

Estimasi Sebaran Stress di Sekitar Lubang Bor Bawah Permukaan

Desnia Ayu Karlyna^{1,a)} dan Dr. Eng. Bagus Endar B. Nurhandoko^{1,2,b)}

¹Laboratorium Wave Inversion and Subsurface Fluid Imaging (WISFIR),
Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Rock Fluid Imaging Lab.,
Jalan Sukasenang Raya no. 5A, Bandung, Indonesia, 40124

^{a)} desnia.ak@gmail.com

^{b)} bagusnur@rock-fluid.com

Abstrak

Studi mengenai estimasi persebaran stress di sekitar lubang bor pada eksplorasi minyak dan gas bumi menjadi hal utama untuk segi keamanan dan keselamatan pengeboran. Estimasi persebaran stress di sekitar lubang bor merupakan studi yang dilakukan untuk memperkirakan persebaran stress pada suatu keadaan di bawah permukaan bumi. Persebaran stress di bawah permukaan bumi dipengaruhi oleh in-situ principal stress dan tekanan pori. Estimasi sebaran stress di sekitar lubang bor pada medium homogen elastik isotropi dilakukan dengan pendekatan analitik dan membuat model numerik berdasarkan model Lekhnitskii-Amadei (L-A) menggunakan bantuan MATLABTM. Persebaran stress di sekitar lubang bor dipengaruhi oleh tekanan pori, tekanan pada sumur dan tekanan in-situ.

Kata-kata kunci: Lubang bor, tegangan horizontal, tekanan overburden, tekanan pori

PENDAHULUAN

Saat ini kebutuhan akan energi semakin meningkat, terutama minyak dan gas bumi. Eksplorasi minyak dan gas bumi juga telah menemui tahapan yang lebih sulit yaitu struktur bawah permukaan yang lebih kompleks sehingga diperlukan perencanaan pengeboran yang tepat dan efisien. Tantangan terbesar yang harus dihadapi saat proses pengeboran yaitu geodinamika dari struktur bawah permukaan. Studi mengenai persebaran stress di sekitar lubang bor saat eksplorasi minyak dan gas bumi menjadi hal utama untuk segi keamanan dan keselamatan pengeboran. Pengetahuan mengenai *in-situ principal stress* dan mekanisme runtuh batuan merupakan hal utama untuk membuat model geomekanika. Persebaran stress di bawah permukaan bumi dipengaruhi oleh stress yang ada di bawah permukaan bumi seperti in-situ principal stress dan tekanan pori. Pada penelitian ini, estimasi sebaran stress di sekitar lubang bor pada medium homogen isotropi dengan pendekatan analitik dan membuat model numerik dilakukan berdasarkan model Lekhnitskii-Amadei (L-A). Pada model L-A dilakukan penggunaan tiga sistem koordinat yang menjelaskan arah dari tegangan in-situ, anisotropi dan lubang bor.

DASAR TEORI

Definisi Tekanan

Tekanan normal merupakan tekanan yang nilainya sebanding dengan tekanan pada kolom air yang diukur dari permukaan. Tekanan normal ini menunjukkan keadaan normal yang terjadi pada suatu keadaan di bawah permukaan. Oleh karena itu, tekanan normal ini dapat dijadikan salah satu faktor nilai tekanan pori. Apabila tekanan lebih kecil dari keadaan normalnya (tekanan normal) maka kondisi ini merupakan *underpressure*. Begitu pula sebaliknya, ketika tekanan lebih besar dari tekanan normal maka keadaan ini merupakan *overpressure*.

Tekanan pori merupakan tekanan yang bekerja pada fluida yang mengisi pori suatu formasi batuan. Tekanan ini berasal dari pergerakan fluida yang menekan matriks batuan. Akibat desakan inilah terbentuk tekanan pori pada batuan. Oleh karena itu, tekanan pori ini besarnya sebanding dengan tekanan hidrostatik, dimana tekanan hidrostatik ini dikontrol oleh massa jenis fluida yang tersaturasi di dalam formasi.

Tekanan overburden merupakan tekanan yang diakibatkan oleh seluruh batuan penutup sampai ke permukaan. Tekanan overburden ini memiliki pengertian tekanan keseluruhan yang berasal dari arah vertikal akibat terjadinya proses pengendapan, baik tekanan yang berasal dari fluida maupun yang berasal dari matriks suatu formasi batuan.

Hukum Hooke pada medium isotropi

Untuk medium anisotropi, elastik linear, homogen dan kontinyu, hubungan konstitutifnya dapat dituliskan dalam hukum Hooke sebagai berikut

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \tag{1}$$

C_{ijkl} merupakan tensor orde keempat dari konstanta elastik dengan 81 komponen bebas ($1 \leq i, j, k, l \leq 3$).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \tag{2}$$

Bentuk inverse dari persamaan (2) ditunjukkan dengan tensor dari komplians A_{ijkl} seperti berikut

$$\varepsilon_{ij} = A_{ijkl} \sigma_{kl} \tag{3}$$

Persamaan (3) dapat dituliskan ke dalam bentuk matriks (Lekhnitskii, 1981; Ong, 1994)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-v_{yx}}{E_y} & \frac{-v_{zx}}{E_z} & \frac{\eta_{x,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{x,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{-v_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & \frac{-v_{zy}}{E_z} & \frac{\eta_{y,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{y,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{y,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{-v_{xz}}{E_x} & \frac{-v_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & \frac{\eta_{z,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{z,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{z,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{yz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{yz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{yz,z}}{E_z} & \frac{1}{G_{yz}} & \frac{\mu_{yz,xz}}{G_{xz}} & \frac{\mu_{yz,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xz,z}}{E_z} & \frac{\mu_{xz,yz}}{G_{yz}} & \frac{1}{G_{xz}} & \frac{\mu_{xz,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xy,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xy,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xy,z}}{E_z} & \frac{\mu_{xy,yz}}{G_{yz}} & \frac{\mu_{xy,xz}}{G_{xz}} & \frac{1}{G_{xy}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \tag{4}$$

Dimana

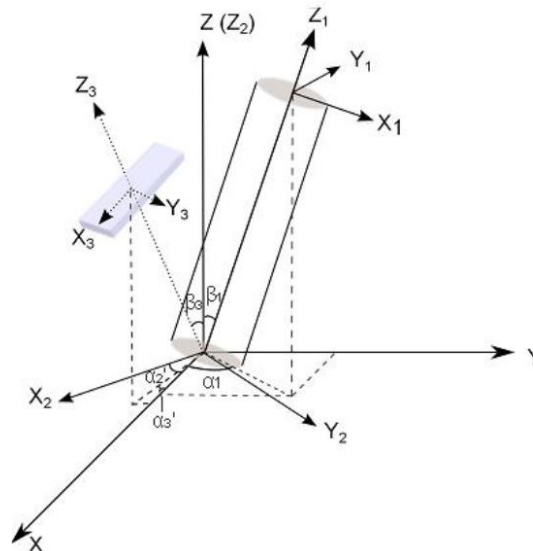
1. E_i adalah modulus Young pada arah i ;
2. v_{ij} adalah rasio Poisson yang menunjukkan perbandingan regangan geser arah j terhadap regangan geser arah i dengan diberikan gaya eksternal pada arah i ;
3. G_{ij} adalah modulus geser pada bidang i - j ;
4. $\mu_{ij,kl}$ menunjukkan adanya pergeseran pada bidang i - j yang menyebabkan munculnya tegangan tangensial pada bidang k - l ;

5. $\eta_{i,kl}$ adalah koefisien yang saling mempengaruhi komponen pertama yang menunjukkan adanya peregeangan pada arah k akibat tegangan geser yang diberikan pada bidang i-j. sedangkan $\eta_{ij,k}$ adalah koefisien yang mempengaruhi kedua komponen yang menunjukkan adanya pergeseran di bidang i-j akibat adanya tegangan normal pada arah k.

Persebaran stress pada medium isotropi

Model Lekhnitskii-Amadei (L-A) mengharuskan penggunaan tiga sistem koordinat yang menjelaskan arah dari tegangan *in-situ far-field*, arah anisotropi dan lubang bor. Input yang digunakan dalam model ini yaitu tegangan *in-situ* (besar dari ketiga tegangan utama dan sudut Eulerian beserta arahnya), tekanan sumur, matriks stiffness batuan, arah anisotropi, azimuth dan inklinasi dari lubang bor. Model yang digunakan yaitu lubang bor lingkaran yang dibor pada formasi linear elastik homogen anisotropik dengan efek kimiawi, temperature dan poroelastik yang diabaikan. Lubang bor juga diasumsikan sangat panjang dan tekanan lumpur internal sama (tidak bervariasi) sepanjang lubang bor. Model menggunakan tiga sistem koordinat kartesian yang dijelaskan menggunakan sudut (β) dan tren (α) yang mengacu pada sistem koordinat utama X-Y-Z (Ong and Roegiers, 1993) yaitu:

- Sistem koordinat lubang bor $X_1-Y_1-Z_1$ dengan inklinasi β_1 dan sudut azimuth α_1
- Sistem koordinat tegangan *in-situ* $X_2-Y_2-Z_2$ dengan inklinasi $\beta_2=0$ dan sudut azimuth α_2
- Sistem koordinat parameter elastik batuan $X_3-Y_3-Z_3$ dengan inklinasi β_3 dan sudut azimuth α_3



Gambar 1. Sistem koordinat yang digunakan pada model *Lekhnitskii-Amadei* (L-A)

Tensor tegangan *in-situ* utama dapat dituliskan dalam bentuk matriks

$$\sigma = \begin{bmatrix} S_H & & \\ & S_h & \\ & & S_V \end{bmatrix} \tag{5}$$

S_H, S_h dan S_V adalah tegangan horizontal maksimal, tegangan horizontal minimal dan tegangan vertikal. Untuk menyederhanakan model, S_V diasumsikan selalu memiliki arah berlawanan terhadap sumbu z. Analisa kestabilan lubang bor difokuskan pada daerah sekitar lubang bor, untuk itu baik tensor tegangan $\{\sigma\}_s$ dan komplians $[S]$ harus dirotasi ke sistem koordinat lubang bor.

$$\{\sigma\}_b = [O_b][R_\epsilon]^t \{\sigma\}_s \tag{6}$$

$$[S]_b = [P_\epsilon][M'_\sigma]^t [S]_s [M'_\sigma][P_\epsilon]^t \tag{7}$$

Subscript s dan *b* menunjukkan tegangan *in-situ* dan sistem koordinat lubang bor. Matriks dengan subscript σ adalah matriks transformasi tegangan dan matriks dengan subscript ϵ menunjukkan matriks transformasi geser serta *t* adalah operator transpose. Matriks transformasi dapat ditulis dalam bentuk umum $[T]$ (Ong, 1994):

$$[T_{\sigma}] = \begin{pmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 & 2l_3m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & n_3n_1 & m_1n_3 + m_3n_1 & n_1l_3 + n_3l_1 & l_1m_3 + l_3m_1 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$[T_{\epsilon}] = \begin{pmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & m_1n_1 & n_1l_1 & l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & m_2n_2 & n_2l_2 & l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & m_3n_3 & n_3l_3 & l_3m_3 \\ 2l_2l_3 & 2m_2m_3 & 2n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ 2l_3l_1 & 2m_3m_1 & 2n_3n_1 & m_1n_3 + m_3n_1 & n_1l_3 + n_3l_1 & l_1m_3 + l_3m_1 \\ 2l_1l_2 & 2m_1m_2 & 2n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Komponen l , m dan n merupakan arah kosinus yaitu

$$l_1 = \cos\beta \cos\alpha \quad l_2 = -\sin\alpha \quad l_3 = \sin\beta \cos\alpha \quad (10)$$

$$m_1 = \cos\beta \sin\alpha \quad m_2 = \cos\alpha \quad m_3 = \sin\beta \sin\alpha \quad (11)$$

$$n_1 = -\sin\beta \quad n_2 = 0 \quad n_3 = \cos\beta \quad (12)$$

Untuk menyelesaikan persoalan tegangan pada lubang bor ini, sistem koordinat kartesian (x, y, z) menjadi bentuk sistem koordinat silinder (r, θ, ζ). Sumbu baru r dan θ berhubungan dengan X_1 dan Y_1 dan sumbu ζ berhubungan dengan Z_1 dimana $\beta=0$. Sehingga arah kosinus yang baru yaitu (Ong, 1994)

$$l_1 = \cos\theta \quad l_2 = -\sin\theta \quad l_3 = 0 \quad (13)$$

$$m_1 = \sin\theta \quad m_2 = \cos\theta \quad m_3 = 0 \quad (14)$$

$$n_1 = 0 \quad n_2 = 0 \quad n_3 = 1 \quad (15)$$

dan bentuk tegangan transformasi menjadi seperti berikut

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_{\theta} \\ \sigma_{\zeta} \\ \tau_{\theta\zeta} \\ \tau_{r\zeta} \\ \tau_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & \sin 2\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & -\sin 2\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\frac{1}{2}\sin 2\theta & \frac{1}{2}\sin 2\theta & 0 & 0 & 0 & \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Bentuk solusi umum dari persebaran tegangan yang terdiri atas tegangan akibat proses pengeboran (*drilling-induced stress*) σ_b yang melapisi tegangan batas (*boundary stress*) σ_0 yaitu

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{x0} + \sigma_{xb} = \sigma_{x0} + 2Re[\mu_1^2\phi_1'(z_1) + \mu_2^2\phi_2'(z_2) + \lambda_3\mu_3^2\phi_3'(z_3)] \\ \sigma_y &= \sigma_{y0} + \sigma_{yb} = \sigma_{y0} + 2Re[\phi_1'(z_1) + \phi_2'(z_2) + \lambda_3\phi_3'(z_3)] \\ \sigma_z &= \sigma_{z0} - \frac{1}{a_{33}}(a_{31}\sigma_{xb} + a_{32}\sigma_{yb} + a_{34}\tau_{yzb} + a_{35}\tau_{xzb} + a_{36}\tau_{xyb}) \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy0} + \tau_{xyb} = \tau_{xy0} - 2Re[\mu_1\phi_1'(z_1) + \mu_2\phi_2'(z_2) + \lambda_3\mu_3\phi_3'(z_3)] \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_x \sin^2\theta + \sigma_y \cos^2\theta - \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \sigma_r &= \sigma_x \cos^2\theta + \sigma_y \sin^2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \end{aligned} \quad (17)$$

dimana solusi untuk fungsi analitik $\phi_i'(z_i)$ yaitu

$$\begin{aligned} \phi_1'(z_1) &= -\frac{1}{2\Delta\zeta_1\sqrt{\left(\frac{z_1}{a}\right)^2 - 1 - \mu_1^2}} \left[(i\tau_{xy0} - \sigma_{y0} + P_w)(\mu_2 - \lambda_2\lambda_3\mu_3) + (\tau_{xy0} - i\sigma_{y0} + iP_w)(\lambda_2\lambda_3 - 1) \right. \\ &\quad \left. + (\tau_{yz0} - i\tau_{xz0})\lambda_3(\mu_3 - \mu_2) \right] \\ \phi_2'(z_2) &= -\frac{1}{2\Delta\zeta_2\sqrt{\left(\frac{z_2}{a}\right)^2 - 1 - \mu_2^2}} \left[(i\tau_{xy0} - \sigma_{y0} + P_w)(\lambda_1\lambda_3\mu_3 - \mu_1) + (\tau_{xy0} - i\sigma_{x0} + iP_w)(1 - \lambda_1\lambda_3) \right. \\ &\quad \left. + (\tau_{yz0} - i\tau_{xz0})\lambda_3(\mu_1 - \mu_3) \right] \end{aligned}$$

$$\phi'_3(z_3) = -\frac{1}{2\Delta\zeta_3\sqrt{\left(\frac{z_3}{a}\right)^2 - 1 - \mu_3^2}} \left[(i\tau_{xy0} - \sigma_{y0} + P_w)(\mu_1\lambda_2 - \mu_2\lambda_1) + (\tau_{xy0} - i\sigma_{x0} + iP_w)(\lambda_1 - \lambda_2) + (\tau_{yz0} - i\tau_{xz0})\lambda_3(\mu_2 - \mu_1) \right] \tag{18}$$

dengan nilai

$$l_2(\mu) = \beta_{55}\mu^2 - 2\beta_{45}\mu + \beta_{44}$$

$$l_3(\mu) = \beta_{15}\mu^3 - (\beta_{14} + \beta_{56})\mu^2 + (\beta_{25} + \beta_{46})\mu - \beta_{24}$$

$$l_4(\mu) = \beta_{11}\mu^4 - 2\beta_{16}\mu^3 + (2\beta_{12} + \beta_{66})\mu^2 - 2\beta_{26}\mu + \beta_{22} \tag{19}$$

$$\lambda_1 = -\frac{l_3(\mu_1)}{l_2(\mu_1)} \quad \lambda_2 = -\frac{l_3(\mu_2)}{l_2(\mu_2)} \quad \lambda_3 = -\frac{l_3(\mu_3)}{l_2(\mu_3)} \tag{20}$$

$$\zeta_i = \frac{\frac{z_i}{a} + \sqrt{\left(\frac{z_i}{a}\right)^2 - 1 - \mu_i^2}}{1 - i\mu_i} \tag{21}$$

$$\Delta = \mu_2 - \mu_1 + \lambda_3\lambda_2(\mu_1 - \mu_3) + \lambda_1\lambda_3(\mu_3 - \mu_2) \tag{22}$$

β_{ij} merupakan koefisien geser reduksi yang merupakan fungsi dari komponen matriks komplians a_{ij} .

Pada medium isotropi, medium dianggap memiliki uniformitas ke segala arah. Peninjauan geomekanika seperti prediksi perambatan patahan hidrolik, analisa kestabilan lubang bor dan prediksi tegangan pada formasi dilakukan dengan memanfaatkan parameter elastik medium seperti modulus Young dan Rasio Poisson. Untuk sistem koordinat x, y, z bentuk matriks untuk medium isotropi dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{33} & (C_{33} - 2C_{44}) & (C_{33} - 2C_{44}) \\ & C_{33} & (C_{33} - 2C_{44}) \\ & & C_{33} \\ & & & C_{44} \\ & & & & C_{44} \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \tag{23}$$

komponen selain nol berhubungan dengan parameter Lamé (λ, μ) dimana

$$C_{33} = \lambda + 2\mu \tag{24}$$

$$C_{44} = \mu \tag{25}$$

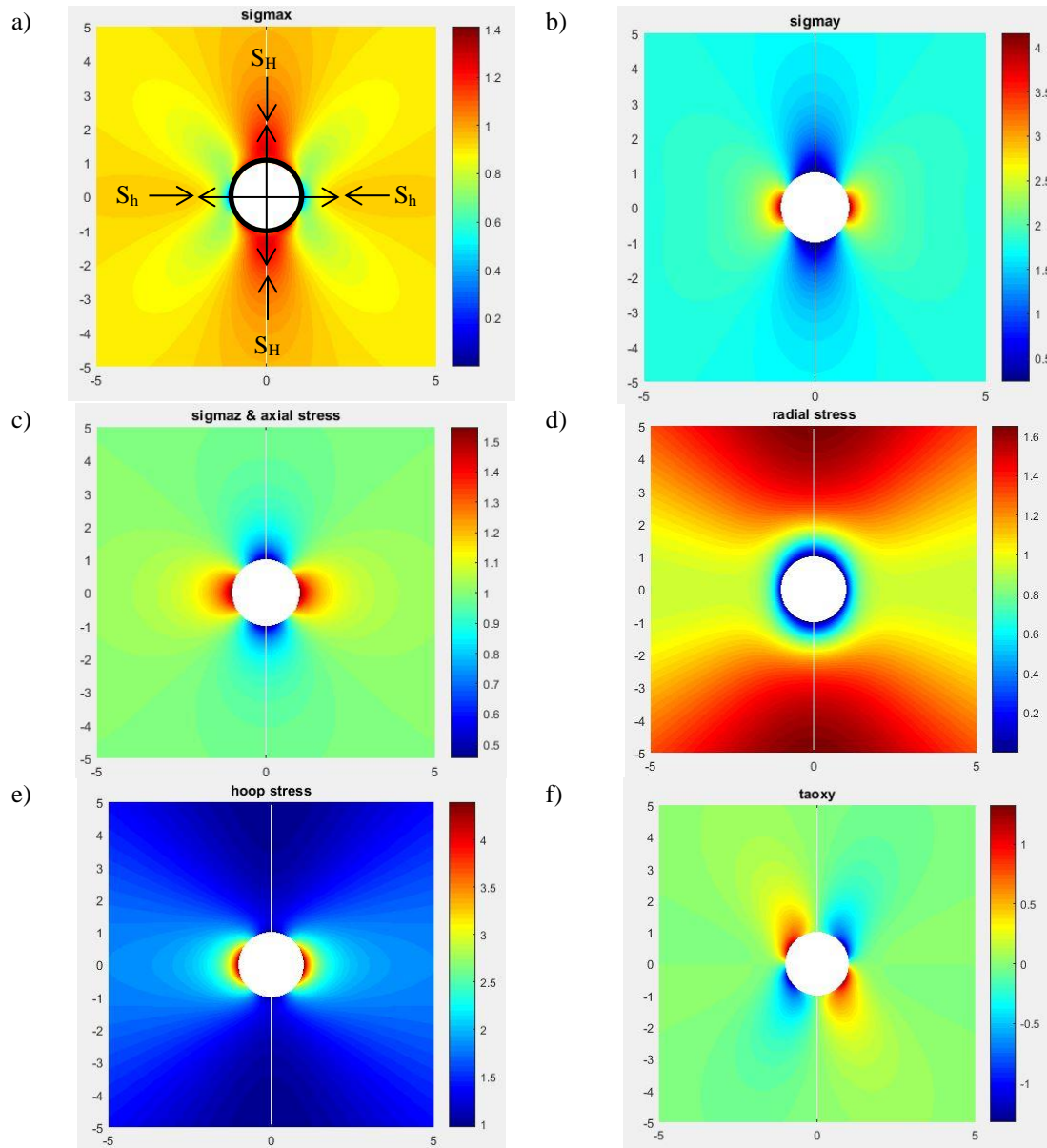
HASIL DAN ANALISA

Persebaran tegangan pada suatu formasi (kedalaman) dihitung menggunakan persamaan *closed-form* yang diberikan oleh *Amadei* (1983) untuk medium isotropi. Persebaran tegangan di sekitar lubang bor ditinjau pada beberapa kedalaman. Persebaran tegangan di sekitar lubang bor dilakukan pada medium homogen isotropi dengan parameter formasi pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter formasi

Depth (ft)	In-situ principal stress			Tekanan lumpur (MPa)	Tekanan pori (MPa)	Azimuth lubang bor	Stiffnes Constant	
	Tekanan overburden (MPa)	SHMax (MPa)	Shmin (MPa)				C33 (GPa)	C44 (GPa)
150	853.30	1511.43	781.31	91.23	203.50	90	5735.83	1518.31
632	3770.40	3428.35	2536.69	384.38	1531.49	105	7560.33	3005.91

Nilai tegangan yang terlihat pada penampang 2-D dengan arah x-y merupakan nilai tegangan yang telah dinormalisasi terhadap tekanan overburden (S_v). Normalisasi dilakukan untuk melihat respon lapisan terhadap kedalaman. Skala warna yang digunakan pada setiap panel berbeda tergantung pada rentang nilai tegangannya. Persebaran tegangan di sekitar lubang bor yang ditinjau antara lain persebaran tegangan horizontal maksimum (S_H), persebaran tegangan horizontal minimum (S_h), persebaran tegangan secara aksial, radial, hoop, dan persebaran tegangan geser arah horizontal (τ_{xy}).



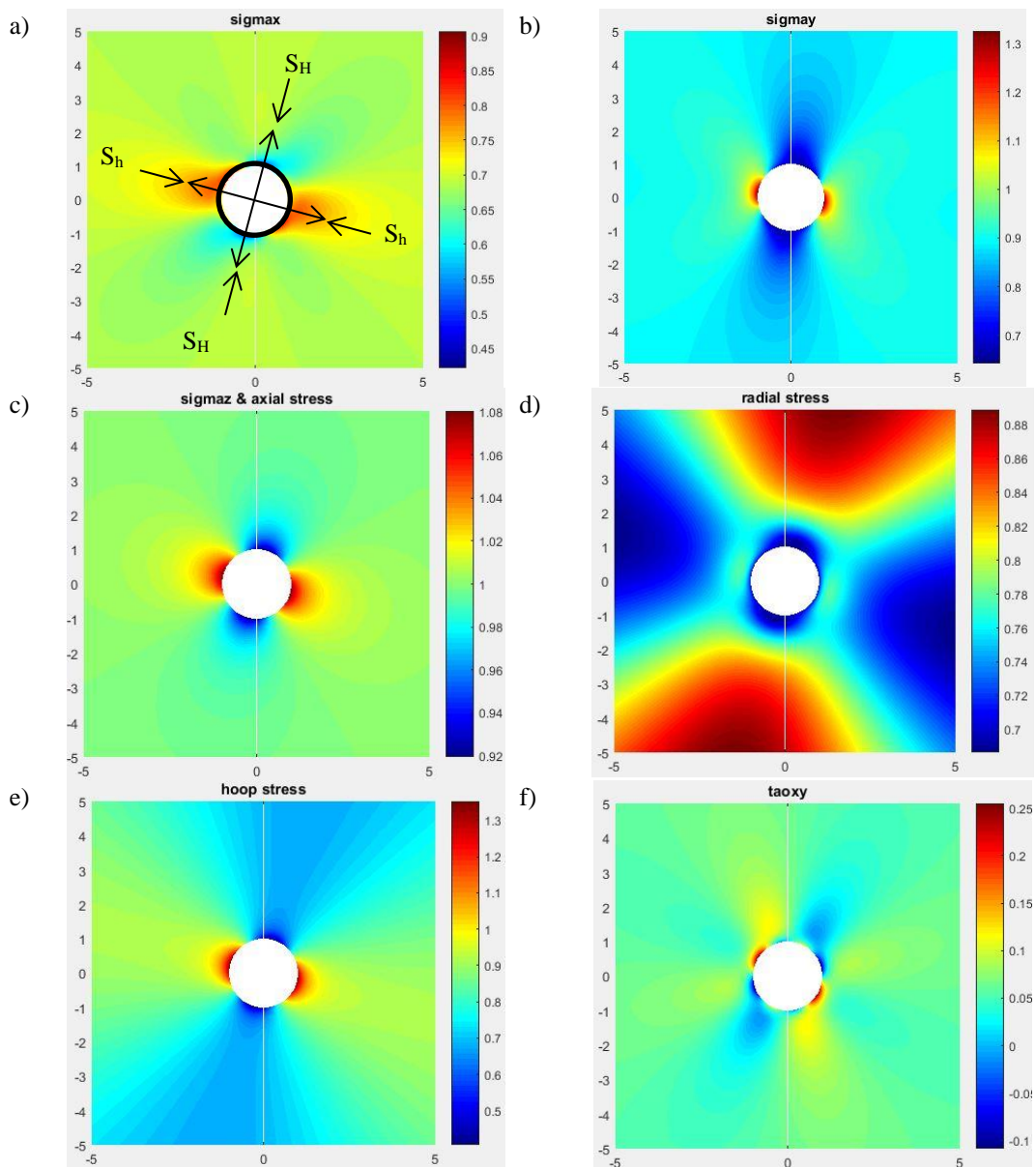
Gambar 2. Ilustrasi persebaran (a) tegangan horizontal maksimum (b) tegangan horizontal minimum (c) tegangan aksial (d) tegangan radial (e) tegangan hoop (f) regangan geser arah x-y di sekitar lubang bor pada kedalaman 150 ft.

Warna terang (merah) pada gambar 2 menunjukkan daerah yang terkena tekanan, sedangkan warna gelap (biru) menunjukkan daerah yang lebih sedikit terkena tekanan. Nilai tekanan yang negatif menunjukkan bahwa daerah mengalami tegangan akibat perbedaan tekanan yang cukup besar. Kompresi terjadi pada arah tegak lurus terhadap arah tekanan. Daerah yang mengalami kompresi ini merupakan daerah dengan stress yang lebih kecil (S_h), sedangkan daerah yang mengalami tegangan adalah daerah dengan stress yang lebih besar (S_H).

Pada proses pengeboran, keruntuhan yang dapat terjadi yaitu *breakout* dan *tensile failure*. Keruntuhan ini dapat terjadi apabila perbedaan nilai stress maksimum dan stress minimum cukup besar dan tidak diimbangi

dengan pemberian lumpur dengan berat yang cukup untuk menahan tekanan yang ada pada formasi. Keruntuhan *breakout* berhubungan dengan besar tegangan maksimum dan keruntuhan *tensile failure* berhubungan dengan besar tegangan minimum yang ada pada formasi (*minimum principal stress*). *Breakout* terjadi ketika daerah dengan tekanan yang lebih rendah tidak mampu menahan stress yang diberikan, sehingga *breakout* akan terjadi searah dengan arah stress minimum. Sedangkan *tensile failure* terjadi searah dengan arah stress maksimum dimana formasi dengan stress yang besar ini tidak mampu menahan regangan akibat penekanan (kompresi) terhadap daerah dengan stress yang lebih rendah.

Peristiwa keruntuhan dapat diidentifikasi berdasarkan persebaran hoop stress. Kompresi maksimum terjadi pada arah S_h pada lubang sumur dengan nilai stress sebesar $4S_v$. Pada arah tersebut sangat memungkinkan *breakout* dapat terjadi apabila tekanan lumpur yang diberikan lebih kecil dari tekanan formasi. Persebaran hoop stress pada kedalaman 150 ft menghasilkan nilai stress maksimal yang tersebar pada formasi yaitu sebesar $4S_v$ dan terjadi pada arah S_h , sedangkan stress minimum yaitu sebesar S_v terjadi pada arah S_H .



Gambar 3. Ilustrasi persebaran (a) tegangan horizontal maksimum (b) tegangan horizontal minimum (c) tegangan aksial (d) tegangan radial (e) tegangan hoop (f) regangan geser arah x-y di sekitar lubang bor pada kedalaman 632 ft.

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi persebaran tegangan pada kedalaman 632ft. Hasil persebaran tegangan menunjukkan profil yang berbeda dibandingkan dengan hasil pada kedalaman 150ft. Perbedaan ini

disebabkan perbedaan *in-situ principal stress*. Pada kedalaman 150ft, stress arah horizontal merupakan stress terbesar (σ_1) sedangkan pada kedalaman 632ft ini tekanan overburden (S_v) adalah stress yang dominan (σ_1). Jika ditinjau dari tipe sesar, keadaan pada kedalaman 150ft merepresentasikan *strike-slip fault*, sedangkan pada kedalaman 632ft ini merepresentasikan keadaan *normal fault*. Data lapangan yang digunakan tidak menunjukkan adanya sesar yang kompleks, hanya ilustrasi yang diberikan pada gambar 2 dan 3 menunjukkan pola persebaran tegangan pada tipe sesar terkait.

KESIMPULAN

Pendekatan matematis untuk model medium homogen isotropi dari model *Lekhnitskii-Amadei* (L-A) telah berhasil dilakukan dengan penggunaan sistem koordinat yang menjelaskan arah dari tegangan *in-situ far-field* dan lubang bor. Estimasi persebaran stress dilakukan untuk persebaran tegangan horizontal, tegangan vertikal, tegangan radial, hoop, dan tegangan geser horizontal. Zona kuat (*less compressional*) dan lemah (*compressive*) di sekitar lubang bor dapat diidentifikasi berdasarkan persebaran hoop stress. *Breakout* terjadi searah dengan arah stress horizontal minimum akibat zona lemah yang tidak lagi mampu menahan kompresi, sedangkan *tensile failure* terjadi searah dengan stress horizontal maksimum dimana zona kuat tidak mampu lagi menahan regangan akibat kompresi yang diberikan. Faktor-faktor yang mempengaruhi persebaran tegangan di sekitar lubang bor yaitu tekanan pori, tekanan pada sumur (berat lumpur) dan tekanan in-situ dari formasi.

REFERENSI

1. B. Amadei. *Rock anisotropy and the theory of stress measurements*. Springer-Verlag, Berlin. (1983)
2. S. Chopra dan A. Huffman. *Velocity determination for pore pressure prediction*. CSEG Recorder (2006)
3. S.G. Lekhnitskii. *Theory of elasticity of an anisotropic body*. Moscow: Mir Publications (1981)
4. B.E. Nurhandoko, Susilowati, M. Listyobudi, dan R.A Hadi. *Estimation strategy of subsurface stress S_{min} and S_{max} in borehole by combining cross-dipole sonic data and seismic rock physics laboratory*. HAGI annual meeting (2016)
5. B.E. Nurhandoko, Susilowati, M. Listyobudi, dan R.A Hadi. *Relationship among pore pressure, effective pressure and seismic wave velocity in non-soft rock: theoretical and laboratory measurement of some samples from Indonesia carbonate*. THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES. At Bandung, Indonesia (2016)
6. Ong. *Borehole stability*. University of Oklahoma (1994)
7. Ong dan J.C Roegiers. *Influence of anisotropies in borehole stability*. Int J Rock Mech (1993)
8. L. Thomsen. *Weak Elastic Anisotropy*. CSEG Recorder (1986)
9. Qing Jia. *Investigating Stresses Concentrations near Boreholes in Anisotropic Formations and The Mechanical Behavior of Drilling-induced Tensile Fractures*. University of Alberta (2015)
10. M.D Zoback. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press (2007)