

*bab 2***Perilaku Dinamik Tanah****2.1| Pendahuluan**

Permasalahan yang mendasar dalam penyelidikan sub-permukaan yang terkait dengan perilaku dinamik tanah adalah kemampuan perencana untuk menganalisis kriteria pembebanan dinamik dan keterkaitannya terhadap respon tanah yang terjadi. Tahapan terpenting untuk menentukan respon tanah adalah pemilihan model konstitutif yang sesuai dan parameter-parameter ukur yang ada terkaitannya dengan simulasi perilaku dinamik tanah. Meskipun demikian, pemodelan respon tanah akibat pembebanan dinamik memerlukan proses perhitungan yang kompleks. Variabel analisis yang digunakan tidak hanya terkait kepada nilai kekakuan bahan tanah saja, melainkan juga sifat redamannya atau pengurangan energi dinamikanya.

Selain itu, besaran regangan juga merupakan parameter penentu nilai perilaku mekanik tanah. Nilai kekakuan bahan dipengaruhi oleh nilai regangan akibat beban dinamik yang terjadi. Pada tingkat regangan yang sangat kecil, nilai kekakuan tanah adalah tidak dipengaruhi (tidak terikat) oleh perubahan amplitudo regangan bahannya. Beberapa pendekatan model dan metode pengujian di laboratorium dan lapangan telah dikembangkan untuk meneliti perilaku dinamik tanah ini. Seluruh model dan pengujian yang telah dikembangkan tersebut mempunyai objektif untuk memenuhi keperluan karakteristik parameter dinamik tanah yang lebih terperinci dan tepat. Pada bab ini, teori dan pemodelan mekanik kontinum klasik pada perilaku elastik linier dan visko-elastik menjadi fokus pembahasan. Seterusnya, pendekatan dan berbagai pengujian untuk mendapatkan perilaku dinamik tanah juga diberikan di akhir bab ini. Tinjauan penting dalam bab ini adalah mempresentasikan parameter kekakuan dan rasio redaman tanah yang diperlukan untuk menganalisis hasil-hasil penyelidikan sub-permukaan. Kedua parameter adalah penting untuk menjelaskan perilaku respon dinamik tanah dan menjadi topik utama dalam kajian model dan pengujian dalam penyelidikan sub-permukaan.

2.2| Parameter Dinamik Tanah

Dalam analisis geoteknik, khususnya dalam bidang dinamik tanah, perilaku tanah yang dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, yaitu faktor eksternal dan internal; diantaranya tegangan efektif dan sejarah pembebanan, jenis tanah dan ukuran partikel tanah. Fenomena variasi perilaku tanah ini dapat dipelajari melalui pembuktian eksperimen pengaruh variasi tegangan dan regangan geser terhadap respon tanah, dalam hubungannya dengan degradasi kekakuan tanah dan kepadatan entropi (Lai & Rix, 1998). Nilai kekakuan tanah biasanya diukur melalui parameter modulus geser (G) yang diperoleh dari daya geser yang dibebankan kepada tanah dan kepadatan entropi dapat ditentukan melalui jumlah energi yang terabsorpsi dalam tanah selama pembebanan dinamik dalam periodisasi tertentu; yang seterusnya dinyatakan dalam parameter rasio redaman (D).

Studi mengenai respon modulus geser ini dimulai oleh beberapa peneliti geoteknik di tahun 40-an, dengan melakukan pengujian terhadap perambatan gelombang dalam kolom pasir tegak yang tersusunan dalam osilasi longitudinal dan torsi di laboratorium; dengan nilai regangan geser yang diamati lebih kecil dari 1×10^{-4} rad (Iida, 1940; Wilson & Dietrich, 1960; Hardin & Richart, 1963). Pengujian ini dinamakan sebagai metode kolom resonan (*resonant column, RC*). Oleh Hardin & Black (1968), metode *RC* digunakan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku dinamika tanah akibat beban getaran yang selanjutnya menghasilkan hubungan fungsi beberapa faktor yang mempengaruhi modulus geser, yaitu:

$$G = f(\bar{\sigma}_o, e, H, S, \tau_o, C, A, f, t, \mathcal{G}, T) \quad (2.1)$$

dengan:

- $\bar{\sigma}_o$ = tegangan normal oktahedron efektif,
- e = angka pori (*void ratio*),
- H = sejarah tegangan ambien dan getaran,
- S = serajat kejenuhan,
- τ_o = tegangan geser oktahedral,
- C = sifat, ukuran dan bentuk butiran, gradasi dan kandungan mineral,
- A = amplitudo regangan,
- f = frekuensi getaran,
- t = pengaruh sekunder diantaranya fungsi waktu dan magnitudo peningkatan beban,
- \mathcal{G} = struktur tanah,
- T = pengaruh suhu.

Dobry & Vucetics (1987) menambahkan dari hasil studinya bahwa faktor pengaruh sementasi dan rasio konsolidasi berlebih (*over consolidation ratio, OCR*) juga dapat mempengaruhi nilai G dan D . Jika difokuskan pada tingkat regangan yang rendah, sebagaimana direkomendasikan oleh Richart et

al. (1970), Hardin & Drnevich (1972), Vucetic (1994), telah dibuktikan bahwa salah satu faktor eksternal yang memberikan kontribusi terbesar dan yang berpengaruh menentukan besaran parameter G dan D oleh beban dinamik adalah magnitudo regangan yang terjadi akibat adanya tegangan yang diberikan pada tanah. Selain faktor amplitudo regangan, masih terdapat beberapa faktor yang berpengaruh lainnya diantaranya tekanan terkekang isotropik efektif, frekuensi eksitasi, waktu terkekang (*time of confinement*) pada tekanan yang konstan dan jumlah siklik beban (Richart et al., 1970; Stokoe et al., 1994b).

2.2.1 Faktor Regangan Geser dalam Respon Tanah Dinamik

Besaran atau magnitudo merupakan suatu ukuran yang penting dalam dinamika tanah pada tingkat regangan geser yang diinduksi dalam periodisasi tertentu selama eksitasi dinamik (Lai & Rix, 1998). EPRI (1991) dan Vucetic (1994) dalam studinya, menyusun karakteristik dan pengkelasan perilaku respon tanah kepada empat jenis kelas spektrum regangan geser. Tabel 2.1 menunjukkan fenomena respon tanah dari eksitasi siklik sebagai fungsi tingkat regangan gesernya.

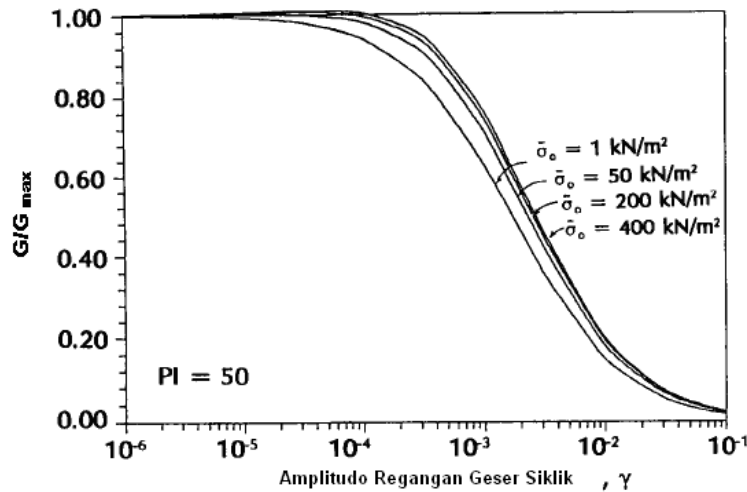
TABEL 2.1: PENGELOMPOKAN RESPON TANAH BERASASKAN REGANGAN GESER

MAGNITUDO REGANGAN GESER	TINGKAT REGANGAN			
	SANGAT KECIL	KECIL	PERTENGAHAN	BESAR
	$0 < \gamma < \gamma_i^1$	$\gamma_i^1 < \gamma \leq \gamma_i^v$	$\gamma_i^v < \gamma \leq \gamma_i^{pf}$	$\gamma_i^{pf} < \gamma \leq \gamma_i^f$
Respon Tanah	visko-elastik linier	visko-elastik tidak linier	Elasto-visko-plastik tidak linier	

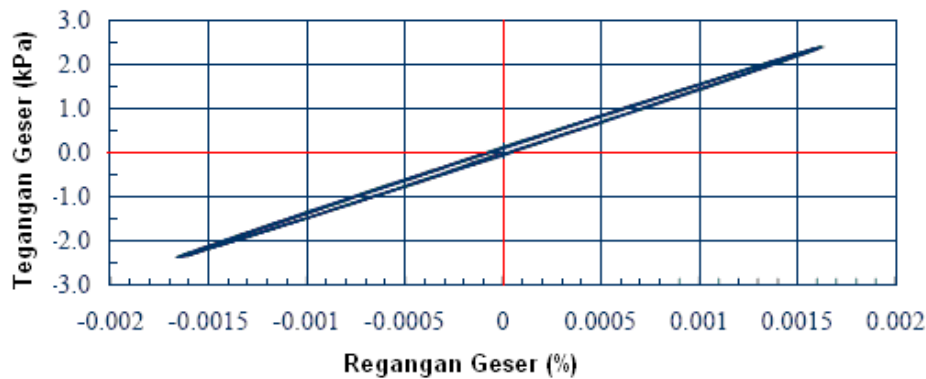
Pada kelas pertama, pada rentang regangan geser $0 < \gamma < \gamma_i^1$, disebut sebagai wilayah regangan sangat kecil dengan γ_i^1 merupakan regangan geser batas linier (*linier threshold shear strain*) (Vucetic, 1994). Dalam wilayah ini, respon tanah terhadap eksitasi siklik adalah berperilaku linier namun dapat menjadi tidak sepenuhnya elastik apabila terdapat suatu absorpsi energi yang terjadi pada tingkat regangan ini (Kramer, 1996; Lo Presti et al., 1997). Meskipun tidak terdapat pengurangan nilai kekakuan yang dapat dilihat dalam respon tanah berperilaku linier ini (misalnya ditunjukkan oleh Ishibashi (1992) pada regangan kurang dari 10^{-3} % dalam Gambar 2.1), kurva histeresis bidang tegangan-regangan dalam wilayah regangan ini digambarkan dalam bidang yang tidak kosong (*non-null*) yang dapat diartikan sebagai *fenomena absorpsi energi* yang sebagai contoh penjelasannya diberikan dalam Gambar 2.2.

Dalam Gambar 2.2, fenomena kurva histeresis pada regangan sangat kecil menggambarkan adanya bidang absorpsi energi pada tanah lempung dari hasil pengujian RC oleh Lai et al. (1999). Dapat ditambahkan, absorpsi energi dalam waktu tertentu tersebut disebabkan oleh adanya eksistensi

lag waktu antara tegangan dan regangan siklik; yang seterusnya hal ini menjadi dasar dalam melakukan kajian-kajian perilaku viskoelastik.



Gambar 2.1: Plot kurva penurunan modulus geser terhadap variasi tegangan terkekang efektif rata-rata pada tanah non-plastik (Ishibashi, 1992)



Gambar 2.2: Kurva histeresis hasil pengujian RC pada tanah lempung Noto dengan frekuensi getaran 1 Hz (Lai et al., 1999)

Wilayah kedua adalah regangan geser pada tingkat kecil yang dinyatakan dalam $\gamma_t^1 < \gamma \leq \gamma_t^v$ dengan γ_t^v merupakan regangan geser batas volumetrik (*volumetric threshold shear strain*). Vucetric (1994) memberikan batasan pada wilayah ini berdasarkan pengamatan pengujian respon tanah melalui eksitasi siklik. Untuk nilai regangan yang melebihi γ_t^v , bahan tanah disifatkan mengalami perubahan volume yang tidak dapat kembali semula (dalam kondisi terdrainasi (*drained*)). Kawasan spektrum regangan ini dapat dimasukkan dalam sifat tanah tidak linier dimana respon tanah tidak sepenuhnya elastik. Meskipun demikian, Lai & Rix (1998) dan Stokoe (1999) menjelaskan bahwa pada tingkat regangan tersebut, sifat bahan tidak berubah secara ekstrem terhadap bertambahnya regangan geser. Selain itu, perubahan sifat dan kekakuan bahan

adalah sangat kecil; yang merupakan respon tanah yang dapat diamati sebagai akibat peningkatan jumlah beban sikliknya (Ishihara, 1996).

Berbagai penelitian yang dilakukan oleh Bellotti et al. (1989), Lo Presti (1989), Vucetic & Dobry (1991) telah memberikan batas atas wilayah regangan kecil ini yaitu nilai γ_t^v sebesar:

- 5×10^{-3} % untuk kerikil,
- 10^{-2} % untuk pasir, dan
- 10^{-1} % untuk tanah lempung plastisitas tinggi dan terkonsolidasi normal.

Seiring dengan peningkatan nilai regangan gesernya, sifat tanah selanjutnya, akan berada dalam keadaan berperilaku plastik tidak linier hingga kepada kondisi maksimum yang ditandai dengan kegagalan tanah menerima tegangan geser (*failure*). Wilayah $\gamma_t^v < \gamma \leq \gamma_t^{pf}$ (Tabel 2.1) menjelaskan tingkat regangan pertengahan dengan γ_t^{pf} yang disebut sebagai regangan geser batas pra-gagal (Vucetic, 1994). Jika nilai regangan bahan lebih besar dari batas γ_t^{pf} maka perilaku tanah menjadi berubah bentuk secara ekstrem sebelum keadaan gagal. Pada tingkat regangan ini, absorpsi dan kehilangan energi sepenuhnya dipengaruhi oleh jumlah siklik. Vucetic (1994) dan Foti (2000) menambahkan bahwa perubahan sifat bahan ini bersifat permanen dalam skala struktur mikro karena respon tanah telah melebihi regangan batas volumetriknya. Peningkatan jumlah beban siklik menjadi sangat mempengaruhi penurunan sifat tanahnya.

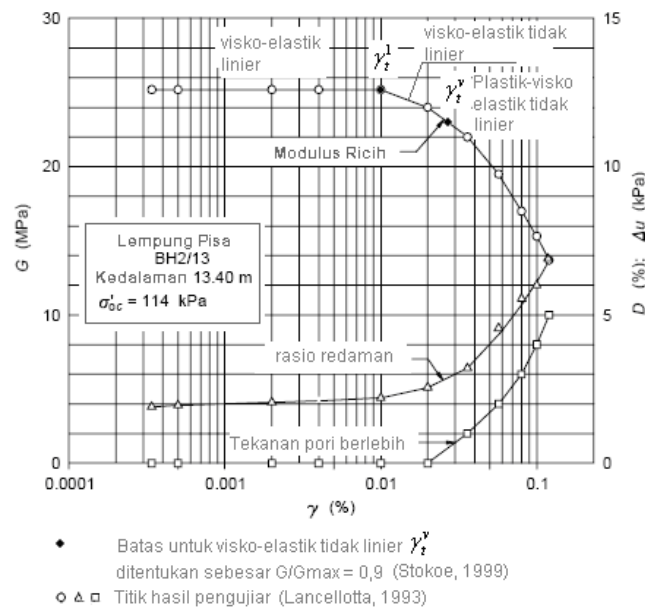
Terakhir, kawasan regangan geser besar dinyatakan dalam nilai batas $\gamma_t^{pf} < \gamma \leq \gamma_t^f$ (EPRI, 1991; Vucetic, 1994), dengan γ_t^f merupakan nilai batas regangan geser keadaan tanah yang gagal. Respon tanah terhadap eksitasi siklik dinamik pada wilayah ini adalah berperilaku sepenuhnya tidak linier dan tidak elastik. Dari seluruh batasan regangan geser (Tabel 2.1), regangan geser ambang, γ_t^1 dan γ_t^v , secara khusus mempunyai pengaruh yang signifikan dalam kajian dinamik tanah. Regangan geser batas linier menjadi penting karena nilai batasnya memisahkan kondisi respon tanah dalam keadaan linier dan tak linier akibat eksitasi siklik dinamik, sedangkan regangan geser batas volumetrik digunakan untuk membedakan antara batas konsistensi tanah yang tidak dapat kembali pada kondisi awal akibat beban dinamik yang harmonik.

Jika nilai regangan lebih kecil dari γ_t^v , seluruh kehilangan energi yang terjadi dalam tanah menjadi berperilaku visko-elastik yang secara natural hanya terjadi pada periodisasi yang pendek saja. Untuk tingkat regangan yang lebih tinggi, fenomena absorpsi energi yang terjadi dalam waktu tertentu merupakan tipe perilaku tanah visko-plastik (Lai & Rix, 1998). Nilai regangan geser pada γ_t^1 dan γ_t^v untuk masing-masing jenis tanah adalah berbeda-beda. Contohnya, dapat dilihat pada

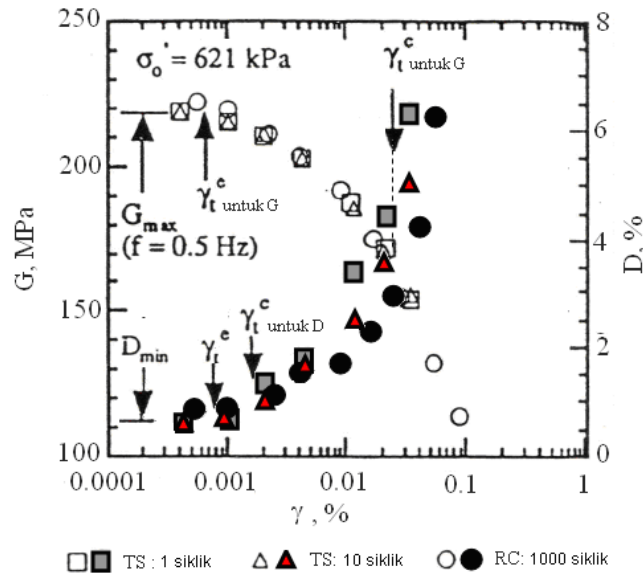
perilaku penurunan modulus geser dan peningkatan kepadatan entropi pada regangan geser elastik linier dan volumetrik di bawah beban siklik untuk tanah lempung Pisa dari kajian Lancellotta (1993) dan pasir dari Stokoe et al. (1994b) yang ditunjukkan masing-masing dalam Gambar 2.3 dan 2.4. Dari perbandingan kajian tersebut terlihat perbedaan nilai batas regangan geser untuk kedua jenis tanah tersebut.

2.2.2 Pengaruh Faktor Lain dalam G dan D

Untuk penurunan kekakuan tanah, faktor tekanan pengurung efektif rata-rata adalah faktor penentu variasi nilai regangan geser batasnya. Semakin tinggi tekanan pengurung efektif, nilai γ_i^1 dan γ_i^v pula menjadi semakin meningkat (Iwasaki et al., 1978; Kokusho, 1980; Ishibashi & Zang, 1993; Ishihara, 1996). Perilaku ini biasanya terjadi pada lapisan pasir, tanah berpasir dan lempung berpasir seperti hasil penelitian Stokoe et al. (1994b) melalui pengujian laboratorium gabungan TS dan RC . Hasil kajian oleh Ishibashi (1992) juga menunjukkan bahwa tekanan pengurung lebih berpengaruh secara signifikan pada tanah dengan plastisitas rendah.



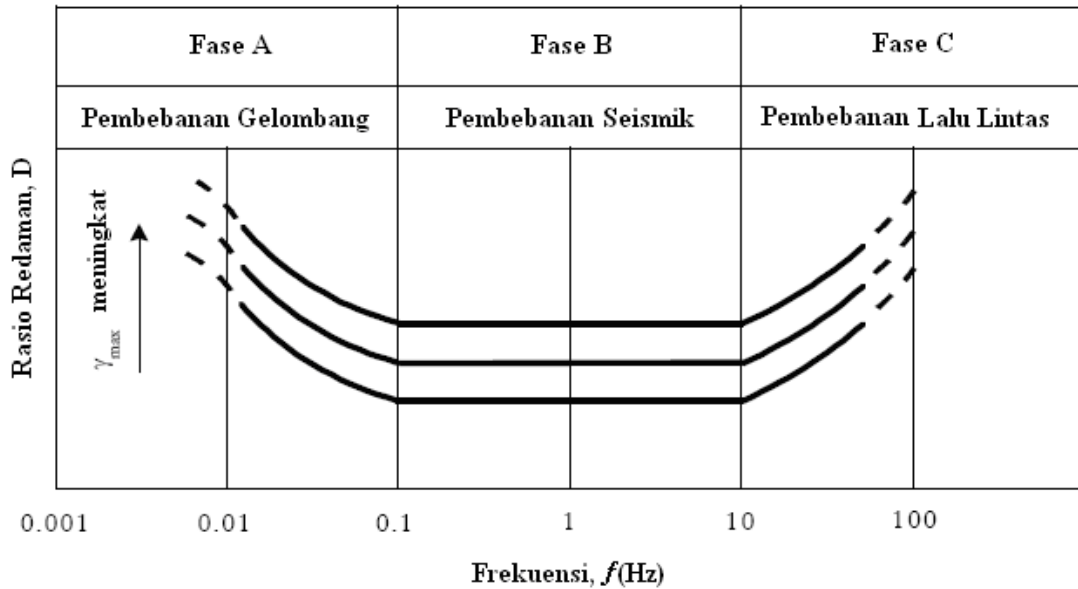
Gambar 2.3: Pengaruh regangan geser terhadap parameter tanah modulus geser, redaman dan tekanan pori tanah lempung (Lancellotta, 1993; Stokoe, et al., 1999)



Gambar 2.4: Variasi modulus geser dan rasio redaman tanah pada spesimen pasir tak terganggu terhadap amplitudo regangan dan jumlah siklus beban pada ujian laboratorium geser putaran (TS) dan kolom resonan (RC) untuk keadaan tegangan efektif alami (Stokoe et al., 1994b)

Sementara itu, faktor lain berupa frekuensi eksitasi (0.05 hingga 100 Hz), waktu terkekang (*time of confinement*) pada tekanan tetap dan jumlah siklus beban; tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap modulus geser maksimum (G_{maks}) pada pada tingkat regangan yang kecil atau kurang dari 0.002 % (Stokoe et al., 1994b). Untuk rasio redaman minimum (D_{min}), frekuensi eksitasi mempunyai pengaruh yang sangat signifikan. Dengan demikian, faktor waktu terkekang dan jumlah siklus dapat diabaikan dalam analisis perilaku G dan D tanah.

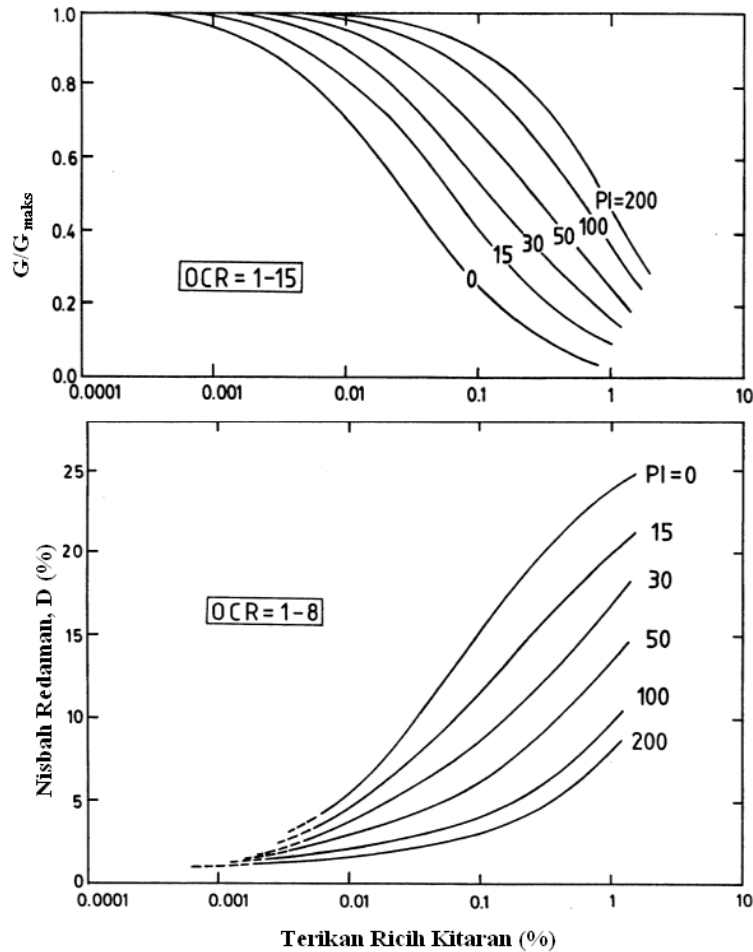
Berkaitan dengan frekuensi eksitasi, hasil penelitian yang dilakukan oleh Stokoe et al. (1994b) menjelaskan bahwa tanah lempung dan tanah pasir berlanau bersifat sensitif terhadap perubahan nilai kelembapan hingga mencapai 100 % pada rentang frekuensi dinamik antara 0.5 hingga 100 Hz. Untuk bahan pasir, pengaruh frekuensi eksitasi terhadap rasio redaman adalah kecil. Dengan demikian, frekuensi eksitasi merupakan suatu parameter kunci yang menentukan kepadatan entropi dalam periode tanah selama eksitasi siklik. Namun, dalam rentang frekuensi seismik, 0.001 hingga 100 Hz dimana hampir seluruh energi seismik dihasilkan oleh peristiwa gempa, sifat kepadatan entropi menjadi independen (tidak dipengaruhi) terhadap frekuensi (Aki & Richarts, 1980; Ben-Menahem & Singh, 1981; Shibuya et al., 1995). Gambar 2.5 menunjukkan suatu diagram perubahan rasio redaman dan sifat absorpsi energi tanah terhadap fungsi frekuensinya.



Gambar 2.5: Pengaruh frekuensi terhadap absorpsi energi dalam waktu tanah (Shibuya et al., 1995)

Selain faktor di atas, terdapat faktor internal, yaitu : *tingkat plastisitas tanah*, yang ikut mempengaruhi degradasi kekakuan dan kepadatan entropi tanah. Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh plastisitas tanah yang cukup signifikan terhadap perubahan kekakuan atau modulus geser dan rasio redamannya yang merupakan hasil eksperimen dari Vucetic & Dobry (1991). Sebagai tambahan, hasil kajian Dobry & Vucetic (1987) dan Vucetic & Dobry (1991) melaporkan bahwa gabungan indeks plastisitas dan regangan geser yang dipengaruhi oleh waktu perubahan regangan dan jumlah siklik (Lo Presti et al., 1996; Malagnini, 1996) merupakan faktor tanah yang berpengaruh dalam respon kekakuan dinamik tanah. Pada regangan yang tinggi tanah plastik, hasil pengujian mereka menunjukkan bahwa kurva pengurangan kekakuan dipengaruhi oleh regangannya dan kekakuan tanah akan meningkat searah dengan kenaikan regangannya.

Pengaruh lain seperti faktor rayapan dan relaksasi, kondisi anisotropik, umur geologi, proses sementasi, derajat kejenuhan dan kondisi drainasi merupakan faktor-faktor sulit untuk diukur dan dievaluasi pengaruhnya dalam perubahan kekakuan tanah dan absorpsi energi dalam tanah (Lai & Rix, 1998).



Gambar 2.6: Kurva kekakuan (G/G_{maks}) dan rasio redaman (D) terhadap regangan geser siklik pada waktu tanah untuk tanah dengan keplastikan yang berbeda (Vucetic & Dobry, 1991)

2.2.3 Pemodelan Konstitutif Respon Tanah pada Regangan Sangat Kecil

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa untuk mempelajari perilaku tanah dinamik dapat dilakukan dengan pemodelan perubahan respon tanah. Untuk keadaan regangan yang sangat kecil, terdapat dua model konstitutif yang dapat digunakan yaitu model elastik linier dan visko-elastik linier.

i. Model Elastik Linier

Media elastik tidak menunjukkan adanya absorpsi energi dan disifatkan sebagai *bi-univocal* yang menunjukkan hubungan antara parameter tegangan dan regangan. Hubungan kedua parameter tersebut dapat dinyatakan dalam suatu indeks dengan mempertimbangkan sifat *tensor inherent* kepada besaran tegangan (σ) dan regangan (ε) sebagai berikut:

$$\sigma_{ij} = a_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) merupakan pengembangan dari hukum *Hooke* dengan a merupakan *matrik konstanta konstitutif* dalam bentuk *tensor order keempat*. Memperhitungkan hubungan parameter dalam kondisi elastik dengan tensor tegangan dan regangan yang mempunyai dua bidang ortogonal yang bersifat simetrik maka jumlah konstanta independen berkurang dari 21 menjadi 13. Untuk keadaan medium yang isotropik, matrik konstitutif dapat dinyatakan dengan tiga konstanta independen dan persamaan (2.1) di atas dituliskan kembali dalam bentuk:

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (2.2)$$

dengan δ_{ij} merupakan fungsi delta *Kronecker* dan konstanta elastik λ dan μ disebut sebagai parameter *Lamé*. Diskusi lebih terperinci mengenai hukum *Hooke* dan turunan persamaan elastiknya dapat dipelajari dalam Borelli (1965), Fraeijs de Veubeke (1969), Timonshenko & Goodier (1970), Flugge (1972), Hariandja (1997) dan Suhendro (2000).

Inversi terhadap persamaan (2.2) dapat menurunkan hubungan tegangan dan regangan terhadap konstanta elastik seperti modulus elastik atau Young (E), rasio Poisson (ν), modulus bulk (K) dan geser (G). Tabel 2.2 menunjukkan hubungan antara parameter-parameter elastik tersebut.

Keadaan anisotropik juga merupakan hal penting dalam mekanik tanah dan kajian dinamik tanah, namun, keadaan anisotropik tidak didiskusikan dalam buku ini. Perbedaan dasar fungsi yang menjelaskan kondisi elastik anisotropik tegangan dan regangan terhadap kondisi elastik adalah dalam hal jumlah parameter dan konstanta matrik konstitutif yang lebih banyak yang diperlukan untuk menjelaskan medium anisotropik tersebut. Pada kenyataannya, kondisi tanah yang natural/alami adalah bersifat anisotropik dan masalah anisotropik untuk pengembangan pengujian tanah dalam penyelidikan sub-permukaan masih terbuka lebar untuk dikaji dan dikembangkan. Dasar-dasar teori mengenai keadaan elastik anisotropik dapat merujuk kepada Timonshenko & Goodier (1970), Flugge (1972), Hariandja (1997) dan Suhendro (2000).

TABEL 2.2: HUBUNGAN ANTARA KONSTANTA ELASTIK

λ, μ	G, ν	E, ν	K, G
----------------	----------	----------	--------

λ	λ	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$K - \frac{2}{3}G$
$\mu \equiv G$	μ	G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	G
K	$\frac{(3\lambda + 2\mu)}{3}$	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	K
E	$\frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$	$2(1+\nu)G$	E	$\frac{9KG}{3K + G}$
ν	$\frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$	ν	ν	$\frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$

ii. Model Visko-Elastik Linier

Model visko-elastik linier merupakan perilaku elastik yang digabungkan dengan komponen visko guna menghasilkan absorpsi energi pada suatu respon sistem bahan. Model ini dapat menunjukkan pendekatan yang lebih sesuai kepada perilaku tanah elastik dengan absorpsi energi pada regangan yang sangat kecil. Model visko-elastik juga sering digunakan dalam mempelajari perilaku bahan akibat pemanasan yang tinggi, misalnya pada baja, dan pembebanan dalam waktu yang panjang, misalnya pada konsolidasi tanah. Oleh karena itu, bahan berperilaku visko-elastik ini dipengaruhi oleh kombinasi waktu, tegangan dan regangannya.

Turunan persamaan teori visko-elastik terhadap tensor tegangan dalam fungsi integral linier diberikan (Christensen, 1971):

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\varepsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.3)$$

dengan ε_{kl} merupakan tensor regangan infinitesimal dan G_{ijkl} adalah fungsi nilai tensor (*tensor-valued*) order keempat atau yang juga dikenali sebagai fungsi tensor relaksasi (*relaxation function*) suatu bahan. Sebagaimana turunan hubungan konstanta elastik, suatu media bahan dapat diasumsikan sebagai tensor tegangan-regangan yang bersifat simetrik pada bahan anisotropik. Oleh itu, inversi tensor regangan dapat dituliskan dalam:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t J_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\sigma_{kl}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.4)$$

dengan J_{ijkl} adalah fungsi nilai tensor order keempat yang disebut sebagai fungsi tensor rayapan (*creep tensor function*). Untuk bahan visko-elastik linier dan isotropik, fungsi tensor relaksasi dan rayapan hanya mempunyai dua komponen konstanta dalam matrik konstitutif dan keduanya dapat digunakan untuk menjelaskan respon mekanik suatu bahan.

Hubungan konstitutifnya dapat dinyatakan dalam (Lai & Rix, 1998):

$$s_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t 2G_S(t-\tau) \frac{de_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.5)$$

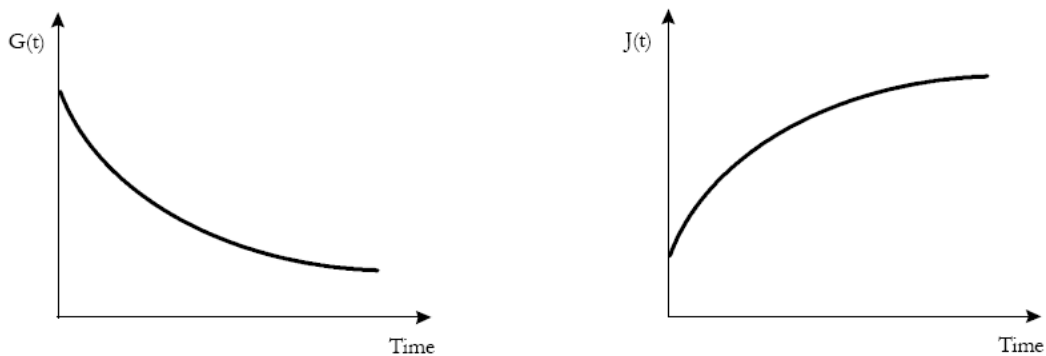
$$\sigma_{kk}(t) = \int_{-\infty}^t 3G_B(t-\tau) \frac{d\varepsilon_{kk}(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2.6)$$

dengan,

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk},$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{kk}$$

Komponen s_{ij} dan e_{ij} merupakan tensor tegangan dan regangan perpindahan partikel. Fungsi skalar $G_S(t)$ dan $G_B(t)$ adalah fungsi relaksasi geser dan bulk. Lai & Rix (1998) menambahkan bahwa fungsi relaksasi $G_S(t)$ dan $G_B(t)$ dapat dikaitkan dengan fungsi rayapan $J_S(t)$ dan $J_B(t)$ (dalam persamaan 2.4). Kedua fungsi tersebut merupakan fungsi respon bahan dan beranalog kepada konstanta elastik dalam keadaan linier. Fungsi relaksasi $G_S(t)$ mewakili respon tegangan geser dalam fungsi waktu pada saat fungsi langkah *Heaviside* sebagai regangan geser diberikan (dibebankan) kepada suatu bahan padat (Foti, 2000). Selanjutnya, fungsi rayapan $J_S(t)$ merupakan respon regangan terhadap fungsi langkah *Heaviside* sebagai subjek tegangan gesernya. Kurva tipikal fungsi relaksasi dan rayapan dalam medium padat dari penjelasan di atas dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.7.



Gambar 2.7: Bentuk tipikal fungsi relaksasi $G(t)$ dan rayapan $J(t)$ untuk medium padat (Lai, 1998)

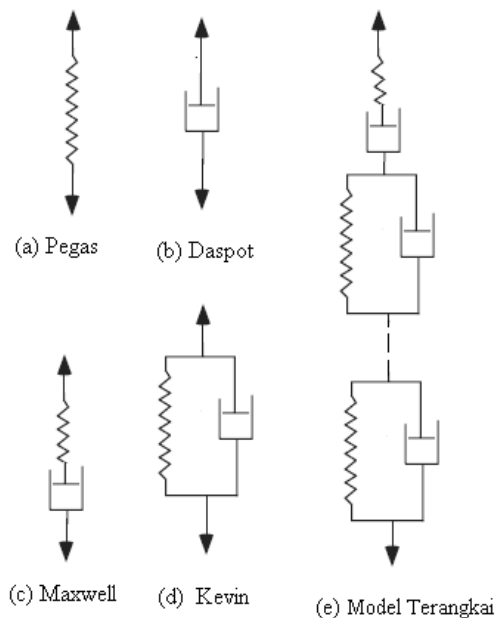
Hubungan konstitutif model visko-elastik dapat dinyatakan dalam sistem mekanik berupa pasangan pegas linier tak bermassa dengan elemen konstanta pegas k dan visko-daspot dengan konstanta viskositas η . Gabungan sistem dasar elemen sederhana ini dikenali sebagai model *Maxwell* yang merupakan pasangan elemen seri dan model *Kelvin-Voigt* dengan pasangan elemen paralel (Gambar 2.8). Pipkin (1986) menyatakan fungsi relaksasi dan rayapan dalam sistem *Kelvin-Voigt* sebagai berikut:

$$G_{\chi}(t) = k_{\chi}H(t) + c_{\chi}\delta(t) \quad (2.7)$$

$$J_{\chi}(t) = \frac{H(t)}{k_{\chi}} \left[1 - e^{-\frac{k_{\chi}t}{c_{\chi}}} \right] \quad (2.8)$$

dengan,

subskrip = S, B , yang menyatakan mode deformasi geser dan bulk,
 k_{χ} = konstanta kekakuan pegas,
 c_{χ} = pengkali daspot,
 $H(t)$ = fungsi langkah *Heaviside*,
 $\delta(t)$ = fungsi *Dirac*.



Gambar 2.8: Beberapa elemen dan model mekanik untuk bahan visko-elastik

Model mekanik yang lebih baik untuk menyatakan fenomena relaksasi tegangan dan respon elastik dalam tegangan terpantau adalah susunan seri model *Kevin-Voigt* yang dikenali sebagai sistem padat linier standar (*standard linear solid*). Meskipun demikian, Melvern (1969) berpendapat

bahwa sistem padat linier standar masih belum cukup untuk menjelaskan keadaan perilaku bahan secara tepat. Sistem ini masih perlu disusun dalam satu rangkaian yang lebih kompleks untuk menjelaskan seri waktu relaksasi pada kumpulan N elemen *Maxwell* (Gambar 2.8.e). Fungsi relaksasi $G_\chi(t)$ selanjutnya dinyatakan sebagai:

$$G_\chi(t) = G_{e_\chi} + \sum_i^N G_{\chi_i} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_\chi}} \quad (2.9)$$

dengan $G_{e_\chi} = G_\chi(t \rightarrow \infty) = \frac{k_{1\chi} \cdot k_{2\chi}}{k_{1\chi} + k_{2\chi}}$ adalah nilai batas $G_\chi(t)$ yang disebut sebagai respon

keseimbangan sedangkan $k_{1\chi}$ dan $k_{2\chi}$ merupakan konstanta pegas dalam padat linier standar.

Ferry (1980) menambahkan bahwa persamaan (2.9) ini dapat digunakan sebagai dasar prosedur penyesuaian model (sebelah kanan persamaan 2.9) terhadap hasil pengujian $G_\chi(t)$. Persamaan 2.9 juga dapat diturunkan dalam model spektrum diskrit dari waktu relaksasinya melalui persamaan integral *Fredholm* jenis pertama sebagai berikut:

$$G_\chi(t) = G_{e_\chi} + \int_{-\infty}^{+\infty} H_\chi(\tau) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} d\tau \quad (2.10)$$

dengan $H_\chi(t)$ adalah spektrum relaksasi yang menyediakan informasi penting mengenai mekanisme absorpsi yang dapat disesuaikan dalam spektrum waktu relaksasi.

Penggunaan model visko-elastik linier menjadi sangat kompleks karena perlu menyelesaikan hubungan integral dalam persamaannya. Meskipun demikian, penyelesaian untuk persamaan visko-elastik dapat dilakukan dengan transformasi *Fourier*. Jika tegangan dan regangan mempunyai fungsi harmonik terhadap waktu maka tensor regangan infinitesimal dalam persamaan (2.3) dapat dinyatakan sebagai (Lai, 1998):

$$\varepsilon_{kl}(t) = \varepsilon_{0kl} \cdot e^{i\omega t} \quad (2.11)$$

dengan ε_{0kl} merupakan amplitudo komponen regangan, $i = \sqrt{-1}$ dan ω adalah frekuensi sudut.

Integral persamaan (2.1) seterusnya berubah mengikut persamaan aljabar sebagai berikut:

$$\sigma_{ij}(t) = G_{ijkl}^*(\omega) \cdot \varepsilon_{0kl} e^{i\omega t} \quad (2.12)$$

dengan $G_{ijkl}^*(\omega)$ adalah modulus tensor kompleks dan komponennya terkait dengan turunan sin dan kosinus *Fourier* dari fungsi tensor relaksasi dalam bentuk riil dan imajiner; sebagaimana dituliskan dalam:

$$\Re(G_{ijkl}(\omega)) = G_{(e)ijkl} + \omega \int_0^{\infty} G_{ijkl}(\tau) \sin \omega \tau \cdot d\tau \quad (2.13)$$

$$\Im(G_{ijkl}(\omega)) = \omega \int_0^{\infty} G_{ijkl}(\tau) \cos \omega \tau \cdot d\tau \quad (2.14)$$

dan,

$$G_{ijkl}^*(\omega) = \left| \Re(G_{ijkl}^*(\omega)) + \Im(G_{ijkl}^*(\omega)) \right| \quad (2.15)$$

Christensen (1971) dan Tschoegl (1986) menambahkan bahwa hubungan bagian riil dan imajiner modulus tensor kompleks pada persamaan di atas adalah independen sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan matematikanya sebagai:

$$\Re(G_{ijkl}(\omega)) = G_{(e)ijkl} + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Im(G_{ijkl}(\tau)) \cdot \omega^2}{\tau(\omega^2 - \tau^2)} \cdot d\tau \quad (2.16)$$

Persamaan di atas disebut sebagai bentuk hubungan *Kramers-Krönig* (Tschoegl, 1989) yang menjelaskan adanya sifat dispersi secara inherent dalam bahan visko-elastik. Dispersi bahan merupakan fenomena kecepatan gelombang mekanik tergantung kepada frekuensinya dalam rambatannya di medium yang berdaya absorpsi. Melalui persamaan kompleks *Helmholtz's*, modulus kompleks dapat dinyatakan dalam kecepatan fase dan konstanta atenuasi (pengurangan energi) gelombang tubuh. Turunan persamaan modulus kompleks dalam kecepatan gelombang mekanik primer (P) dan sekunder (S) yang mewakili nilai kekakuan dan atenuasinya dijelaskan secara terperinci dalam Achenbach (1984).

Lai & Rix (1998) menambahkan bahwa hubungan komponen dalam modulus kompleks dapat ditunjukkan dalam hubungan grafis sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.9. Rasio

$\frac{\Im(G_\gamma)}{\Re(G_\gamma)} = \arg(G_\gamma^*)$ yang merupakan $\tan[\varphi_\gamma(\omega)]$ yang disebutkan sebagai tangen atau sudut hilang

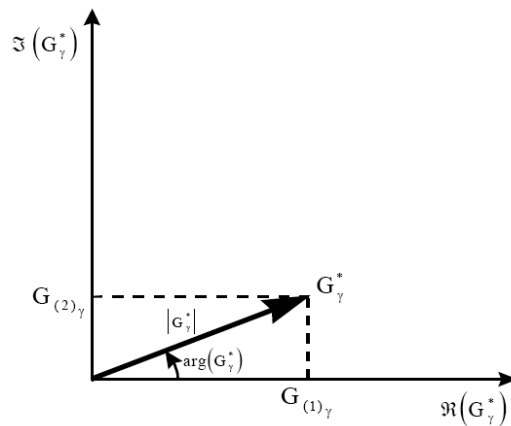
dan $\Re(G_\gamma)$ dan $\Im(G_\gamma)$ masing-masing dikenali sebagai modulus tersimpan dan modulus hilang.

$\Im(G_\gamma)$ juga terkait langsung kepada energi yang terabsorpsi dalam bahan visko-elastik yang disebabkan oleh pembebanan siklik (Lai, 1998).

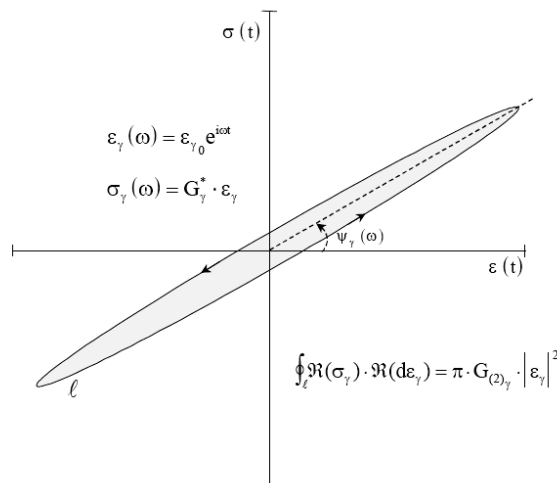
Fenomena ini dapat dijelaskan melalui bentuk kurva elips tegangan dan regangan dalam bahan visko-elastik selama eksitasi harmonik. Persamaan matematikanya dijelaskan dalam bentuk (Lai & Rix, 1998):

$$\left(\frac{\varepsilon_\gamma}{\varepsilon_{\gamma 0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\gamma - \Re(G_\gamma)\varepsilon_\gamma}{\Im(G_\gamma)\varepsilon_{\gamma 0}}\right)^2 = 1 \tag{2.17}$$

dengan $\varepsilon_{\gamma 0}$ merupakan amplitudo regangan harmonik ε_γ . Persamaan (2.17) tersebut digambarkan dalam luasan elips yang diputar oleh sudut $\psi_\gamma(\omega)$ dalam hubungan tegangan dan regangan dalam Gambar 2.10.



Gambar 2.9: Grafik hubungan antara komponen modulus kompleks (Lai, 1998)



Gambar 2.10: Kurva histeretis tegangan dan regangan yang dihasilkan oleh model visko-elastik selama eksitasi harmonik (Lai & Rix, 1998)

Kurva elips tegangan dan regangan yang digambarkan melalui teori visko-elastik mempunyai bentuk yang serupa kepada kurva elips hasil pengujian untuk tegangan-regangan yang sangat kecil. Keterkaitan teori visko-elastik untuk pengukuran rasio redaman diberikan dalam bahasan selanjutnya dalam bab ini.

2.2.4 Model Empirik Modulus Geser

Sebelum metode seismik untuk penyelidikan tanah dan kajian sifat dinamika tanah berkembang maju, banyak studi telah merumuskan persamaan korelasi empirik untuk mengestimasi nilai kecepatan gelombang dan modulus geser maksimum. Dimulai dari Seed & Idriss (1970) yang mengusulkan persamaan modulus geser untuk pasir yang dinyatakan sebagai berikut:

$$G_{maks} = 1000(K_2)_{maks} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2.18)$$

dengan, σ'_m adalah tegangan efektif rata-rata (dalam lb/ft²), $(K_2)_{maks}$ adalah konstanta yang ditentukan berdasarkan kepadatan relatif: 30 (untuk pasir lepas) hingga 75 (untuk pasir padat). Untuk bahan kerikil, Seed et al. (1984) menambahkan bahwa nilai $(K_2)_{maks}$ adalah 1,35 hingga 2,5 kali lebih tinggi dari pasir.

Seterusnya diikuti oleh Hardin & Black (1968) dan Hardin & Drnevich (1972) yang mengembangkan model empirik untuk berbagai jenis tanah yang dituliskan dalam:

$$G_{maks} = \frac{A(OCR)^k P_A^{1-n} (\sigma'_m)^n}{F(e)} \quad (2.19)$$

dengan,

- A = faktor empirik yang tak berdimensi,
- P_A = tegangan referensi sebagai tekanan atmosfer dalam 100 kPa,
- n = eksponen tegangan yang biasanya diambil sebesar 0.5,
- $F(e)$ = fungsi angka pori = $0.3 + 0.7 e^2$,
- k = eksponen yang terikat kepada indeks plastisitas,
- OCR = rasio konsolidasi berlebih,

Variasi nilai konstanta A , k dan rentang e untuk beberapa jenis tanah berbagai pengujian laboratorium dan lapangan efektif dapat diperoleh dalam Prakash (1981). Hardin (1978) melalui kajian formulasi matematik dalam perilaku elastik dan keplastikan tanah merekomendasikan

persamaan (2.19) untuk digunakan pada keadaan tegangan anisotropik dengan mengambil tegangan utama efektif rata-rata sebagai $\sigma'_m = (\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)/3$.

Untuk bahan pasir bersih berbutir bulat (dengan $e < 0.80$) dan berbutir sudut dengan G yang dipengaruhi oleh σ'_m dan e , maka pendekatan G_{maks} diberikan sebagai berikut:

$$G_{maks} = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2.20)$$

$$G_{maks} = 326 \frac{(2.97 - e)^2}{1 - e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2.21)$$

Persamaan (2.20) dan (2.21) di atas diberikan dalam unit kg/cm^2 untuk regangan geser kurang dari 10^{-4} . Namun, nilai G_{maks} dari persamaan (2.21) nilainya lebih rendah dari model empirik yang diusulkan oleh Whitman & Lawrence (1963) yang menguji tanah berdasarkan beban impuls. Iwasaki & Tatsuoka (1977) juga mengusulkan satu model empirik untuk pasir bersih dengan rentang e pada 0.61 hingga 0.86 dan σ'_m pada 0.2 hingga 5 (kg/cm^2) dengan amplitudo regangan geser sebesar 10^{-6} . Model tersebut dituliskan dalam hubungan:

$$G_{maks} = 900 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.38} \quad (2.22)$$

Stokoe et al. (1985) telah mengembangkan perangkat pengujian laboratorium tiga dimensi berskala besar yang mengukur tegangan nyata dalam tiga koordinat aksis pada bahan pasir padat berjenis SP menurut *Unified Soil Classification System* (USCS). Studi ini menghasilkan model empirik yang dikembangkan dari Hardin & Drnevich (1972) dan Hardin (1978) untuk mendapatkan G_{maks} yang ditulis dalam persamaan berikut:

$$G_{maks} = \frac{S}{(0.3 + 0.7e^2) \bar{\sigma}_a^{-ma} \bar{\sigma}_b^{-mb} \bar{\sigma}_c^{-mc} P_a^{1-ma-mb-mc}} \quad (2.23)$$

dengan,

S = konstanta kekakuan bahan,

e = rasio pori,

ma = slope hubungan $\log G_{maks} - \log \bar{\sigma}_a$,

mb = slope hubungan $\log G_{maks} - \log \bar{\sigma}_b$,

- mc = slope hubungan $\log G_{maks} - \log \bar{\sigma}_c$,
 Pa = tekanan atmosfer dalam unit tegangan terkekang.

Hasil G_{maks} dari Persamaan (2.23) di atas mempunyai korelasi lebih baik dibandingkan hasil pengukuran menggunakan RC dengan beban dua aksis pada jenis tanah yang sama (Stokoe & Ni, 1985).

Modulus geser tanah juga dapat dianalisis berdasarkan teori teknik perambatan gelombang, G_{maks} dari pengukuran lapangan berbasis metode seismik dapat dihitung menggunakan persamaan (Kramer, 1996):

$$G_{maks} = \rho V_s^2 \quad (2.24)$$

dengan,

$$\rho = \text{massa tanah, yang dihitung dari } \frac{\gamma_t}{g},$$

γ_t = berat unit bahan,

g = konstanta gravitasi,

V_s = kecepatan gelombang geser.

Modulus elastik bahan bahan seterusnya dapat dihitung berdasarkan teori elastik menggunakan kecepatan gelombang geser jika rasio *Poisson* bahan diketahui (Tabel 2.2), sebagai berikut:

$$E = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (2.25)$$

Selanjutnya pengukuran kecepatan gelombang geser (V_s) dapat ditentukan dengan hubungan antara panjang gelombang (λ) dan frekuensinya (f) yang dituliskan sebagai:

$$V = \lambda f \quad (2.26)$$

Kedua parameter gelombang tersebut (λ dan f) dapat digunakan bagi menentukan karakteristik suatu bahan berdasarkan kecepatan gelombang yang merambatnya.

Beberapa model empirik juga telah diterbitkan untuk mendapatkan hubungan kurva G kepada variasi nilai regangannya untuk berbagai jenis tanah. Salah satu model empirik yang populer adalah persamaan Vucetic & Dobry (1991) yang dinyatakan sebagai:

$$\frac{G}{G_{maks}} = \frac{1}{1 + \alpha \left\{ \frac{\gamma_a^\alpha}{\gamma_h} \right\}} \quad (2.27)$$

dengan nilai γ_h dan α dapat menggunakan nilai dari Tabel 2.3 berdasarkan indeks plastisitas tanah.

TABEL 2.3: BEBERAPA KONSTANTA K , γ_h DAN α NILAI INDEKS PLASTISITAS

INDEKS KEPLASTIKAN	K	γ_h	α
0	0	0.04	1.00
20	0.18	0.07	1.00
40	0.30	0.12	0.95
60	0.41	0.20	0.87
80	0.48	0.38	0.75
≥ 100	0.50	1.10	0.97

Sementara itu, Ishibashi & Zhang (1993) menyempurnakan persamaan kurva penurunan modulus geser Vucetic & Dobry (1991) dengan menambahkan pengaruh tekanan terkekang efektif, yang diekspresikan dalam persamaan:

$$\frac{G}{G_{maks}} = K(\gamma, I_p) (\sigma'_m)^{m(\gamma, I_p) - m_0} \quad (2.27)$$

dengan,

$$m(\gamma, I_p) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] e^{-0.0145 I_p^{1.3}} \quad (2.28)$$

$$K(\gamma, I_p) = 0.5 \left[1 + \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000102 + n(I_p)}{\gamma} \right)^{0.492} \right\} \right] \quad (2.29)$$

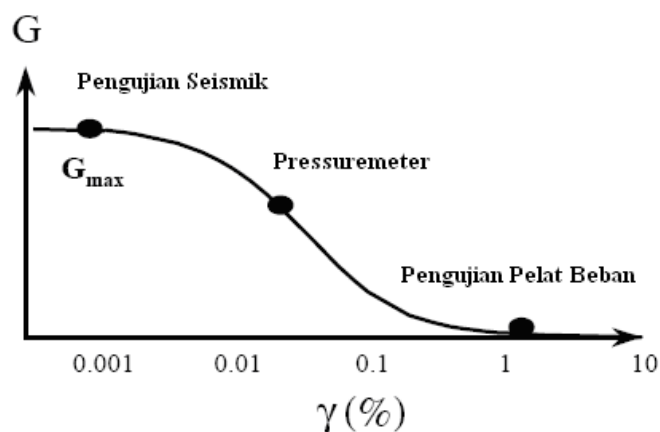
dan,

$$\begin{aligned} n(I_p) &= 0.0 && \text{untuk } I_p = 0 \text{ (tanah berpasir)} \\ n(I_p) &= 3.37 \times 10^{-6} I_p^{1.404} && \text{untuk } 0 < I_p \leq 15 \text{ (tanah plastisitas rendah)} \\ n(I_p) &= 7.0 \times 10^{-7} I_p^{1.976} && \text{untuk } 15 < I_p \leq 70 \text{ (tanah plastisitas sedang)} \\ n(I_p) &= 2.7 \times 10^{-5} I_p^{1.115} && \text{untuk } I_p > 70 \text{ (tanah plastisitas tinggi)} \end{aligned}$$

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk membandingkan pengujian lapangan dan laboratorium untuk evaluasi G_{maks} tanah. Diawali oleh Cunny & Fry (1973), yang membandingkan G_{maks} antara pengujian RC dan metode seismik vibrasi tetap (*steady state*). Hasil studinya menunjukkan bahwa nilai G_{maks} laboratorium mempunyai perbedaan $\pm 50\%$ lebih konservatif dibandingkan pengujian lapangan. Meskipun demikian, seiring dengan perkembangan pengujian lapangan yang semakin maju oleh Stokoe & Richart (1973) dan Iwasaki & Tatsuoka (1977), mereka telah menemukan kesamaan hasil yang baik antara pengujian seismik lapangan dan RC untuk nilai G_{maks} .

Sementara itu, dalam kesimpulan studi Prakash & Puri (1980), dirumuskan bahwa adanya korelasi yang baik antara pengujian seismik lapangan, RC dan beban plat (*plate-load*) untuk menentukan nilai modulus geser tanah. Prakash (1981) juga menambahkan bahwa beberapa ujian lapangan dan laboratorium diantaranya *downhole*, *crosshole*, gelombang permukaan, pelat beban siklik, osilator sederhana, telah memberikan hasil yang akurat dalam mengukur nilai modulus geser tanah pada regangan yang sangat kecil.

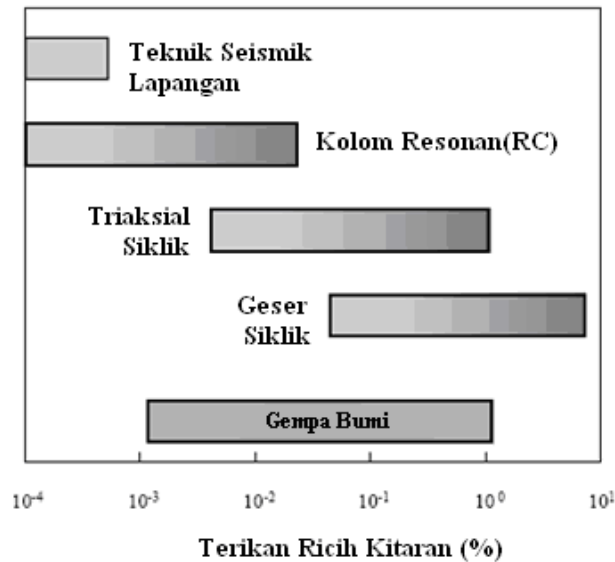
Sebagaimana telah dinyatakan sebelumnya bahwa parameter G dipengaruhi oleh nilai regangan dan keadaan tegangan yang digambarkan oleh kurva penurunan nilai G yang searah dengan kenaikan regangannya (Ishibashi & Zhang, 1993; Vucetic & Dobry, 1991). Kurva penurunan secara tipikal digambarkan oleh Jardine et al. (1986) dalam Gambar 2.11.



Gambar 2.11: Kurva tipikal variasi nilai modulus geser terhadap regangan geser yang dihasilkan oleh gabungan beberapa pengujian (Jardine et al., 1986).

Gambar 2.11 menunjukkan bahwa modulus geser yang diukur melalui pengujian seismik menghasilkan nilai modulus mewakili tingkat regangan sangat kecil atau nilainya lebih kecil dari regangan geser ambang linier. Pada tingkat regangan ini, kurva modulus bersifat linier yang ditunjukkan dengan sifat kekakuannya konstan terhadap modulus geser maksimum (G_{maks}) sehingga besaran modulus hampir tidak dipengaruhi oleh amplitudonya regangannya (Nazarian & Stokoe, 1984; Jardine et al., 1986; Gordon, 1997). Selain pengujian seismik, pengujian laboratorium

seperti TS dan RC juga dapat digunakan untuk mendapatkan G_{maks} , sedangkan pengujian triaksial dan geser siklik hanya dapat digunakan untuk mendapatkan nilai G pada tingkat regangan yang lebih besar. Pada keadaan regangan yang lebih besar, besaran modulus dipengaruhi oleh amplitudo regangan bahan. Gambar 2.12 memberikan rangkuman beberapa pengujian baik laboratorium maupun di lapangan yang bekerja secara spesifik level regangan bahan yang bisa diobservasi.



Gambar 2.12: Rentang nilai regangan geser yang bias dicakupi oleh beberapa pengujian laboratorium dan lapangan (Ishihara, 1996)

Secara umum, Lai & Rix (1998) menyimpulkan bahwa pengujian laboratorium menyediakan pengukuran yang lebih presisi dan detil dibandingkan pengujian lapangan. Hal ini disebabkan beberapa parameter tanah dapat diamati dengan lebih detil dan akurat. Meskipun demikian, pengujian laboratorium mempunyai kekurangan yang dapat diatasi dengan penggunaan pengujian di lapangan, diantaranya:

- pengambilan contoh tanah yang sepenuhnya tak terganggu
- menentukan nilai tegangan natural tanah sebagaimana keadaan tegangan di lapangan. Pengukuran tegangan efektif tanah natural hanya dapat dilakukan dengan pengujian lapangan yang sifatnya tidak merusak yang merupakan salah satu keunggulan yang dapat dilakukan oleh pengujian seismik.
- pengukuran tanah dalam kondisi drainasi natural
- keadaan kekakuan tanah yang menggambarkan ketakhomogenan media yang dapat diobservasi secara langsung dengan teknik seismik.

Tabel 2.4 secara jelas memberikan rangkuman mengenai keunggulan dan kekurangan pengujian laboratorium dan lapangan untuk menentukan modulus geser bahan dalam penyelidikan sub-permukaan.

TABEL 2.4: PENGUKURAN SIFAT DINAMIK TANAH PADA REGANGAN KECIL ANTARA
PENGUJIAN LABORATORIUM DAN LAPANGAN

JENIS UJIAN		KEUNGGULAN			KELEMAHAN	
Lapangan	Bekerja dalam skala luas	Dapat digunakan untuk semua jenis tanah	Keadaan tanah natural (tegangan sebenarnya)	Kesulitan dalam interpretasi hasil	Minimnya observasi pada keadaan batas	Belum dapat menyajikan parameter tanah yang lebih detail seperti pengujian laboratorium
Laboratorium	Pengukuran lebih terperinci	Dapat berulang (<i>repeatable</i>)	Keadaan batas (<i>boundary condition</i>) dapat diamati	Sangat sensitif kepada sampel tanah terganggu	Hasil pengujian berada dalam skala laboratorium	Kesulitan dalam pengukuran tanah berbutir kasar (<i>granular soils</i>)

2.2.5 Mekanisme dan Model Kepadatan Entropi

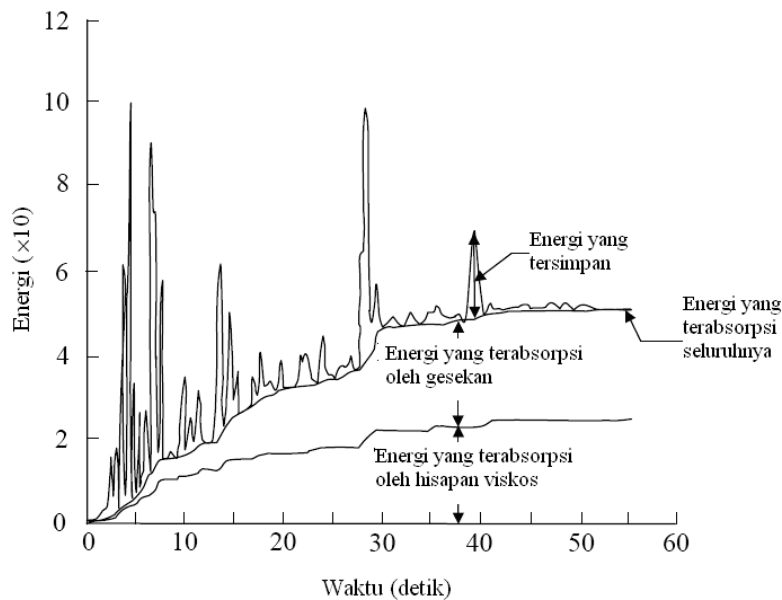
Jika suatu energi dari beban dinamik (misalnya, perambatan gelombang seismik) diberikan pada media tanah, maka sebagian energinya akan terabsorpsi (teredam) yang menghasilkan pengurangan terhadap amplitudo gelombangnya. Mekanisme absorpsi energi ini merupakan konsep dasar dalam analisis sifat pengurangan (*attenuation*) gelombang pada tanah. Perilaku pengurangan tersebut memberikan informasi mengenai nilai rasio redaman tanah (Richart et al., 1970), litologi, karakteristik fisik, derajat kejenuhan batuan (Xia et al., 2002) dan pengklasifikasian tanah (Rosyidi et al., 2008). Perilaku kepadatan entropi pada suatu waktu tanah dapat diwakili oleh parameter tanah koefisien pengurangan dan rasio redaman tanah.

1. Mekanisme Absorpsi Energi

Terdapat dua mekanisme dasar absorpsi energi yang menjadi pertimbangan dalam pengukuran nilai pengurangan dan redaman pada tanah (Parrales, 2004). Mekanisme pertama disebut sebagai *mekanisme absorpsi pada tingkat mikroskopi*, dan mekanisme kedua disebut sebagai *mekanisme penurunan amplitudo gelombang seismik*.

Mekanisme absorpsi mikroskopi merupakan gabungan dari beberapa mekanisme individu yang mengkaji fenomena absorpsi energi secara mikroskopis (Lai & Rix, 1998). Dalam mekanisme ini, redaman tanah dapat dihasilkan dari dua fenomena fisik yaitu absorpsi/kehilangan gesekan (*frictional losses*) antara partikel tanah dan hisapan viskos (*viscous drag*). Fenomena absorpsi energi akibat kehilangan gesekan pada permukaan butiran tanah merupakan mekanisme yang ditemui pada tanah tak kohesif (Whitman & Dobry, 1993). Namun, jika tanah dalam keadaan jenuh, energi secara dominannya diabsorpsi melalui hisapan viskos pada fluida dalam pori yang bergerak

dalam tanah. Yilmaz (1987) menambahkan bahwa pada kasus perambatan gelombang seismik, fluida dalam pori akan mengambil sebagian energi gelombang dan menyebabkan adanya penurunan frekuensi gelombangnya. Fenomena fisik lain yang berpengaruh dalam absorpsi mikroskopi adalah pecahan partikel yang nilainya tidak signifikan pengaruhnya dalam tanah dan dapat diabaikan, sedangkan fenomena kompleks elektromagnet antara molekul air dan partikel tanah mikroskopi hanya berlaku pada tanah dengan butiran halus, misalnya pada tanah lempung. Gambar 2.13 menunjukkan hubungan dan konsep antara energi yang terabsorpsi dalam tanah akibat fenomena geseran dan hisapan viskos dalam tanah.

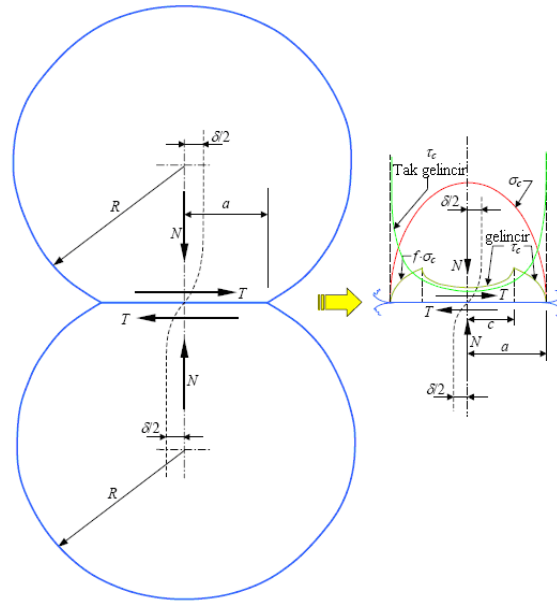


Gambar 2.13: Hubungan dan konsep energi yang terjadi pada tanah karena kejadian gempa dan bagian-bagian energi yang terabsorpsi oleh mekanisme gesekan dan viskos (Hall & McCabe, 1989; Green, 2001)

Energi yang tersimpan (Gambar 2.13) menunjukkan bagian energi yang merambat dalam tanah dan selanjutnya energi ini akan hilang searah dengan terbasorpsinya energi gelombang seismik di akhir periode getaran. Konsep fisika absorpsi energi oleh gesekan dapat dipelajari melalui respon dua model bola elastik yang menggambarkan hubungan antara partikel butiran tanah di bawah gaya normal dan geser. Pembahasan selengkapnya mengenai konsep fisika ini dapat ditemui dalam Mindlin (1949), Mindlin et al. (1951), Goodman & Brown (1962), Deresiewicz (1974) dan Dobry et al. (1982).

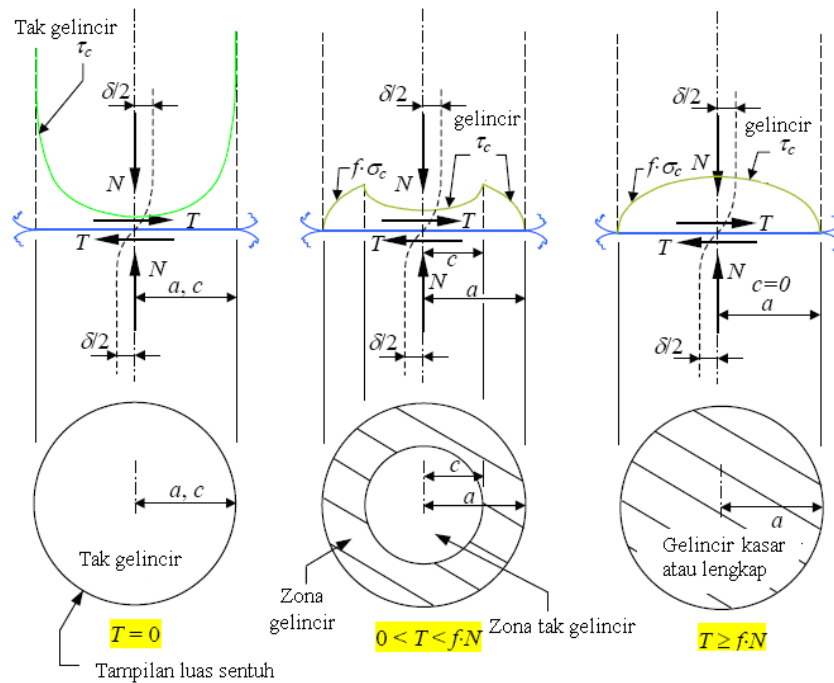
Secara umum, dalam Gambar 2.14, menjelaskan konsep fisika absorpsi energi oleh gesekan antar partikel tanah. Gaya kontak permukaan dan tegangan yang terlibat dalam dua bola elastik dan variasi tegangan normalnya (σ_c) yang melintang kepada luasan kontak permukaan ditunjukkan dalam Gambar 2.14a. Jika gaya tangen (T) meningkat, deformasi sisi (δ) akan meningkat di antara pusat sfera. Meskipun demikian, bidang gelincir kasar yang mencakup seluruh luas permukaan

partikel tanah tidak dapat terjadi hingga gaya tangen mencapai nilai $T = f N$ (Gambar 2.14b). Dalam Gambar tersebut juga ditunjukkan tahapan gelincir pada luasan permukaan partikel tanah.



(a)

Gambar 2.14: (a) Gaya sentuh dan tegangan antara dua bola dengan jari-jari R dan berbagai parameter tinjauannya dan (b) gelincir relatif mencakup luas permukaan bola dengan keadaan tak gelincir ($T = 0$), keadaan gelinciran dengan nilai tengah $0 < T < f N$ dan gelincir kasar atau lengkap ($T \geq f N$) (Green, 2001)



(b)

Keterangan Gambar:

R = jari-jari bola
 N = gaya normal

σ_c = tegangan normal antara bola
 τ_c = tegangan geser antara bola

T	= gaya tangen	a	= jari-jari luasan permukaan
δ	= deformasi sisi bola	c	= jari-jari luasan tak gelincir
f	= koefisien geseran bola	ν	= rasio <i>Poisson</i>
E	= modulus elastik		

Gambar 2.14: Lanjutan

Peristiwa gelincir (*slip*) dimulai pada jari-jari luar (*outer radius*) luasan permukaan, selanjutnya membentuk suatu *anulus gelinciran* yang mengelilingi zona tanpa gelincir (*no slippage zone*) untuk $0 < T < fN$ (Deresiewicz, 1974; Green, 2001). Ketika mekanisme gelincir ini terjadi, energi yang dialirkan dari gelombang seismik akan ikut diabsorpsi. Secara matematik, hubungan gaya tangen dan deformasi sisi dalam Gambar 2.14 dapat diturunkan sebagai berikut (Deresiewicz, 1974):

$$T = \left(1 - \left(\frac{c}{a} \right)^3 \right) f \cdot N \quad (2.30)$$

$$\delta = \frac{3(2-\nu)(1-\nu)fN}{4Ea} \left[1 - \left(1 - \frac{T}{fN} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (2.31)$$

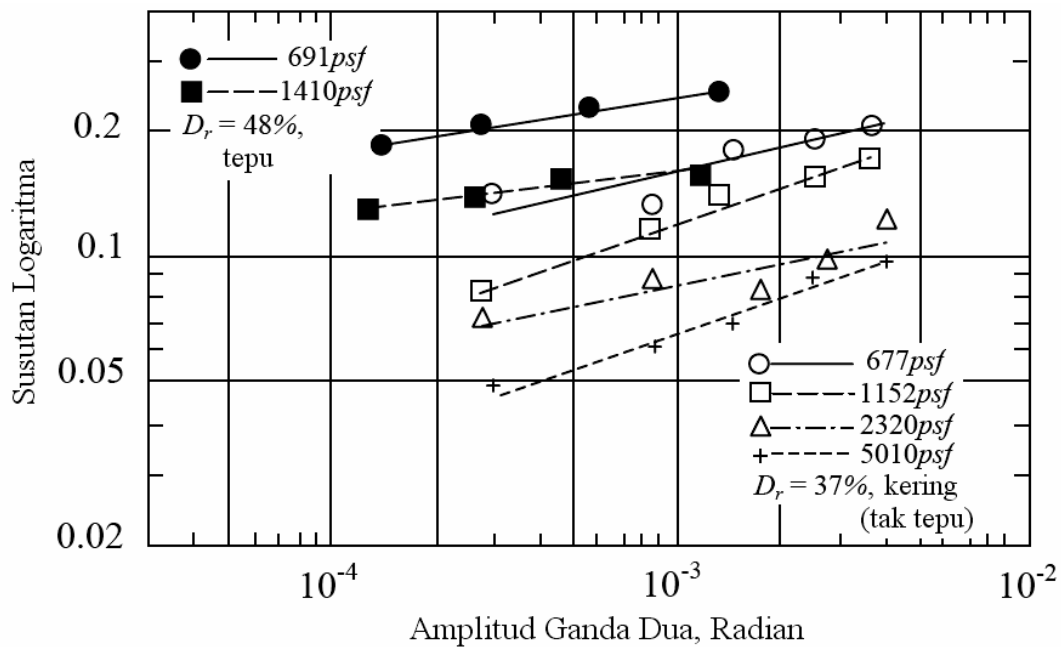
dengan,

$$a = \left[\frac{3(1-\nu)RN}{4E} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.32)$$

Green (2001) memberikan skenario energi terabsorpsi dan batas mekanisme gelincir yang terjadi terhadap peristiwa likuifaksi tanah. Ketika beban dinamik sementara (misalnya beban gempa) diberikan kepada tanah tak kohesif dan menghasilkan daya tangen sebesar $0 < T < fN$ maka absorpsi energi yang berlaku tidak menimbulkan kejadian likuifaksi tanah. Batas gaya tangen, $T = fN$, menghasilkan deformasi sisi yang diartikan sebagai batas regangan kejadian likuifaksi tanah. Diskusi terperinci mengenai hubungan likuifaksi terhadap mekanisme gesekan, bidang gelincir dan absorpsi energi dalam partikel tanah dapat dilihat dalam Green (2001).

Mekanisme selanjutnya adalah absorpsi energi oleh fenomena hisapan viskos. Hisapan viskos merupakan suatu gaya yang menghalangi gerak relatif suatu fluida dan padat. Teori yang digunakan untuk menjelaskan absorpsi energi oleh mekanisme viskos di dalam tanah telah diberikan dalam Biot (1956). Sementara itu, Hall (1962) dan Hall & Richart (1963) telah menjalankan pengujian laboratorium (menggunakan metode RC) untuk mengukur pengaruh beberapa

parameter tanah terhadap energi total yang terabsorpsi dalam bahan tanah berbutir, termasuk didalamnya adalah parameter viskos fluida pori. Mereka mendapatkan hasil bahwa pengaruh mekanisme gesekan dan hisapan viskos terhadap energi terabsorpsi melalui perbandingan hasil pengujian sampel kering kepada sampel yang jenuh. Gambar 2.15 menunjukkan salah satu hasil pengujian mereka untuk bahan pasir Ottawa. Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.15, pengurangan logaritma (*logarithmic decrement*) untuk sampel jenuh cenderung konstan (sedikit variasi) terhadap amplitudo siklik berbanding sampel kering. Bagian energi yang terabsorpsi oleh mekanisme hisapan viskos akan meningkat jika amplitudo siklik meningkat.



Gambar 2.15: Variasi pengurangan logaritma terhadap amplitudo siklik untuk pasir Ottawa kering dan jenuh menggunakan RC (Hall & Richart, 1963)

Sebagai catatan, hasil kajian Hall & Richart (1963) ini melakukan pengujian pada deformasi tanah dengan tingkat regangan geser yang kecil yaitu sekitar 0,015 %. Untuk tingkat regangan yang lebih besar (akibat beban gempa), mekanisme geseran selanjutnya akan mendominasi perilaku absorpsi energi pada tanah (Whitman & Dobry, 1993). Bagian absorpsi energi akibat gesekan akan meningkat searah dengan peningkatan amplitudo siklik dan regangan gesernya.

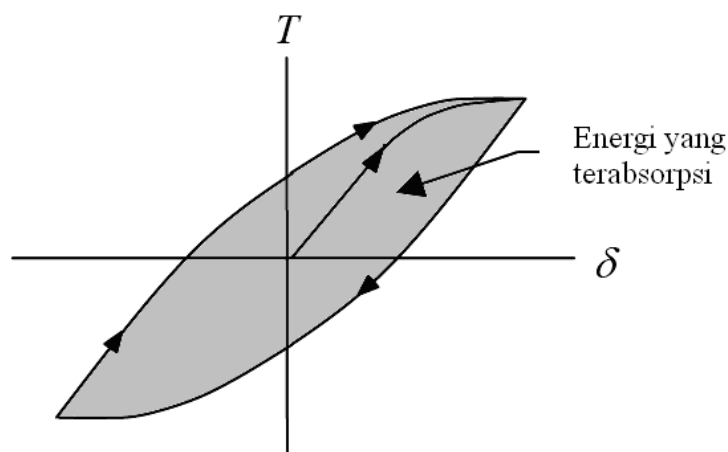
Mekanisme absorpsi energi yang terjadi pada tanah juga dapat diamati melalui penurunan amplitudo gelombang seismik yang merambat pada tanah. Penurunan amplitudo ini disebabkan oleh dua fenomena fisik yaitu redaman geometrik (*geometric damping*) dan penyebaran redaman (*radiation damping*). Sebaran energi yang dibangkitkan dari suatu sumber mekanik akan bergerak di sepanjang luas suatu media dan perambatan energi seismik yang menjauhi sumber mekaniknya menyebabkan amplitudo gelombang akan berkurang searah dengan jarak perambatan yang

dilaluinya. Kedua, ketika gelombang seismik merambat pada media yang berlapis dengan nilai kekakuan setiap lapisannya yang berbeda, maka akan menimbulkan beberapa perilaku fisik diantaranya gelombang seismik pantulan dan transmisi pada wilayah batas (*interface*), konversi mode (*mode conversion*) dan penyebaran mode gelombang. Fenomena fisik tersebut juga dapat menyebabkan amplitudo gelombang seismik berkurang (Rix et al., 2000). Mempertimbangkan kompleksitas fenomena kedua ini, sifat pengurangan dan redaman menggunakan metode seismik lapangan perlu mengambil beberapa asumsi yang penting yaitu bahwa kondisi tanah disifatkan homogen dan isotropik (Knopoff, 1964); sebagai konsekuensinya pengukuran lapangan perlu dijalankan dalam jarak yang pendek sehingga sifat bahan dapat dipertimbangkan sebagai homogen. Selanjutnya, mekanisme absorpsi energi gelombang seismik oleh pengaruh geometrik ini menjadi fokus dalam penyelidikan tanah berbasis rambatan gelombang seismik.

2. Model Absorpsi Energi dan Rasio Redaman

a. Model Kurva Histeresis

Hubungan antara gaya dan perpindahan sebagai suatu hasil gesekan antar partikel tanah akibat gaya tangensial siklik yang diberikan pada tanah dapat digambarkan dalam suatu kurva histeresis sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.16. Kurva histeresis ini dibentuk dari persamaan matematik gaya tangensial (T) dan deformasi sisi (δ) seperti telah dituliskan dalam Persamaan 2.30 dan 2.31 sebelumnya. Luasan yang dibatasi oleh kurva histeresis tersebut merupakan jumlah energi yang diabsorpsikan dalam sistem gesekan partikel. Corak kurva histeresis absorpsi energi ini bersesuaian dengan kurva histeretis tegangan dan regangan yang dihasilkan oleh model visko-elastik selama eksitasi harmonik yang ditunjukkan dalam Persamaan 2.17 dan Gambar 2.10. Untuk kurva histeresis yang dihasilkan dari model visko-elastik, luasan yang dibatasi oleh kurva histeresis menunjukkan jumlah energi yang diabsorpsi setiap unit volumetrik bahan.



Gambar 2.16: Kurva histeresis hasil beban siklik gaya tangen pada tanah
(Green, 2001)

Kajian laboratorium yang dijalankan oleh Hardin (1965) pada sampel tanah pasir kering menunjukkan bahwa bentuk kurva histeresis tidak dipengaruhi oleh tingkat pembebanan yang diberlakukan. Hal ini berimplikasi pada jumlah energi yang diabsorpsi oleh mekanisme gesekan yang menjadi independen terhadap frekuensi amplitudo beban yang diberikan kepada tanah. Untuk mekanisme hisapan visko, energi yang diabsorpsi secara langsung adalah proporsional dengan frekuensi beban yang digunakan.

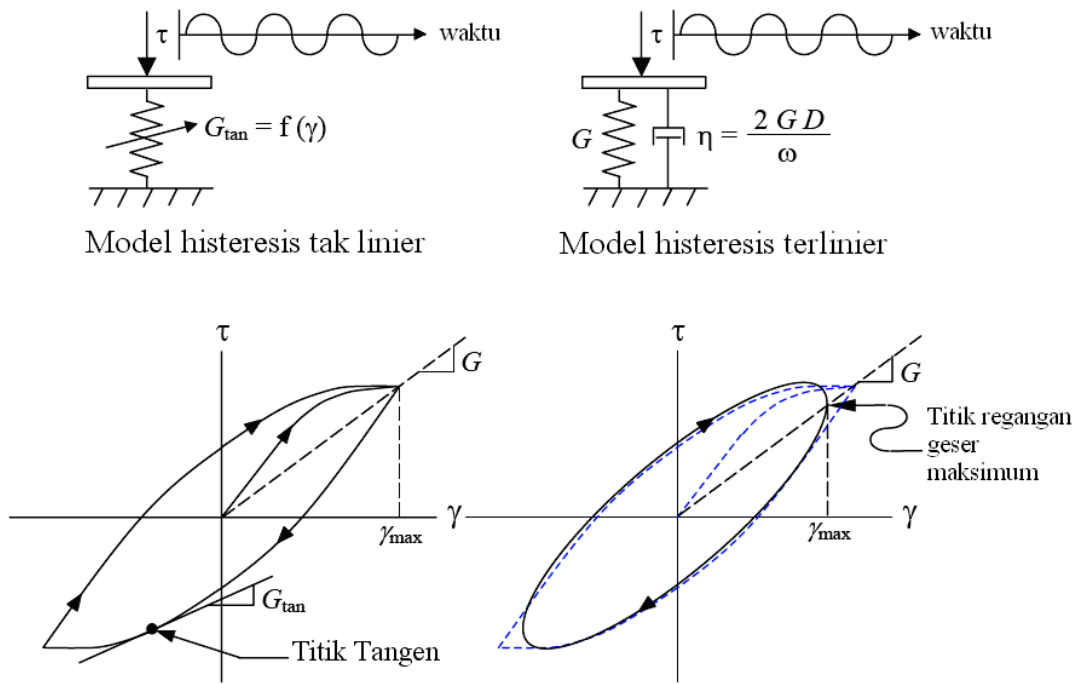
Beberapa model pendekatan yang telah digunakan untuk mempelajari hubungan antar parameter yang membentuk kurva histeresis diantaranya model bi-linier (Idriss & Seed, 1968), hiperbolik (Lee & Finn, 1978) dan Ramberg-Osgood (Streeter et al., 1973). Meskipun demikian, penggunaan model tersebut memerlukan turunan order kedua persamaan differensial tak-linier untuk menjelaskan fenomena absorpsi energi perambatan gelombang seismik. Turunan persamaan tersebut menjadi kompleks dan ketepatan hasil turunan tidak berdampak langsung kepada perolehan hasil analisis yang akurat. Suatu metode linierisasi berbasis kepada statistik adalah metode alternatif yang bisa digunakan. Dasar metode ini adalah menggantikan sistem tak-linier kepada perilaku sistem linier sebagaimana telah dijelaskan secara terperinci dalam Iwan dan Yang (1971), Dobry (1970) dan Dobry et al. (1971). Metode ini seterusnya dinamakan sebagai model linier ekuivalen (*equivalent linier model*) dan digunakan sebagai dasar program komputer dinamik perangkat lunak SHAKE (Schnabel et al., 1972).

Model reologi untuk sistem tak linier histeresis dan histeresis linierisasi terhadap kurva histeresisnya diberikan dalam Gambar 2.17. Sekalipun model linierisasi dibangun berdasarkan model visko-elastik, koefisien redaman visko (*viscous damping coefficient*) dapat disusun dalam hubungan inversi yang proporsional terhadap frekuensi sirkular (*circular frequency*) dan dituliskan sebagai (Hardin, 1965):

$$\eta = \frac{2GD}{\omega} \quad (2.33)$$

dengan,

- η = koefisien redaman (dalam unit tegangan \times waktu)
- G = modulus geser *secant* (dalam unit tegangan)
- D = rasio redaman (tak berdimensi)
- ω = frekuensi sirkular (rad/saat)

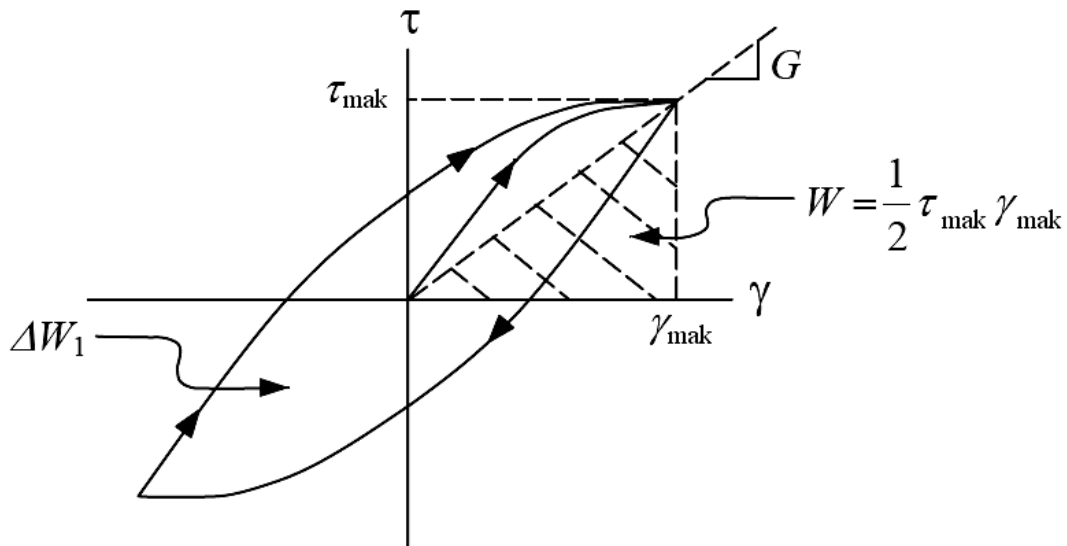


Gambar 2.17: Model reologi dan gelong histeresis untuk bahan dengan pendekatan histeresis tak linier dan terlinier (linierisasi)

Seterusnya, berdasarkan kurva histeresis (Gambar 2.17) dan mekanisme absorpsi energi (Jacobsen, 1960), rasio redaman (D) suatu bahan dapat dianalisis melalui persamaan berikut:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_1}{W} \quad (2.34)$$

dengan ΔW_1 merupakan energi terabsorpsi (luasan kurva bagian dalam) setiap unit volumetrik dalam satu kurva histeresis dan W adalah energi tersimpan dalam bahan elastik yang memiliki G yang sama dengan bahan visko-elastik. Gambar 2.18 menjelaskan hubungan dan luas antara energi terabsorpsi dan energi tersimpan dalam satu kurva histeresis.



Gambar 2.18: Komponen energi terabsorpsi (ΔW_1) dan energi tersimpan (W) untuk penentuan rasio redaman

Rasio redaman dalam Persamaan 2.34 merupakan rasio redaman yang dipengaruhi oleh nilai frekuensi. Meskipun demikian, Lai & Rix (1998) menjelaskan bahwa dari banyak data pengujian yang diamati, redaman tanah merupakan fenomena redaman yang tidak dipengaruhi frekuensi terjadi pada tingkat regangan sangat kecil dengan rentang frekuensi 0.001 hingga 10 Hz. Dalam rentang frekuensi tersebut, rasio redaman dapat disebutkan dalam keadaan konstan.

b. Model Faktor Absorpsi

Para pakar geofisika dan seismologi memberikan istilah absorpsi energi tak berdimensi dan sifat pengurangan pada suatu bahan adalah sama dengan *faktor kualitas* (Q). Faktor absorpsi atau kualitas juga dinamakan sebagai faktor pengurangan spesifik (*specific attenuation factor*) oleh Knopoff (1964) atau fungsi absorpsi spesifik (*specific dissipation function*) oleh Richart et al. (1970), yang dapat dituliskan dalam hubungan:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W_1}{2\pi W} = 2D \quad (2.35)$$

Jika suatu Q pada suatu bahan bernilai tak terhingga berarti tidak terdapat pengurangan pada bahan tersebut (Yilmaz, 1987). Herrmann (1986) menambahkan bahwa kedua nilai D dan Q harus dibedakan masing-masing sebagai respon bahan gelombang geser dan longitudinal. Rasio redaman geser (D) biasanya memiliki nilai yang lebih tinggi berbanding rasio redaman longitudinal (Q).

c. Model *Bandwidth* Setengah-Daya

Metode *Bandwidth Setengah-Daya* (*half-power bandwidth*) dapat digunakan untuk menentukan rasio redaman tanah dalam pengujian kolom resonan (*RC*). Metode ini berasaskan pengukuran lebar kurva respon dinamik tanah yang berdekatan dengan sumber responnya. Stokoe et al. (1999) memberikan persamaan matematika untuk faktor kualitas berdasarkan *bandwidth* melalui persamaan:

$$Q = \frac{f_r}{(f_2 - f_1)} \quad (2.36)$$

dengan *bandwidth* merupakan beda frekuensi antara batas frekuensi teratas (f_2) dan terbawah (f_1) untuk suatu nilai amplitudo yang bernilai 0.707 atau ($\frac{1}{\sqrt{2}}$) kali amplitudo respon sumber pada frekuensi resonan (f_r). Rasio redaman selanjutnya dapat ditentukan melalui:

$$D = \frac{(f_2 - f_1)}{2f_r} \quad (2.37)$$

d. Model Pengurangan Logaritma

Pengukuran sifat pengurangan bahan juga dapat dilakukan menggunakan pengurangan logaritma (δ). Untuk beban dinamik dengan regangan geser bahan kecil (misalnya kurang dari 10^{-5}), sifat pengurangan dapat disusun dalam persamaan eksponensial dan magnitudo respon bahannya yang dapat ditunjukkan dalam pengurangan kadar eksponensial atau logaritma (Knopoff 1964). Pengurangan amplitudo suatu getaran adalah identik dengan respon getaran bebas pada sistem teredam viskos. Teori sistem berderajat kebebasan tunggal (*single-degree-of-freedom*, *SDOF*) dengan redaman viskos dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena susutan logaritma ini sebagai berikut:

$$\delta = \ln \frac{z_1}{z_2} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad (2.38)$$

dengan z_1 dan z_2 merupakan amplitudo respon getaran. Rasio redaman bahan selanjutnya dapat ditentukan menggunakan hubungan (Chopra, 1995; Stokoe et al., 1999):

$$D = \left[\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2} \right]^{1/2} \quad (2.39)$$

e. Model Koefisien Pengurangan

Koefisien pengurangan (*coefficient of attenuation*, α) adalah suatu parameter yang terkait dengan susutan logaritma yang dituliskan sebagai (Richart et al., 1970):

$$\delta = \frac{2\pi V\alpha}{\omega} = L\alpha \quad (2.40)$$

dengan V dan L masing-masing adalah kecepatan dan panjang gelombang seismik. Faktor absorpsi terkait dengan koefisien pengurangan dapat disusun melalui hubungan:

$$Q^{-1} = \frac{2V\alpha}{\omega} \quad (2.41)$$

dan rasio redamannya dapat ditentukan sebagai:

$$D = \frac{\alpha V}{\omega} \quad (2.42)$$

f. Model Bornitz

Untuk menentukan koefisien pengurangan dan rasio redaman, model Bornitz dapat dikembangkan dari hubungan absorpsi energi dalam Persamaan 2.34 dengan mengasumsikan bahwa bahan berperilaku linier dan amplitudo gelombang merupakan akar dua dari energi (Rosyidi, 2004, Rosyidi et al., 2008). Energi elastik gelombang seismik berkurang searah jarak rambatan gelombangnya yang disebabkan oleh pengurangan amplitudo gelombang. Nilai gelombang yang berkurang ini dapat terjadi dalam perambatannya di permukaan ataupun dalam suatu media. Fenomena ini dapat digunakan untuk mempelajari sifat redaman suatu bahan berdasarkan jarak diantara sensor gelombang (r). Das (1993) menulis persamaan koefisien pengurangan yang dinyatakan dalam persamaan *Bornitz*:

$$\frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \exp^{-\alpha(r_1-r_2)} \quad (2.43)$$

dimana,

- w_1 = amplitudo getaran pada jarak r_1 dari sumber
 w_2 = amplitudo getaran pada jarak r_2 dari sumber
 n = faktor pengurangan yang tergantung jenis gelombang
 a = koefisien pengurangan

Selanjutnya, nilai rasio redaman tanah dapat ditentukan melalui hubungan koefisien pengurangan dan kecepatan gelombang seismik menggunakan Persamaan 2.42.

g. Model Rasio Spektrum

Metode rasio spektrum digunakan untuk mengukur nilai pengurangan gelombang seismik di lapangan (Campanella et al., 1994). Rasio redaman dari rasio spektrum dapat ditentukan menggunakan persamaan (Wang et al., 2004):

$$\ln\left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)}\right) = -\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left[\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n \cdot T\right] + \frac{2\pi D}{V} \cdot (r_2 - r_1) \cdot f \quad (2.44)$$

disini, A_1 and A_2 merupakan amplitudo Fourier untuk frekuensi yang berbeda (f), C_1 and C_2 masing-masing adalah koefisien tidak dipengaruhi oleh frekuensi dan respon transduser (*transducer response*), V adalah kecepatan gelombang seismik, T adalah koefisien transmisi (*transmission coefficient*), dan n merupakan faktor pengurangan. Dari Persamaan 2.44, dapat dilihat bahwa sifat pengurangan akibat pengaruh geometrik, pantulan dan gandingan telah disebutkan sebagai bentuk intersep dalam persamaan tersebut. Hal tersebut tidak berpengaruh terhadap rasio bahan yang dihitung jika parameter D , V dan T tetap diasumsikan sebagai parameter yang independen terhadap frekuensi (Wang et al., 2004). Rasio redaman dapat dituliskan kembali dalam turunan tingkat dua dari Persamaan 2.44 sebagai berikut:

$$D = \frac{\partial^2}{\partial r \cdot \partial f} \left(\frac{A_1(f)}{A_2(f)} \right) \cdot \frac{V}{2\pi} \quad (2.45)$$

h. Model Fungsi Perpindahan Gelombang Permukaan

Kurva pengurangan amplitudo gelombang berurutan dapat secara bersamaan diperoleh dari data seismik melalui pengukuran menggunakan multi sensor (*multi-channel measurements*). Selanjutnya, data dianalisis menggunakan metode fungsi perpindahan (*transfer function*) dan kurva dispersi kecepatan gelombang fase. Teknik ini dikenalkan pertama kalinya oleh Lai & Rix

(1998), Rix et al. (2001) dan Foti (2004). Teknik pengukuran simultan ini dapat menyediakan informasi rasio redaman tanah secara lebih konsisten dan efektif (Lai, 1998). Teknik fungsi perpindahan dilakukan dengan menggunakan dekonvolusi (*deconvolution*) gelombang seismik permukaan tanpa memerlukan sumber seismik yang spesifik. Dekonvolusi sinyal $f_2(t)$ terhadap sinyal dari sensor lain $f_1(t)$ dalam domain frekuensi merupakan rasio spektrum Fourier kedua sinyal $F_2(\omega)$ dan $F_1(\omega)$ yang dapat dinyatakan dalam hubungan matematisnya sebagai berikut:

$$F_{21}(\omega) = \frac{F_2(\omega)}{F_1(\omega)} = \frac{F_2(\omega) \cdot \overline{F_1(\omega)}}{|F_1(\omega)|^2} \quad (2.46)$$

dengan, ω adalah frekuensi sirkular (*circular frequency*) dan F_{21} adalah sistem fungsi perpindahan (Foti, 2003). Mempertimbangkan seri pengukuran multi-sensor dengan kecepatan partikel gelombang yang merambat sepanjang satu garis lurus di permukaan tanah, maka fungsi pindahan pengujian $\tilde{F}(r, \omega)$ dapat ditentukan dengan menggunakan:

$$\tilde{F}(r, \omega) = F_{ii}(\omega) = \frac{F_i(\omega)}{F_1(\omega)} \quad (2.47)$$

dengan $F_i(\omega)$ adalah transformasi Fourier sinyal ke- i yang diterima pada jarak r dari sumber gelombang, $F_1(\omega)$ merupakan transformasi Fourier sinyal yang diterima oleh sensor terdekat dan $F_{ii}(\omega)$ menjelaskan dekonvolusi sinyal ke- i .

Analisis regresi selanjutnya dapat digunakan dalam analisis kurva fungsi perpindahan untuk menentukan kurva pengurangan gelombang permukaan. Ekspresi analitik fungsi perpindahan yang digunakan dalam regresi ditentukan dari model visko-elastik dengan asumsi bahwa lapisan tanah yang homogen. Dengan memasukkan ekspresi sudut fase kompleks, $\psi(r, \omega)$ yang diasumsikan sebagai $K(\omega) \cdot r$ dan fungsi geometrik radiasi, $G(r, \omega)$, maka Persamaan 2.47 dapat dinyatakan kembali sebagai (Lai, 1998):

$$\tilde{F}(r, \omega) = \frac{G(r, \omega)}{G(r_1, \omega)} e^{-iK(\omega)(r-r_1)} \quad (2.48)$$

disini, $K(\omega) = \{[\omega/V_R(\omega)] + i\alpha_R(\omega)\}$ merupakan nomor gelombang kompleks dengan $V_R(\omega)$ adalah kecepatan fase dan $\alpha_R(\omega)$ sebagai koefisien pengurangan gelombang *Rayleigh*. Perlu diambil asumsi bahwa $\psi(r, \omega) = K(\omega) \cdot r$ merupakan nilai yang setara dengan sudut fase $\psi(r, \omega)$ yang dihasilkan dari mode dasar perambatan gelombang permukaan (Rix et al., 2001).

Persamaan 2.48 digunakan dalam analisis regresi tak linier untuk mendapatkan nilai nomor gelombang kompleks $K(\omega)$ fungsi pindahan. Nilai nomor gelombang kompleks ini mempunyai informasi penting mengenai sifat pengurangan gelombang. Nilai ini juga dapat digunakan dalam prosedur inversi kompleks guna menentukan profil rasio redaman. Perbincangan terperinci mengenai metode ini dilihat dalam Rix & Lai (1998) dan Foti (2003).

3. Hubungan Rasio Redaman terhadap Modulus Geser Tanah

Sebagaimana kurva penurunan modulus geser, kurva rasio redaman tanah pengujian terhadap nilai regangan gesernya dapat diturunkan dengan menggunakan parameter indeks plastisitas dan tekanan terkekang. Model empirik Ishibashi & Zhang (1993) menuliskan hubungan kurva rasio redaman terhadap kedua parameter tersebut sebagai berikut:

$$D(\gamma, I_p) = \frac{0.33(1 + e^{-0.015I_p^{1.3}})}{2} \left\{ 0.59 \left(\frac{G}{G_{maks}} \right)_{(\gamma, I_p)}^2 - 1.55 \left(\frac{G}{G_{maks}} \right)_{(\gamma, I_p)} + 1 \right\} \quad (2.49)$$

2.3 | Ringkasan

Dalam bab ini, beberapa faktor utama yang mempengaruhi perilaku respon dinamik yaitu parameter modulus geser dan rasio redaman tanah telah dipresentasikan. Faktor magnitudo regangan geser hasil merupakan salah satu faktor dominan yang berpengaruh sebagai akibat dari eksitasi dinamik pada tanah. Selain faktor amplitudo regangan, beberapa faktor lainnya seperti tekanan terkekang isotropik efektif, frekuensi eksitasi, waktu terkekang (*time of confinement*) pada tekanan konstan dan jumlah siklik juga berpengaruh.

Dua pendekatan mekanik yaitu model elastik linier dan visko-elastik linier dapat digunakan untuk mempelajari respon dinamik tanah berdasarkan frekuensi respon yang dibangkitkan. Perkembangan ilmu (*the-state-of-the-art*) mengenai model empirik modulus geser dan rasio redaman tanah dari pengujian laboratorium maupun lapangan pada tingkat regangan geser kecil juga disampaikan. Nilai kedua parameter, G dan D tanah tersebut sangat penting khususnya berkaitan dengan perilaku dinamik tanah yang dihasilkan dari pengujian seismik di lapangan.