BAB II. LANDASAN TEORI

Dewasa ini terdapat berbagai tipe dan teknik pengukuran untuk menentukan kelembaban tanah. Dari beberapa tipe alat yang tersedia dipasaran juga memperhitungkan karakteristik fisis dan kimia dari air sebagai bagian pengukuran kelembaban. Pada ilmu tanah biasanya penentuan kelembaban secara klasik ditentukan oleh metode langsung atau tidak langsung, sementara pada bagian ini ditentukan oleh proses elektris atau non elektris.

II.1. Proses Non Elektris (Metode Gravimetrik)

Teknik pengeringan oven ini adalah metode gravimetrik yang paling luas dipergunakan untuk mengukur kelembaban tanah dan merupakan acuan bagi kalibrasi semua teknik penentuan kelembaban tanah. Metode ini termasuk mengambil sampel tanah dari lapangan dan menentukan masa kandungan air terhadap masa tanah kering. Penentuan kandungan air di dalam tanah mineral menurut metode ini diatur menurut DIN 18121-T1. Sekalipun teknik ini menjamin keakuratan pengukuran namun tetap memiliki beberapa kelemahan yaitu memerlukan peralatan laboratorium, alat-alat sampling dan diperlukan waktu selama 24jam 105°C waktu pengeringan. Sebagai tambahan, teknik ini merupakan test merusak karena memerlukan pengambilan sampel tanah dan untuk mengukur diperlukan kerapatan bulk kering (dry bulk density) serta mengubah data ke kandungan kelembaban volume (volume moisture content).

Pengukuran ini juga tidak memungkinkan untuk menentukan kelembaban tanah secara tepat pada titik yang sama pada waktu yang berbeda. Secara nyata, pengukuran menjadi tidak akurat karena perbedaan kondisi lapangan dari satu titik pengukuran ke titik lainnya.

II.2. Proses Elektris (Sensor Kapasitive)

Tingkat kelembaban tanah dapat ditentukan melalui efek pada konstanta dielektriknya dengan mengukur kapasitansi antara dua elektroda yang berada di dalam tanah. Jika kelembaban tanah adalah secara pre dominan dalam bentuk air bebas (misal dalam tanah berpasir) maka konstanta dielektrik akan secara proporsional berhubungan dengan tingkat kelembaban.

Probe elektroda umumnya diberikan frekuensi eksitasi untuk memungkinkan pengukuran konstanta dielektrik. Pembacaan dari probe sensor biasanya tidak linear dengan jumlah air dan dipengaruhi oleh tipe tanah dan suhu tanah. Sekalipun demikian, kalibrasi diperlukan dan long-term stability dari kalibrasi masih menjadi tanda tanya. Kelebihan tipe sensor ini adalah secara

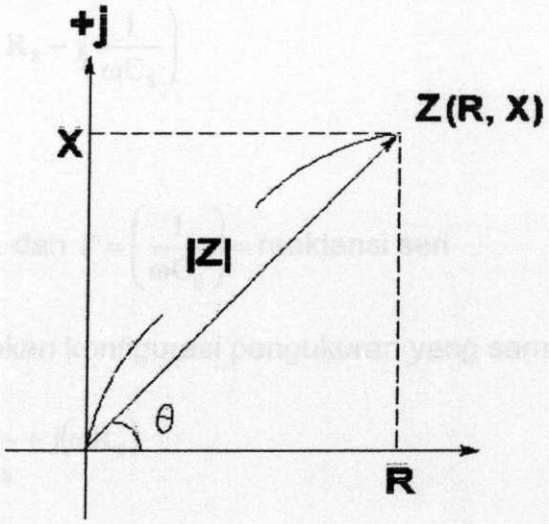
Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

teoritis dapat memberikan informasi jumlah air tanah absolute, kandungan air dapat ditentukan pada berbagai kedalaman, konfigurasi sensor dapat bervariasi dalam ukuran sehingga pengaruh pengukuran dapat di set. Presisi tinggi dapat dicapai jika kosentrasi ionic dari tanah tidak berubah dan dapat dibaca dengan metode remote.

II.3. PRINSIP PENGUKURAN DENGAN SPEKTROSKOPI IMPEDANSI

II.3.1. Dasar-Dasar Impedansi Spektroskopi

Impedansi adalah sebuah parameter penting yang digunakan untuk mengkarakterisasi rangkaian elektronika, komponen-komponen dan material-material yang digunakan untuk membuat komponen. Impedansi (Z) secara umum didefinisikan sebagai total dari perlawanan sebuah alat atau rangkaian yang mengalirkan arus bolak-balik (AC) pada frekuensi tertentu dan direpresentasikan sebagai sebuah bilangan kompleks yang ditunjukkan secara grafis dalam suatu ruang vektor. Suatu impedansi vektor terdiri dari bagian real (resistansi, R) dan suatu bagian imajiner (reaktansi, X) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. berikut.



Gambar 1. Impedansi (Z) terdiri dari bagian real (R) dan bagian imajiner (X)

Parameter listrik atau kuantitas elektris sebagai fungsi dari frekuensi (f) dapat ditransformasi menjadi fungsi immitance (I*) dan dianalisa dalam bentuk ruang kompleks. Fungsi ini menyatakan data immitansi sinyal kecil (small-signal) dalam ruang kompleks yang dinyatakan dalam

$$I^* = I' \pm jI'' \qquad (1)$$

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

Dimana $j = \sqrt{-1}$, I' dan I" adalah bagian real dan imajiner dari I* berturut-turut. Bagian real dan imajiner ini dapat dinyatakan sebagai kuantitas listrik dan tiap bagian ini berisi parameter listrik yang terukur. Tanda ± tergantung dari jenis fungsinya. Dalam konfigurasi parallel analisis spektroskopi suatu proses pengukuran akan memberikan

$$I^* = Y^* = \text{admitansi} = G_p + j(\omega C_P) \quad (2)$$

dari system dengan,

$I' = G_p =$ konduktansi parallel dan

$I'' = \omega C_P =$ suseptansi parallel (3)

Dengan mempergunakan konfigurasi pengukuran yang sama

$$I^* = C^* = \text{kapasitansi} = C_p - j\left(\frac{G_P}{\omega}\right) \quad (4)$$

Sementara dalam konfigurasi seri dari proses pengukuran,

$$I^* = Z^* = \text{impedansi} = R_S - j\left(\frac{1}{\omega C_S}\right) \quad (5)$$

Dari sistem dengan,

$$I^* = Z^* = \text{tahanan seri, dan } I'' = \left(\frac{1}{\omega C_S}\right) = \text{reaktansi seri} \quad (6)$$

Dengan mempergunakan konfigurasi pengukuran yang sama

$$I^* = M^* = \text{modulus} = \frac{1}{C_S} + j(\omega R_S) \quad (7)$$

Dari system dengan,

$$I' = \frac{1}{C_S} = \text{inverse kapasitansi seri dan } I'' = \omega R_S \quad (8)$$

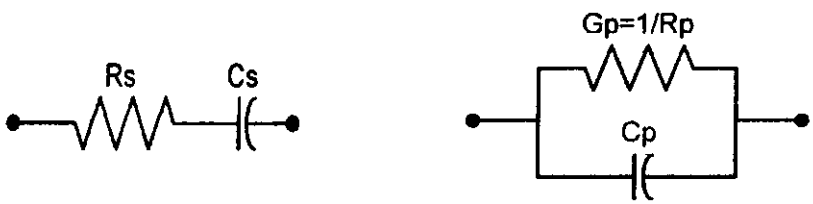
Pada persamaan di atas G_P dan C_p adalah ekuivalen konduktansi dan kapasitansi parallel terukur dan Rs dan Cs merupakan ekuivalen resistansi dan kapasitansi seri terukur berturut-turut, sebagai fungsi dari frekuensi sudut ω ($=2\pi f$). Ke empat parameter listrik terukur yaitu Gp, Cp, Rs dan Cs merupakan elemen dasar dari fungsi imitansi.

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

Pengukuran-pengukuran elemen listrik domain frekuensi dapat dilakukan dengan akuisisi data listrik sinyal kecil AC melalui 2-terminal sebagai fungsi frekuensi dalam satu dari tiga bentuk berikut ini:

1. Impedansi (Z*) atau ekuivalen seri (sebuah resistor, Rs, berhubungan seri dengan sebuah kapasitor, Cs);
2. Admitansi (Y*) atau ekuivalen parallel (sebuah resistor, Rp atau konduktor, Gp, dalam hubungan parallel dengan sebuah kapasitor Cp), dan
3. $|Z \cdot|$-fasor atau $|Y \cdot|$-fasor (magnitude dari imitansi dan berhubungan dengan loss-tangent, tan δ atau sudut fasa δ.

Pengukuran-pengukuran biasanya mempergunakan ketiga bentuk ini dan dapat dinyatakan dalam data imitansi. Ketiga bentuk ini digambarkan dalam gambar 2. yaitu rangkaian seri, parallel dan fasor $|Z \cdot|$ atau $|Y \cdot|$ dan loss-tangent (tan δ = Gp/ωCp = ωRs.Cs).



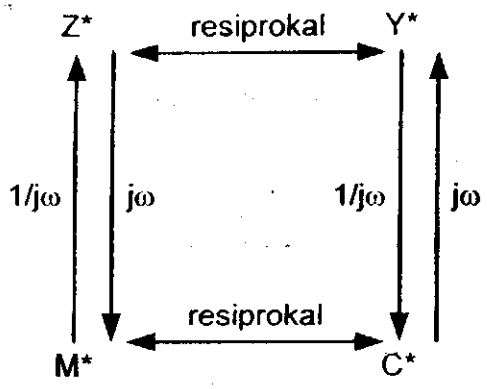
Gambar 2 (a). Rangkaian seri dan (b). rangkaian paralel

Bentuk-bentuk di atas dapat digambarkan juga dalam 4 persamaan ruang kompleks sebagai berikut:

- Impedansi: $Z^* = R_S = j\left(\frac{1}{\omega C_S}\right)$
- Admitansi: $Y^* = G_P + j\omega C_P$
- Kapasitansi: $C^* = C_P - j\left(\frac{G_P}{\omega}\right)$
- Modulus: $M^* = 1/C_S + j\omega R_S$

Persamaan fundamental dalam ruang kompleks empat yang menyatakan bentuk pengukuran data dan transformasinya yang berhubungan dengan karakteristik listrik terdiri dari Z*, Y*, C* dan M*. Tanda panah menyatakan faktor pengali untuk konversi antara ruang kompleks.

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/



Gambar 3. Pilihan pengukuran dari akuisisi data sinyal-kecil listrik dan konversinya dalam ruang kompleks

Admitansi (Y*) dan impedansi (Z*) diperoleh sebagai fungsi dari frekuensi sinyal-kecil ac, terdiri dari parameter seri dan parallel. Data fasor dapat juga dinyatakan dalam bentuk Y* atau Z*,

$$Z^* = \frac{1}{Y^*} = |Z^*|\sin\delta + j|Z^*|\cos\delta = |Z^*|e^{j\delta} = \frac{V}{I}\angle\delta \qquad (9)$$

Besaran $|Z^*|$ adalah magnitude absolute dari Z*, δ adalah sudut antara tegangan V dan arus I yang melalui sampel. Analisa data dalam domain frekuensi ini dapat dibentuk melalui analisa ruang kompleks, analisa ruang-Bode dan analisa spektroskopi.

Dari gambar 3. dapat dijelaskan hubungan konversi antar ruang kompleks sebagai berikut:

$$Z^* = \frac{1}{Y^*} = \frac{M^*}{j\omega} = \frac{1}{j\omega C^*} = R_S = j\left(\frac{1}{\omega C_S}\right) \qquad (10a)$$

$$Y^* = \frac{1}{Z^*} = j\omega C^* = \frac{j\omega}{M^*} = G_P + j\omega C_P \qquad (10b)$$

$$C^* = \frac{1}{M^*} = \frac{Y^*}{j\omega} = \frac{1}{j\omega Z^*} = C_P - j\left(\frac{G_P}{\omega C_P}\right) \qquad (10c)$$

dan bentuk berikut

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

$$M^* = \frac{1}{C^*} = j\omega Z^* = \frac{j\omega}{Y^*} = \frac{1}{C_s} + j\omega R_s \qquad (10d)$$

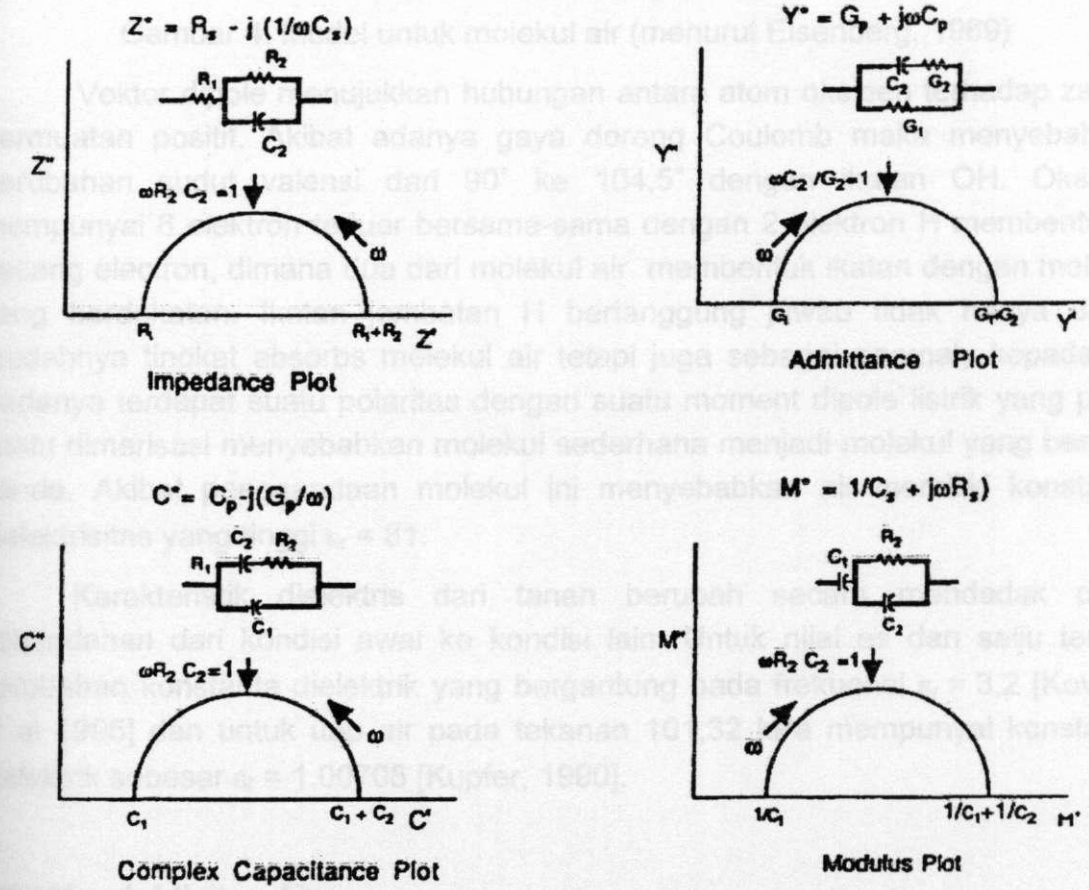
Sementara permitivitas relative tanpa dimensi dapat dinyatakan,

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\left(\varepsilon_r''\right) \qquad (11a)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\left(\varepsilon''\right) \qquad (11b)$$

Dengan $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \times 10^{-14}$ F/cm.

Bentuk kuantitas kompleks tanpa dimensi ini memberikan informasi seperti halnya ruang-C* atau ruang-ε*. Bentuk dari empat ruang kompleks di atas diperlihatkan pada gambar 6.4. berikut.



Gambar 3. Bentuk plot dari empat ruang kompleks dan rangkaian ekuivalen sederhana yang bersesuaian

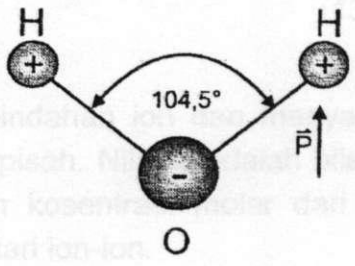
Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

II.3.2. SIFAT-SIFAT FISIS TANAH

Karakteristik Fisis Molekul Air

Karakteristik dielektrik khusus campuran air-zat padat dipengaruhi oleh karakter dipole dari molekul air. Molekul air terbentuk tidak simetris dan mempunyai dua sisi yang berlawanan. Gambar 4 akan menjelaskan secara skematis struktur molekul air dan karakteristik fisisnya.

Parameter	Nilai
HOH-sudut valensi	104,5°
Jejari molekul	1,45 10-10 m
OH-Energi disosiasi	498 kJ/mol (5,18eV)
Moment dipol	6,1 10-30 As.m



Gambar 4. Model untuk molekul air (menurut Eisenberg, 1969)

Vektor dipole menujukkan hubungan antara atom oksigen terhadap zat air bermuatan positif. Akibat adanya gaya dorong Coulomb maka menyebabkan perubahan sudut valensi dari 90° ke 104,5° dengan ikatan OH. Oksigen mempunyai 6 elektron terluar bersama-sama dengan 2 elektron H membentuk 4 pasang electron, dimana dua dari molekul air membentuk ikatan dengan molekul yang berdekatan. Ikatan jembatan H bertanggung jawab tidak hanya untuk mudahnya tingkat absorbs molekul air tetapi juga sebagai anomaly kepadatan. Padanya terdapat suatu polaritas dengan suatu moment dipole listrik yang pada suatu dimerisasi menyebabkan molekul sederhana menjadi molekul yang berlipat ganda. Akibat penggandaan molekul ini menyebabkan air memiliki konstanta dielektrisitas yang tinggi $\varepsilon_r = 81$.

Karakteristik dielektris dari tanah berubah secara mendadak pada perpindahan dari kondisi awal ke kondisi lain. Untuk nilai es dan salju terjadi perubahan konstanta dielektrik yang bergantung pada frekuensi $\varepsilon_r = 3,2$ [Kovacs et al 1995] dan untuk uap air pada tekanan 101,32 kPa mempunyai konstanta dielektrik sebesar $\varepsilon_r = 1,00705$ [Kupfer, 1990].

Sifat Konduktivitas Air

Konduktivitas spesifik dari fluida tergantung pada kosentrasi ion yang terlarutnya. Pembawa muatan ini terdapat di dalam air akibat terjadinya disosiasi positif Kation dan negative Anion. Pada proses disosiasi air terjadi pergeseran molekul air melalui momen dipole anisotropic antara ion-ion dan mengalami hidratisasi. Dalam persamaan 12 diberikan suatu hubungan linear antara

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

konduktivitas spesifik κ [dalam S/m] dan kosentrasi molar c dari elektrolit dimana Λ_m menyatakan konduktivitas molar.

$$\kappa = c \cdot \Lambda_m \tag{12}$$

Konduktivitas listrik dapat ditulis sebagai jumlah kontribusi masing-masing ion-ion,

$$\kappa = \sum_{i=0}^{n} c_i \cdot |z_i| \cdot \lambda_i \tag{13}$$

Persamaan ini tidak bergantung pada perpindahan ion dan menyatakan Kation dan Anion dari konduktivitas molar yang terpisah. Nilai z_i adalah bilangan muatan ion-ion yang bersesuaian, c_i menyatakan kosentrasi molar dari ion i larutan dan λ_i menyatakan konduktivitas ekuivalen dari ion-ion.

Konduktivitas listrik spesifik medium cairan adalah suatu besaran yang tidak bergantung material dan didefinisikan sebagai

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = G\frac{d}{A} \tag{14}$$

Bilangan d/A memperlihatkan geometri dari sel ukur, ρ menyatakan tahanan elektris spesifik dan G merupakan konduktansi ohmik. Nilai konduktivitas listrik spesifik untuk pengukuran kelembaban tanah dengan elektrolit yang bersesuaian diberikan berikut ini [Ariful, 2002]:

Sumber Air	κ (mS/m)	Sumber Air	κ (mS/m)
Air destilasi	~ 2	Air hujan	8-12
Air sungai	8-15	Air laut	4200

Tabel 1. Nilai konduktivitas spesifik air yang mempengaruhi pengukuran kelembaban tanah

Karakteristik dielektrik dari air dipengaruhi oleh garam yang terlarut di dalamnya, dimana kosentrasinya ditulis sebagai S salinitas dan merupakan berat bagian garam padat.

Persamaan Debye dan Polarisasi Dielektrik

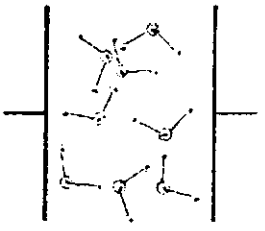
Air adalah suatu fluida polar dengan relaksasi dielektrik. Pada media ini konstanta dielektrik akan berubah akibat adanya frekuensi dari medan luar.

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

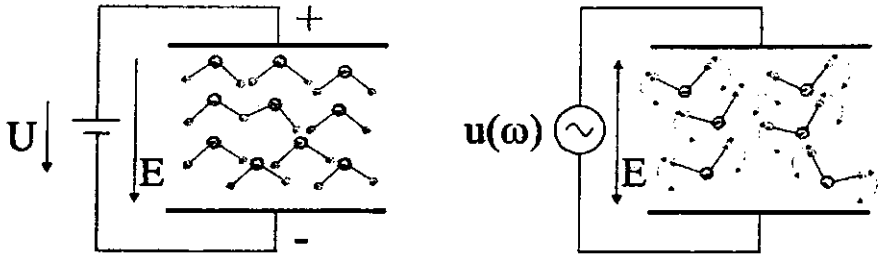
Pengaruh perubahan suatu medan listrik dengan molekul atau ion suatu bahan dinyatakan sebagai polarisasi dielektrik. Muatan di dalam molekul dipolarisasi untuk mengkompensasi adanya medan elektromagnetik.

Di bawah pengaruh dari medan listrik melalui tegangan searah dan bolak balik (gambar 6) dengan frekuensi sudut ω menyebabkan perubahan dipole air permanent menjadi posisi tertentu seperti diperlihatkan pada gambar 5.

Pada proses polarisasi suatu bahan dalam medan elektromagnetik terjadi perubahan yang sangat lambat dimana semua nilai sesaat semua besaran di susunan pengukuran menjadi bergantung waktu. Hal ini disebut dengan quasistasioner. Sehingga dipole terjadi pada frekuensi medan yang rendah dan konstanta dielektrik mencapai nilai $\varepsilon_s = 81$ (konstanta dielektrik statis).



Gambar 5. Orientasi molekul air tanpa pengaruh medan listrik luar



Gambar 6. Orientasi dipole akibat pengaruh suatu medan listrik luar

Pada frekuensi yang sangat tinggi dalam daerah infra merah (Terra Hertz) nilai konstanta dielektrik optis mencapai $\varepsilon_\infty = 4{,}9$ [Ulaby, 1986]. Antara kedua daerah pengukuran ini terdapat konstanta dielektrik yang bergantung pada frekuensi, dimana [Debye, 1929] menyatakan hubungan konstanta dielektrik kompleks ini secara matematis sebagai berikut,

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \underline{\varepsilon_r}(\omega) \cdot \varepsilon_0 \qquad (15)$$

dengan

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

$$\underline{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (16)$$

Pada persamaan di atas $\underline{\varepsilon}(\omega)$ adalah konstanta dielektrik absolute, $\underline{\varepsilon}_r(\omega)$ merupakan permittivitas relative kompleks, ω merupakan frekuensi sudut dan ε_0 adalah konstanta medan listrik (8,854 10^{-12} F/m). Waktu relaksasi τ merupakan suatu ukuran untuk mobilisasi molekul dan waktu yang diperlukan system untuk bergeser. Bagian real dan imajiner dari persamaan kompleks di atas dapat dipisah menjadi:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (17)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (18)$$

Medan kerja listrik akan mengubah orientasi dipole yang berarti energi disalurkan dan disimpan di dalam dielektrik. Efek dari penyimpanan energy menjadi bagian real ε' yang sefasa dengan medan listrik dan proporsional dengan kapasitansi.

Pengukuran Status Kelembaban Material Berpori

Tanah sebagai media berpori merupakan kombinasi tiga komponen utama yaitu air, padatan dan udara. Hubungan antara ketiga komponen-komponen penyusun tanah ini diperlihatkan dalam gambar 7 akan menentukan bagaimana air bergerak di dalam tanah, kemampuannya bertindak sebagai pelarut dan ketersediaannya untuk tanaman.

Gambar 7. Representasi skematis matriks tanah yang memperlihatkan hubungan antara udara (A), partikel tanah (B) dan air (C).

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

Satuan Kelembaban Benda Padat

Pada dasarnya harus dibedakan antara kelembaban udara relative (relative humidity) φ, jumlah air yang terlarut di dalam udara terhadap kelembaban udara jenuh, dan kelembaban material (moisture) θ. Istilah terakhir diberikan pada suatu material atau tanah yang mengandung air.

Kelembaban material θ_M dapat dinyatakan dalam persentase sesuai dengan persamaan (19) yang merupakan perbandingan antara masa bahan air m_w terhadap masa bahan tanpa air m_{tr} (basis kering). Sementara bagian kelembaban relative θ_M (basis basah) diperlihatkan pada persamaan (20) yang merupakan perbandingan masa air terhadap masa keseluruhan benda yang basah.

$$\theta_M = \frac{m_w}{m_{tr}} \cdot 100\% \qquad \text{[Berat-\%]} \qquad (19)$$

$$\theta_M = \frac{m_w}{m_w + m_{tr}} \cdot 100\% \qquad \text{[Berat-\%]} \qquad (20)$$

Bagian kelembaban relative dapat secara langsung ditentukan dengan metode gravimetric. Pada metode ini, sampel tanah akan ditimbang, dikeringkan dan ditimbang kembali. Pada metode ini, kelembaban didefinisikan sebagai jumlah air yang hilang dari material melalui proses pengeringan pada suhu 104°C selama 24 jam.

Pada pengukuran kelembaban tanah dipergunakan juga nilai ukur kelembaban menurut volume khususnya jumlah kelembaban volume θ_V (basis kering) yang dinyatakan dalam persamaan (21) berikut dengan V_W dan V_{tr} sebagai volume air dan material yang dikeringkan. Sebagai perbandingan dinyatakan juga perbandingan volume air V_W terhadap volume keseluruhan material yang lembab sebagai kelembaban volume relative θ_V dalam persamaan (22) berikut.

$$\theta_V = \frac{V_W}{V_{tr}} \cdot 100\% \qquad \text{[Vol-\%]} \qquad (21)$$

$$\theta_V = \frac{V_W}{V_W + V_{tr}} \cdot 100\% \qquad \text{[Vol-\%]} \qquad (22)$$

Pengubahan antara nilai kelembaban berbasis masa dan volume dilakukan dengan mempertimbangkan kerapatan masa antara benda basah dan kering.

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/

Densitas Bulk

Densitas bulk ρ_b dari tanah merupakan parameter yang diperhitungkan dalam mengkonversi w ke θ seperti diperlihatkan pada persamaan (23) berikut.

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_b}{\rho_w} \tag{23}$$

Dimana ρ_b merupakan densitas bulk dari tanah (gr/cm^3), ρ_w adalah densitas air, diasumsikan 1 dalam satuan (gr/cm^3) dan w adalah tingkat kebasahan tanah (gr/gr).

Untuk menentukan densitas bulk dari tanah terdapat berbagai metode, salah satu yang sering dipergunakan diperkenalkan oleh [Starr et al, 1995] yang mempergunakan sampel dengan diameter 30mm untuk mereduksi variasi dalam teknik pengukuran. Inti sampel kemudian ditimbang dan dikeringkan pada 104°C selama 24 jam dan kemudian ditimbang kembali. Kehilangan air w setelah dikeringkan akan menentukan nilai kepadatan bulk dari tanah yaitu

$$\rho_b = \frac{berat\ \tan ah\ \ker ing}{vol\ sampel} \tag{24}$$

Pada tanah alami, fraksi dari butiran merupakan suatu campuran dari berbagai ukuran.

Repository University Of Riau
PERPUSTAKAAN UNIVERSITAS RIAU
http://repository.unri.ac.id/