama 10 jam. Massa sampel tanah yang kering diukur kembali dan didapatkan pengurangan massa. Massa yang hilang ini merupakan massa air yang terkandung pada tanah sebelumnya. Sehingga perbandingan massa air dan massa tanah kering akan menghasilkan % kelembapan VWC. Tanah hanya mampu menampung air sebesar 40% dari massa tanah kering tersebut, dengan demikian nilai VWC 40% setara dengan 100% kelembapan tanah. Nilai ini diambil berdasarkan aplikasi praktis pengukuran tanah pertanian di lapangan, dimana diatas nilai VWC 40%, tanah dikategorikan sebagai lumpur yang tidak praktis untuk aplikasi pertanian [9, 14].

Pengujian dilakukan menggunakan 5 buah sampel tanah yang memiliki nilai kelembapan yang berbeda-beda. Untuk memastikan perbedaan kelembapan, digunakan sampel tanah kering sebagai dasarnya. Tanah kering disiapkan dengan memanaskan tanah sampel dalam oven bersuhu 120oC selama 10 jam untuk memastikan semua kandungan air telah menguap. Kemudian ditambahkan air dengan berat 5%, 15%, 25%, dan 35% dari berat tanah, untuk mendapatkan tingkat kelembapan tanah secara berurutan adalah 12,5%, 37,5%, 62,5% dan 87,5%. Kekurangan dari metode ini adalah kelembapan tanah kering yang digunakan sebagai sampel dasar tidak dapat diukur sehingga diasumsikan memiliki kelembapan 0%.



Gambar 10 Karakteristik sinyal saat probe digunakan di udara, tanah 10% VWC, tanah 20% VWC, dan air.

Dari hasil pengujian, probe yang menghasilkan kesalahan terkecil maupun sensitivitas terbaik adalah yang berbentuk 3-koplanar. Namun untuk 3 probe koplanar, sinyal TDR akan bersifat substraktif ketika kelembapan lebih dari 63% sehingga pengukuran akan saturasi pada titik tersebut.

Namun pada aplikasinya, sangat mungkin terdapat hal lain yang harus dipertimbangkan ketika memilih suatu probe untuk aplikasi pengukuran kelembapan tanah dengan metode TDR, misalnya kemudahan pemakaian, harga material, dan lain sebagainya. Ini sesuai jika memperhatikan jenis-jenis probe yang beredar dan dipergunakan di pasaran untuk aplikasi praktis [10, 11, 15].

**Tabel 1. Hasil Pengukuran**

Sample	VWC (%) *	% Kelembapan					
		2 Silinder	3 Silinder	2 Plat Paralel	3 Plat Paralel	2 Plat Koplanar	3 Plat Koplanar
Udara	0.00	0	0	0	0	0	0
Tanah 1	0.00	3.13	6.09	6.02	12.50	5.86	1.61
Tanah 2	12.50	11.88	10.43	16.67	29.86	12.61	10.00
Tanah 3	37.50	23.96	23.48	34.26	47.22	35.59	28.71
Tanah 4	62.50	52.60	41.74	48.84	60.42	57.21	60.32
Tanah 5	87.50	87.45	81.74	89.35	90.28	90.99	89.68

\*: Persentase kelembapan tanah diukur dengan metode VWC, dimana 100% kelembapan tanah setara dengan 40% massa air terhadap tanah kering (VWC).

**Tabel 2. Karakteristik Pengukuran**

Probe	Akurasi	Sensitivitas (ns/% Kelembapan)	Error Linearitas
Silinder 2	94.55%	0.14	5.55%
Silinder 3	90.26%	0.11	6.68%
Plat 2	94.21%	0.20	5.10%
Plat 3	91.11%	0.18	12.56%
Koplanar 2	96.67%	0.20	3.49%
Koplanar 3	96.55%	0.26	3.02%

#### 4. Kesimpulan

Pada makalah ini telah dipaparkan tentang studi mengenai bentuk dan susunan probe yang akan digunakan pada pengukuran kelembapan tanah dengan metode TDR. Hasil studi memperlihatkan bahwa dari semua struktur geometri yang diuji, probe yang memberikan kinerja terbaik berdasarkan nilai sensitivitas adalah probe 2 koplanar, dan yang memiliki error linearitas terbaik adalah 3-koplanar. Pengujian dengan metode VWC memperlihatkan kesalahan terkecil adalah 3,02% dengan sensitivitas mencapai 0,26 nS / % kelembapan tanah.

#### Referensi

- [1]. Topp, G.C., Davies, J.L., and Annan, A.P., *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*, Water Res. Research, v. 16, no. 3, p. 574–582. 1980.
- [2]. Knight, J.H., *Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content*, Water Res. Research. v. 28, no. 9, p. 2345–2352. 1992.
- [3]. K. Noborio. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31 (2001) 213–237
- [4]. Robert Cerny. *Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review*. *Measurement* 42 (2009) 329–336
- [5]. Dennis Trebbels, et al., *Miniaturized FPGA-Based High-Resolution Time-Domain Reflectometer*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol 62 No 7, 2013
- [6]. Muhammad Amin S., Bagas Prima A., Ndaru Anggit W., *Development of Economical Microcontroller-based Soil Moisture Sensor Using Time Domain Reflectometry*. Proceeding of ISESD 2016. ISBN 978-1-5090-3840-4
- [7]. Muhammad Amin S., Muhammad Adli R. *A Low Cost Microcontroller-based Time Domain Reflectometer for Soil Moisture Measurement*. Proceeding of ICEEI 2019. ISBN: 978-1-7281-2418-6
- [8]. Robinson, D.A et all, *A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soil Using Time Domain Reflectometry*. *Vadose Zone Journal* 2(4) : 444-475. 2003.
- [9]. Scott B. Jones, Jon M. Wraith, Dani Or. *Time domain reflectometry measurement principles and applications*. *Hydrol. Process.* 16, 141–153 (2002). DOI: 10.1002/hyp.513
- [10]. Campbell Scientific, Inc. *Soil TDR Probes For Campbell Scientific Time-Domain Reflectometry (TDR) Systems*. Available online at [campbellsci.com/tdr-probes](http://campbellsci.com/tdr-probes). Accessed 12/17/2019.
- [11]. Campbell Scientific Inc. *TDR Probes CS605, CS610, CS630, CS635, CS640, CS645 Instruction Manual*. 2017.
- [12]. Iskander, Magdy F, *Electromagnetic Fields and Waves*, Waveland Press Inc, 2000.
- [13]. Morris, Alan, *Measurement and Instrumentation Principles 3<sup>rd</sup> edition*, Butterworth-Heinemann, London : 2001.
- [14]. British Columbia Ministry of Agriculture. *Soil Water Storage Capacity and Available Soil Moisture*. Water Conservation Factsheet. Order No. 619.000-1. Agdex: 550. 2002
- [15]. Campbell Scientific Inc. *Reducing TDR probe rod length to improve water content measurements in soils with high electrical conductivity*. Application Note 2S-H. 2001.