

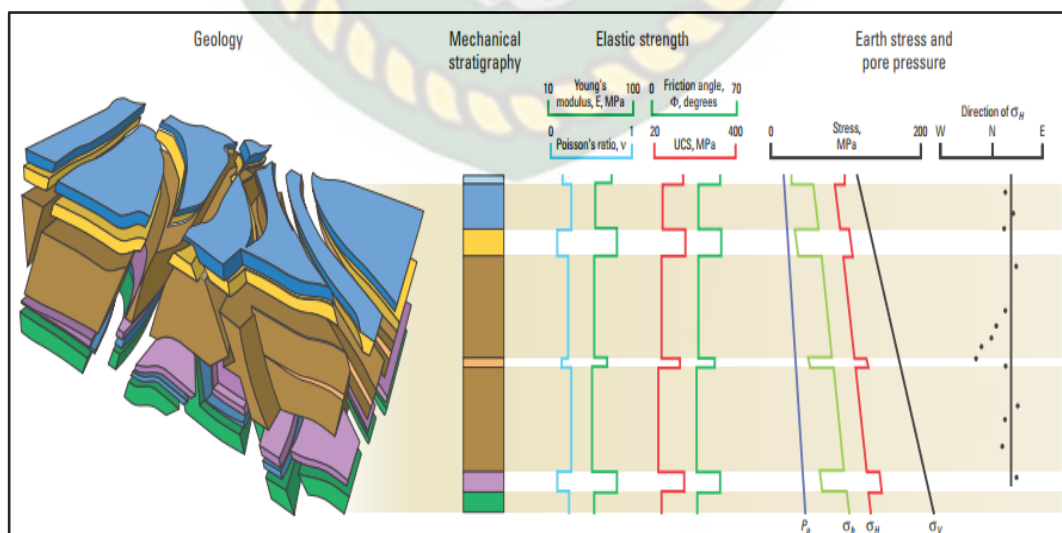
BAB II

TNJAUAN PUSTAKA

2.1 MECHANICAL EARTH MODEL CONSTRUCTION

Plumb et al, (2000); Ali et al, (2003) *Mechanical earth model* terdiri dalam integrasi data dari berbagai sumber pada sebuah model yang menyediakan *rock mechanical* dari sebuah formasi. Hal ini pada dasarnya terdiri dari *elastic properties, rock strength, pore pressure*, serta *in situ stress*. (Chardac, Murray, Carnegie & Marsden, 2005, p. 2)

Pada gambar 2.1 yang merupakan konsep *mechanical earth model*. Langkah pertama dalam membangun sebuah *mechanical earth model* adalah memahami geologi wilayah setempat (kiri). *Mechanical stratigraphy* menyediakan informasi secara rinci mengenai jenis *facies* dan *local deformation mechanisms* (tengah). Rincian profil studi ini adalah *elastic* dan *rock strength* termasuk parameter *unconfined compressive strength* (kanan). Parameter ini digunakan untuk memprediksi *pore pressure, minimum* dan *maximum horizontal stress* dan *vertical stress*. Penentuan arah *horizontal stress* juga penting untuk *drilling* dan *completion operations*. (Ali et al., 2003)



Gambar 2.1 Konsep *Mechanical Earth Model* (Ali et al., 2003)

Tabel 2.1 menunjukkan sumber informasi yang digunakan untuk memperoleh data seperti *rock properties* yang dibutuhkan untuk membangun sebuah *mechanical earth model*. (Knoll, 2016)

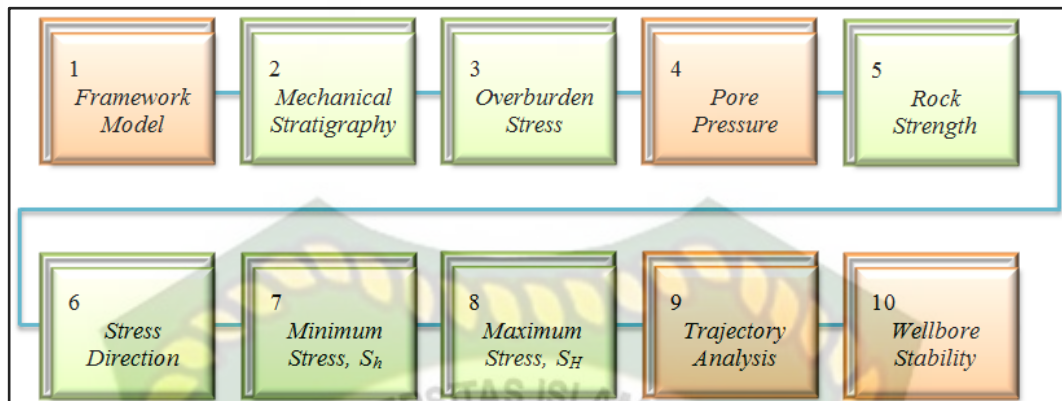
Tabel 2.1 *Source of Information Used to Build an MEM*

Property profiled	Source logs	Other sources
Mechanical stratigraphy	Gamma ray, density, resistivity, sonic compressional velocity (V_p)	Cuttings, cavings, sequence stratigraphy
Pore pressure (P_p)	V_p , check-shot survey, resistivity	Interval velocity from seismic data, formation-integrity test, daily drilling reports
Overburden stress (σ_v)	Bulk density	Cuttings
Stress direction	Oriented multiarm calipers, borehole images, oriented velocity anisotropy	Structural maps, 3D seismic data
Minimum horizontal stress (σ_H)	V_p and sonic shear velocity (V_s), wireline stress tool	P_p , leakoff tests, extended leakoff tests, microfrac, step-rate injection tests, local or regional database, daily drilling reports, modeling
Maximum horizontal stress (σ_H)	Borehole images	P_p , σ_H , rock strength, database, wellbore stress model
Elastic parameters [Young's modulus (E), shear modulus (G), Poisson's ratio (ν)]	V_p and V_s , bulk density	Database, laboratory core tests, cavings
Rock-strength parameters [unconfined compressive strength (UCS), friction angle (Φ)]	V_p and V_s , bulk density, mechanical stratigraphy	Database, laboratory core tests, cavings
Failure mechanisms	Borehole image, oriented multiarm caliper	Daily drilling reports, cavings

Sumber : Ali (2003)

Dalam pekerjaan saat ini, pertama, sebuah *mechanical earth model* dibangun menggunakan data log yang relevan, pemboran dan data lainnya dari *offset well*, dan selanjutnya *wellbore stability* dianalisis berdasarkan pengembangan model dan Mogi-Coloumb *failure criterion*. Akhirnya, hasil yang diperoleh dibandingkan dengan caliper log dan melaporkan insiden seperti *lost circulation* dalam rangka memvalidasi pengembangan model. (Bozorgi, Javani, & Rastegarnia, 2015)

Berikut diagram alur untuk membangun sebuah *mechanical earth model* yang ditunjukkan pada gambar 2.2 (Bozorgi, Javani, & Rastegarnia, 2015)



Gambar 2.2 Workflow Mechanical Earth Model (Bozorgi, Javani, & Rastegarnia, 2015)

2.1.1 Framework Model

Hubungan *mechanical stratigraphy* terhadap sebuah *framework model* *lateral variations* dalam *mechanical properties* terkait dengan struktur geologi. *Framework model* terdiri dari 2D atau 3D *modeling*. (Rasouli, Pallikathekathil, & Mawuli, 2011)

2.1.2 Mechanical stratigraphy

Mechanical response dari *grain* dan *clay* disupport oleh formasi, mungkin bisa dibedakan dalam beberapa kasus. Klasifikasi *mechanical stratigrafi* memungkinkan untuk menghitung *rock mechanical properties* atau *in-situ stress* yang berbeda, jika dibutuhkan, dalam beberapa *facies*. Perbedaan butiran formasi dari clay formasi telah dicapai dengan menerapkan volume log clay yang dihitung. (Rasouli, Pallikathekathil, & Mawuli, 2011)

2.1.3 Elastic Properties

Young's modulus, *shear modulus* dan *poisson's ratio* dapat diperoleh dari *core analysis* dan disebut juga sebagai *static elastic properties*. Dan *properties* yang umumnya berasal dari pengukuran log sonic disebut sebagai *dynamic elastic properties*. (Knoll, 2016)

Elastic properties termasuk *poisson's ratio* (ν), *young's modulus* (E), *shear modulus* (G) dan *bulk modulus* (K).

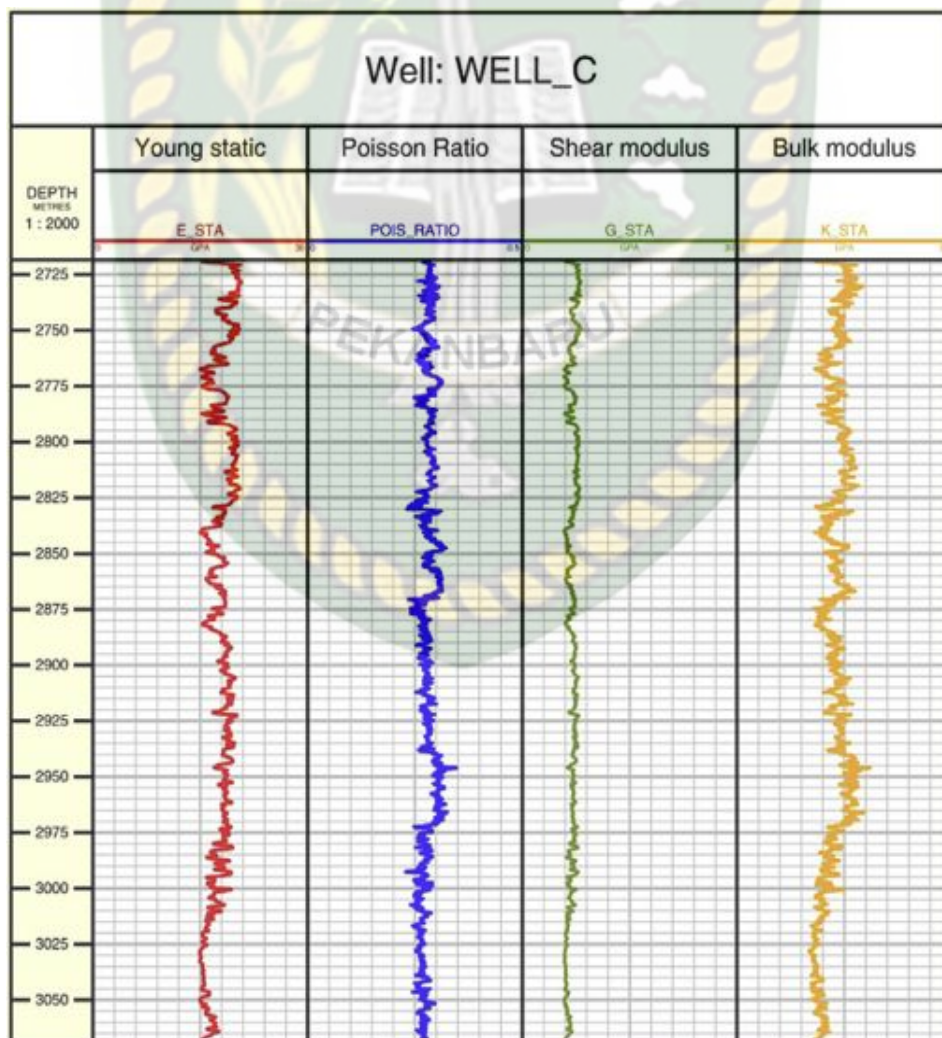
$$G_{dyn} = \frac{\rho_b}{(\Delta t_s)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$K_{dyn} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \dots\dots\dots (2)$$

$$E_{dyn} = 2G(1 + \nu) \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{\frac{1}{2}(\Delta t_s/\Delta t_c)^2 - 1}{(\Delta t_s/\Delta t_c)^2 - 1} \dots\dots\dots (4)$$

Plona (1995); TerraTek Inc (1988) Bagaimanapun, *dynamic properties* secara sistematis berbeda dari nilai *equivalent static* yang biasanya dibutuhkan pada *geomechanics modeling* berikutnya dan *stress analysis*, dengan *dynamic young's moduli* sering menjadi 2 sampai 3 kali lebih besar dari pada *equivalent static young's moduli*. (Rafieepour, & Jalatifar, 2014, p. 1416)



Gambar 2.3 Estimasi *Elastic Modulus* Pada Sumur C (Javani et al., 2017)

2.1.4 Rock Strength

Fjaer et al., (1992) *Rock strength* didefinisikan sebagai jumlah muatan suatu sample batuan yang dapat bertahan. *Uniaxial (unconfined) compressive strength* (UCS) berhubungan terhadap *strength* dari sampel yang diuji pada *failure* dengan tekanan yang dibatasi. UCS biasanya dihitung menggunakan hubungan empiris yang berasal dari data log dan tes laboratorium pada *cores*. (Chardac, Murray, Carnegie, & Marsden, p. 2)

untuk mengestimasi *unconfined compressive strength* pada *sandstone* dan *shale* dari data log digunakan persamaan berikut: (Setiawan, & Bahuguna, 2011)

$$UCS\ shale = 72,5 * (204,8 / \log dtco)^3 \dots\dots\dots (5)$$

$$UCS\ sand = 2,05 * 10^9 * \log dtco^{-3} \dots\dots\dots (6)$$

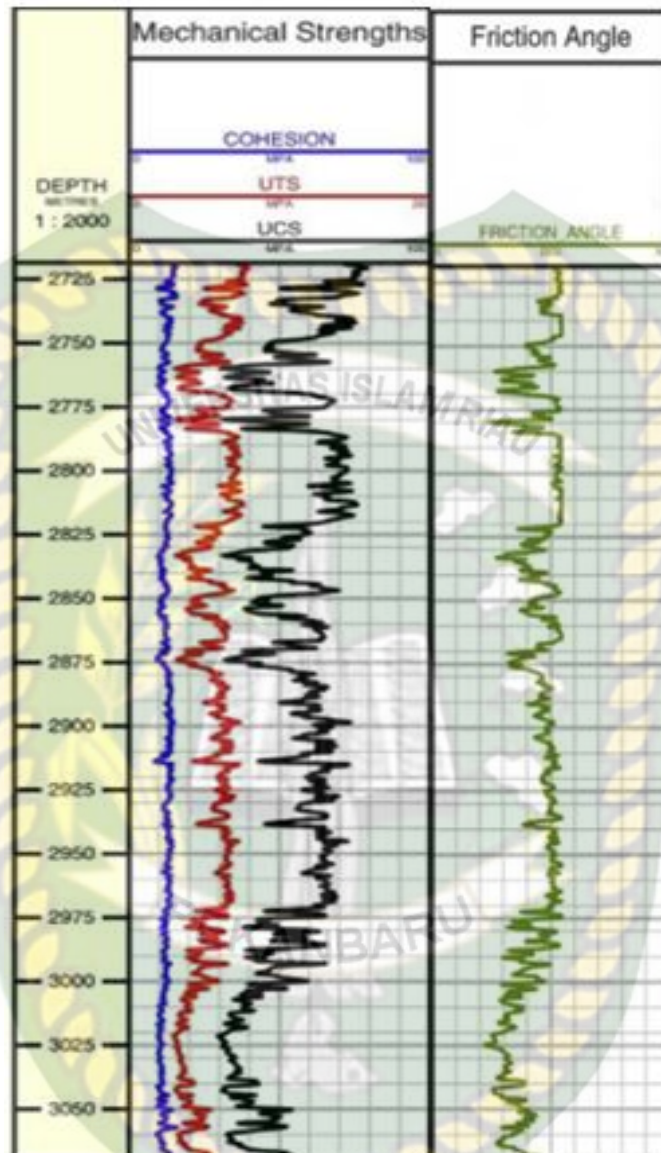
Tensile strength dari formasi digunakan untuk mengevaluasi *tensile failure* dari lubang bor karena *stress concentration*. *Tensile strength* dari sebuah batuan biasanya berkisar 1/12 hingga 1/8 dari UCS. (Rafieepour, & Jalalifar, 2014)

Colmenares, & Zoback, (2002) *Internal friction angle* merupakan parameter *strength* lainnya yang dibutuhkan untuk mengestimasi *rock strength* pada kedalaman. Meskipun banyak perbedaan *failure criteria* yang telah diusulkan untuk menggambarkan *rock strength* dalam perbedaan kondisi *stress* berdasarkan pada perbedaan jenis laboratorium (yaitu *uniaxial*, *triaxial* dan *polyaxial test*). (Chang, Zoback, & Khaksar, 2006, p. 231)

Persamaan empiris dalam menentukan *Internal Friction Angle* (Φ) dengan menggunakan persamaan Lal (1999) adalah sebagai berikut : (Chang, Zoback, & Khaksar, 2006, p. 233)

$$(\Phi) = \sin^{-1} \left(\frac{V_p - 1000}{V_p + 1000} \right) \dots\dots\dots (7)$$

Pada studi ini *tensile strength* diasumsikan 1/10 dari UCS, gambar 2.4 menunjukkan profil estimasi *mechanical properties* yaitu *rock strength*. (Javani et al., 2017)



Gambar 2.4 Estimasi *Mechanical Properties* Pada Sumur C (Javani et al., 2017)

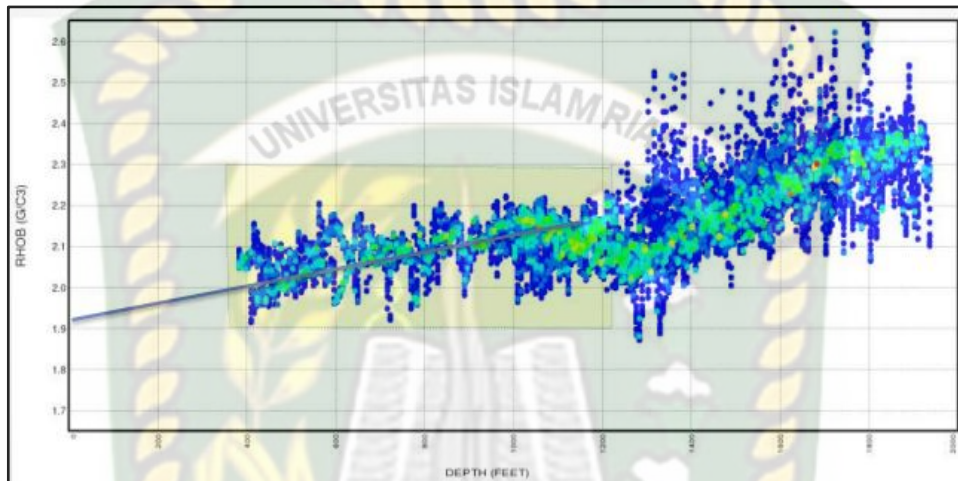
2.1.5 Overburden Stress

Overburden stress adalah *stress* yang disebabkan oleh adanya tumpukan batuan pada suatu titik dibawah permukaan. *Overburden stress* sering disebut *vertical stress*. (Hudaya, 2009)

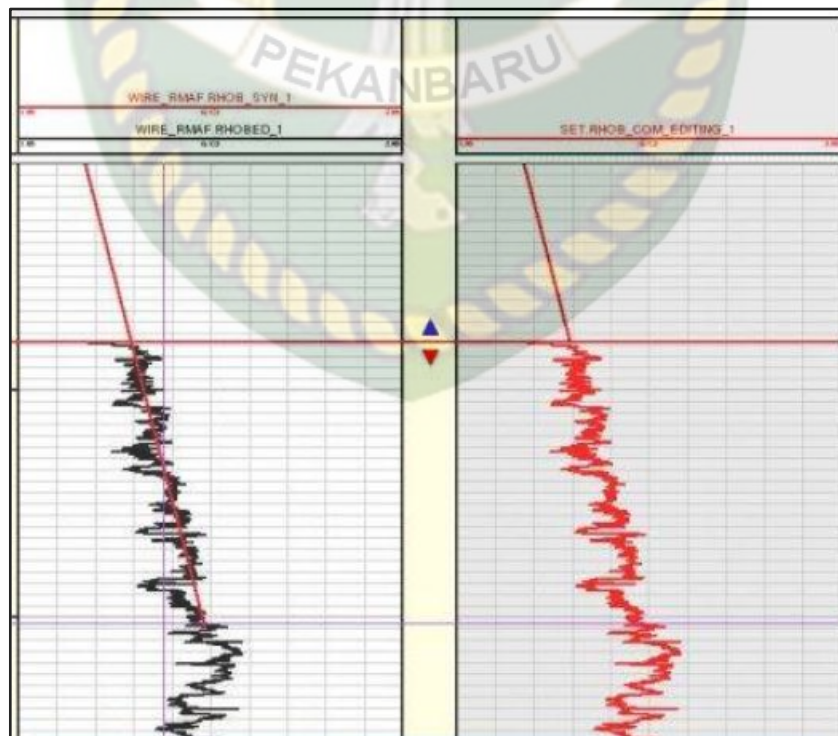
Vertical stress dihitung dengan dengan mengintegrasikan *formation density* bulk ρ_b dari *surface* ke TD menggunakan persamaan berikut. (Rafieepour, & Jalalifar, 2014)

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz = \bar{\rho} g z \dots\dots\dots (8)$$

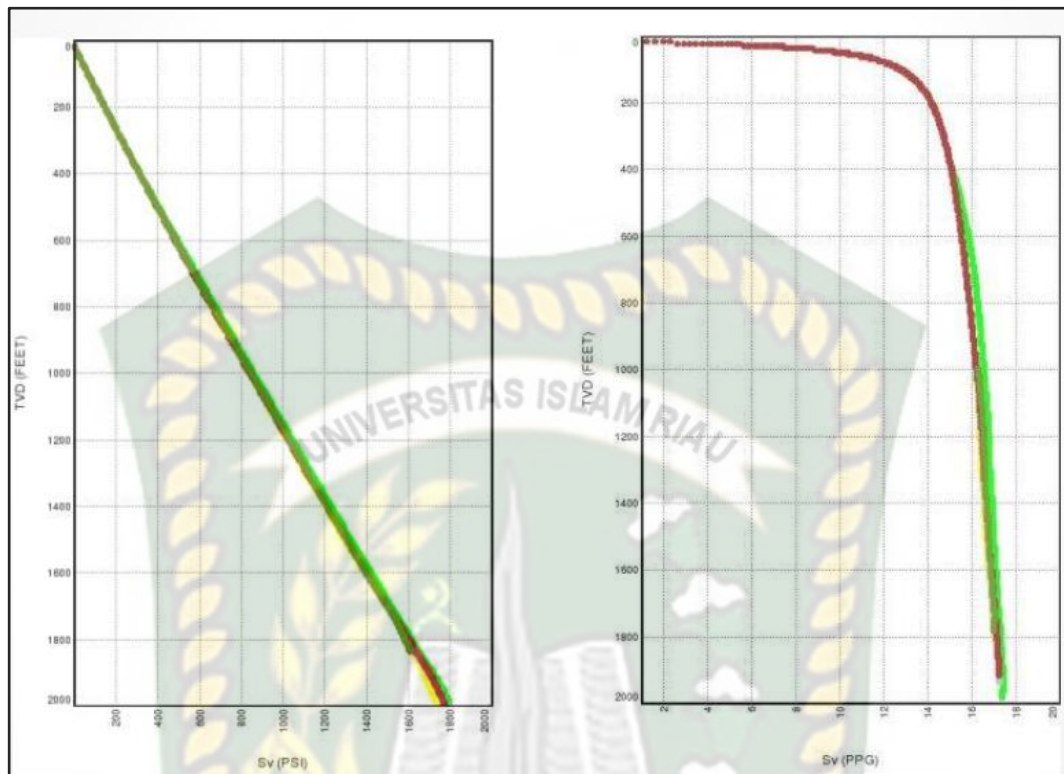
Pada lapangan bangko, data rhob yang tersedia mulai dari kedalaman 400 ft TVD. Oleh karena itu, nilai rhob pada *surface* hingga kedalaman 400 ft di estimasi berdasarkan pada *linear regression* dari *trend log density*, gambar 2.5 dan nilai rhob dari *linear regression* dikombinasikan, gambar 2.6 dan digunakan untuk menghitung *overburden stress*, gambar 2.7. (Darajat, 2016)



Gambar 2.5 *Linear Regression* Dari Log Density (Darajat, 2016)



Gambar 2.6 Kombinasi Log Rhob *Regression* Terhadap Data Log Rhob yang Tersedia (Darajat, 2016)



Gambar 2.7 Perhitungan Overburden Stress Lapangan Bangko (Darajat, 2016)

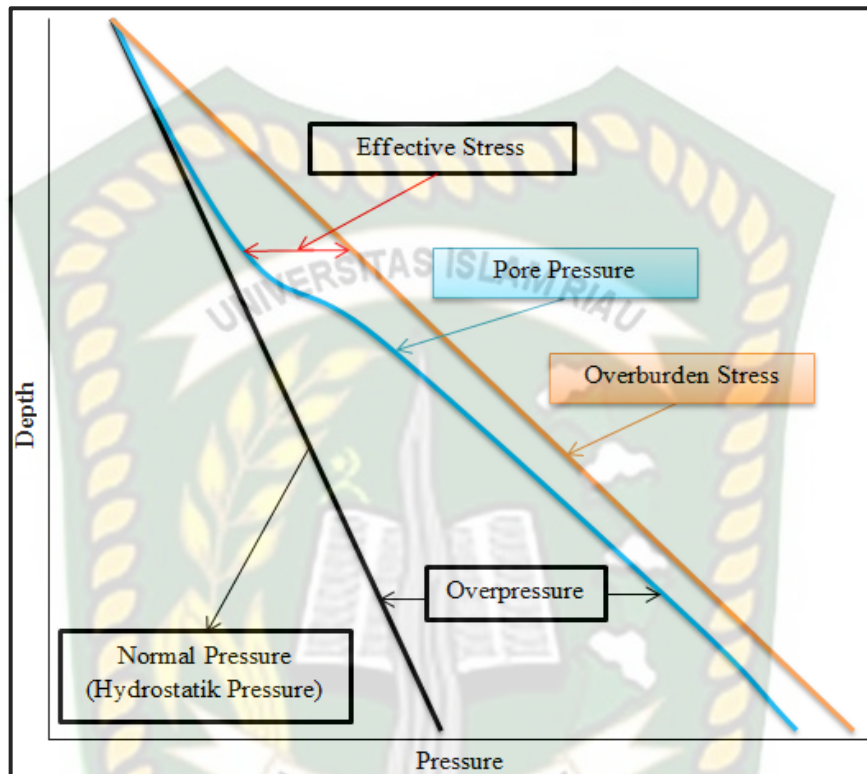
2.1.6 Pore Pressure

Pore pressure merupakan komponen yang penting dalam *mechanical earth model* terhadap perhitungan *horizontal stresses*, *wellbore stability analysis* dan aplikasi *geomechanics* lainnya. Log sonic dan log resistivity bisa digunakan untuk mengidentifikasi *pore pressure trends* yang dapat digunakan untuk mengestimasi *pore pressure*. *Pore pressure* yang dikalkulasi perlu dikalibrasi oleh data *pore pressure*. (Knoll, 2016)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8, pertama, besarnya tekanan pori yang melampaui garis *hydrostatic* disebut *overpressure*. Kedua, adalah *effective stress* yang merupakan selisih antara tekanan *overburden* dan tekanan pori. (Berry, & Utama, 2009)

Konsep lain dalam gambar 2.8 melepaskan fluida dan tekanan. Ketika tekanan pori normal, tekanan efektif meningkat dengan kedalaman. Hal ini ditunjukkan oleh log *sonic*, *density* dan *resistivity* pada formasi dengan tekanan normal yang meningkat terhadap kedalaman. Variasi sifat batuan di bawah

kondisi tekanan normal disebut *normal compaction trend*. (Berry, & Utama, 2009)



Gambar 2.8 Diagram Tekanan Terhadap Kedalaman Sebuah Sumur (Berry, & Utama, 2009)

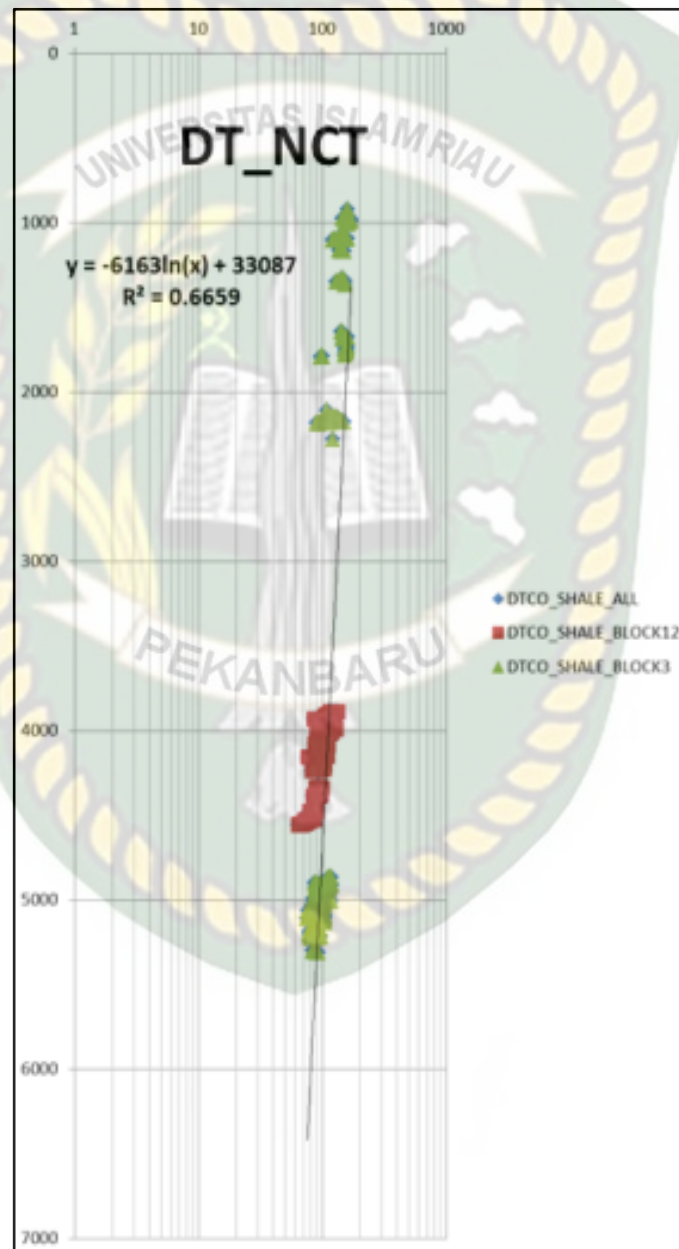
Eaton memprediksi *pore pressure* berdasarkan pada data log resistivity dan log sonic (Najibi, Ghafoori, Lashkaripour, & Aset, 2016). Yang diberikan oleh persamaan berikut :

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{pn}) \left(\frac{NCT}{DT} \right)^\alpha \dots\dots\dots (9)$$

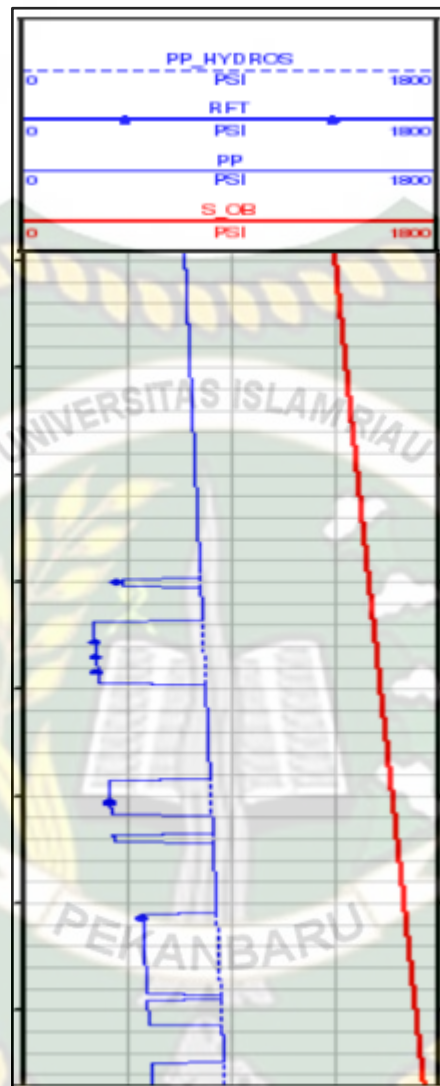
dimana P_{pg} dan OBG adalah *pore pressure gradient* dan *overburden stress*, P_{pn} adalah *hydrostatic pressure gradient*, NCT adalah *normal compacted trend line*, dan DT adalah *P-wave transit time* dan Juga, α adalah *eaton's alpha exponent*.

Sebelum menghitung *pore pressure*, *normal compaction trend* pada area tersebut ditentukan menggunakan data sonic log dalam interval shale. Nilai V_{shale} 0,6 digunakan untuk memisahkan sand dan shale dalam lapangan petapahan, kemudian sonic log pada interval shale di plot terhadap kedalaman,

seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9, dan nilai NCT tersebut digunakan sebagai input ke dalam perhitungan *pore pressure*, lalu *pore pressure* yang telah didapatkan dikalibrasi terhadap data *repeat formation test*, gambar 2.10 menunjukkan profil dari *pore pressure* pada lapangan petapahan (Setiawan, & Vera, 2016)



Gambar 2.9 Kurva *Normal Compaction Trend Shale* Lapangan Petapahan dari Data Log Sonic (Setiawan, & Vera, 2016)



Gambar 2.10 Profil Pore Pressure Lapangan Petapahan (Setiawan, & Vera, 2016)

2.1.7 Horizontal Stress Magnitudes

Dalam sebuah *isotropic* dan *tectonically area*, *minimum* dan *maximum horizontal stresses* adalah sama. Biasanya *horizontal stresses* tidak sama dengan patahan utama atau tektonik yang aktif. Dari kedua *stresses*, *minimum horizontal stress* lebih mudah untuk ditentukan dan pengukuran lebih tepat, dengan akurasi yang masuk akal yang dapat diperoleh. *Maximum horizontal stress* dapat lebih sulit untuk ditentukan. Karena pengukuran langsung tidak tersedia, kami hanya dapat memperkirakan ukuran dari modeling. (Rasouli, Pallikathekathil, & Mawuli, 2011)

Matthesws and kelly (1967) memperkenalkan variable dari “*matrix stress coefficient* (k_1),” yang *equivalent* terhadap *effetive stress coefficient*, untuk menghitung *fracture gradient* (*minimum horizontal stress*) dari *sedimentary formations*. (Jincai, & Xian Yin, 2017)

$$FG = k_1(OBG - P_p) + P_p \dots\dots\dots(10)$$

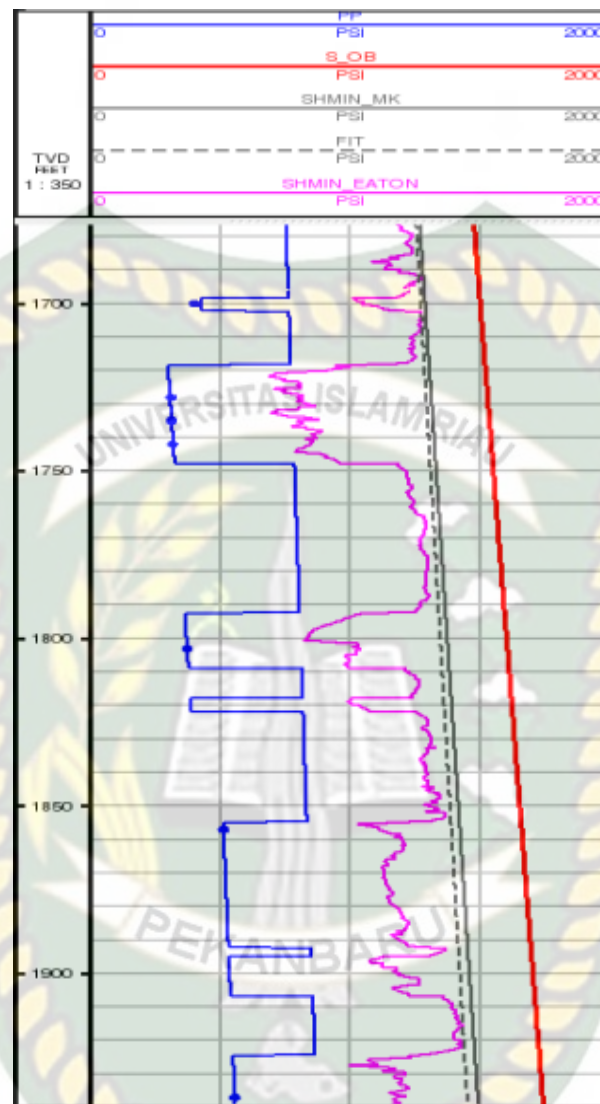
dimana OBG adalah *overburden stress gradient*, P_{pg} adalah *pore pressure gradient* dan k_1 adalah *matrix stress* atau *effective stress coefficient*.

Eaton (1969) menggunakan *poisson's ratio* untuk menghitung *fracture gradient* berdasarkan pada konsep *minimum injection pressure* yang diusulkan oleh Hubbert dan Willis (1957). (Jincai, & Xian Yin, 2017)

$$FG = \frac{v}{1-v}(OBG - P_p) + P_p \dots\dots\dots(11)$$

dimana v adalah *poisson's ratio*, yang diperoleh dari *compressional* dan *shear velocities* (v_p dan v_s).

pada lapangan bangko perhitungan *minimum horizontal stress* menggunakan metode eaton dan matthew & kelly, metode eaton digunakan untuk mengestimasi Shmin lithologi sand dan shale, metode matthew & kelly digunakan untuk mengestimasi lithlogi shale, yang mana nilai *matrix stress coefficient* (k_1) disesuaikan terhadap shale pada metode eaton. Gambar 2.11 merupakan profil *minimum horizontal stress* lapangan bangko menggunakan metode eaton dan matthew & kelly. (Darajat, 2016)



Gambar 2.11 Profil *Minimum Horizontal Stress* Lapangan Bangko (Darajat, 2016)

tidak ada metode yang tersedia untuk mengukur langsung besarnya *maximum horizontal stress*. Metode yang sering digunakan untuk memperoleh ukuran *maximum horizontal stress* adalah melalui *inversion* atau kalibrasi dari *borehole failure* seperti *breakouts*, *washouts*, *drilling-induced fractures* dan *drilling problems*. (Yi, Goodman, Williams, & Hilarides, 2008)

kalibrasi *borehole enlargements* dengan membandingkan perbedaan antara *collapse mud weight* dan *mud weight* yang digunakan selama pemboran mengindikasikan bahwa adanya perbedaan antara *minimum* dan *maximum horizontal stress*. Menggunakan sebuah perbandingan σ_H/σ_h dengan nilai 1,05

menghasilkan sebuah kalibrasi yang konsisten. (Yi, Goodman, Williams, & Hilarides, 2008)

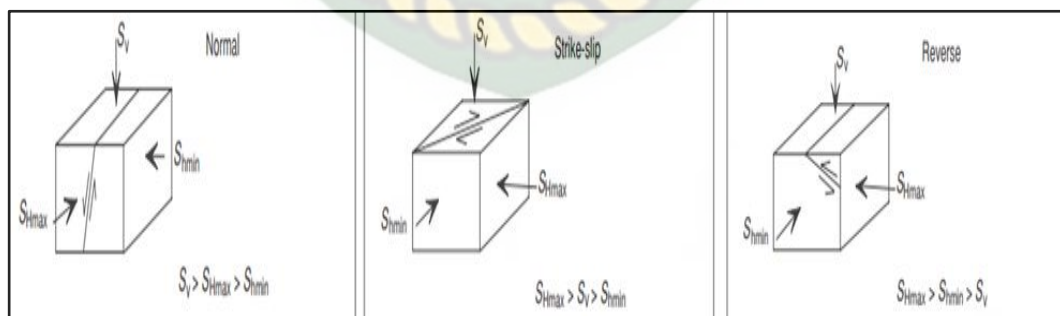
2.2 RELATIVE STRESS MAGNITUDES

Dalam penerapan konsep *earth's crust*, itu akan membantu untuk mempertimbangkan ukuran dari *greatest*, *intermediate* dan *principal stress* pada kedalaman (S_1 , S_2 , dan S_3 ,) disebut juga S_v , S_{Hmax} , dan S_{Hmin} yang diusulkan oleh E. M. Anderson. Anderson *classification schema* juga menentukan *horizontal principal stress magnitudes* dengan *respect* terhadap *vertical stress*. *Vertical stress* adalah *maximum principal stress* (S_1) pada *normal faulting regimes*, *intermediate principal stress* (S_2) pada *strike-slip regimes* dan *least principal stress* (S_3) pada *reverse faulting regimes*. (Zoback, 2007)

Tabel 2.5 Ukuran *Relative Stress* Dan *Rezim Patahan*

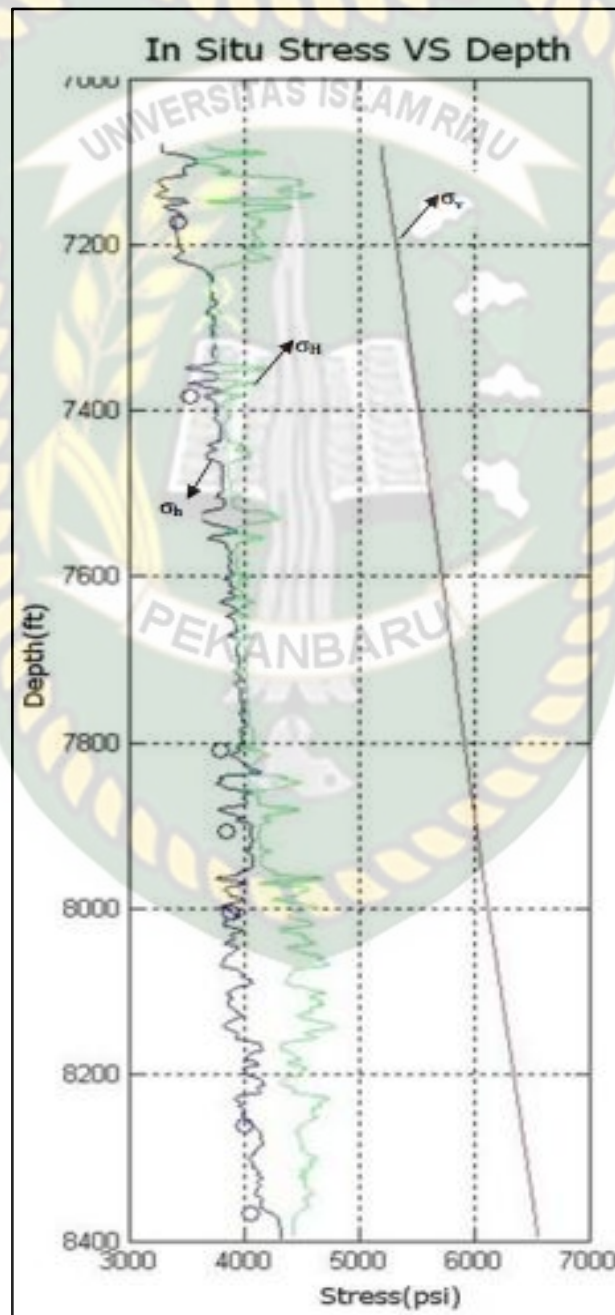
Regime	Stress		
	S_1	S_2	S_3
Normal	S_v	S_{Hmax}	S_{Hmin}
Strike-slip	S_{Hmax}	S_v	S_{Hmin}
Reverse	S_{Hmax}	S_{Hmin}	S_v

Sumber: Zoback (2007)



Gambar 2.12 Klasifikasi Patahan Menurut Anderson Berdasarkan *Principal Stress* (Zoback, 2007)

Horizontal stress bisa dikalibrasi terhadap *leak off test* dan *mud loss* data, terutama pada *fractured formations* dimana tekanan *mud loss* sama dengan *minimum horizontal stress*, yang akan digambarkan dengan nilai *strains* yang konstan. Profil dari *in-situ stress* ditunjukkan pada gambar 2.13 (Perchikolaee et al., 2010)



Gambar 2.13 Profil In-Situ Stress (Perchikolaee et al., 2010)

2.3 ROCK FAILURE

Secara sederhana *rock failure* pada *compression* terjadi ketika *stress* pada batuan melebihi *compressive strength*. *Compressive rock failure* melibatkan semua *stress* yang bertindak pada batuan (termasuk *pore pressure*). *Rock strength* biasanya adalah nilai dari *maximum principal stress* dimana sebuah *sample* kehilangan kemampuan untuk menunjang penerapan *stress*. Pada umumnya untuk menyajikan hasil dari pengujian *strength* menggunakan *Mohr circles* dan *Mohr failure envelopes*. (Zoback, 2007)

Dasar pembentukan Mohr circle adalah bahwa hal ini memungkinkan untuk mengevaluasi grafik dari *shear stress* (τ_f) dan *effective normal stress* ($\sigma_n = S_n - P_p$) pada patahan yang terbentuk selama proses *failure* dalam hal penerapan *principal stress* σ_1 dan σ_3 . (Zoback, 2007)

$$\tau_f = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \dots\dots\dots (12)$$

$$S_n = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3) + 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \dots\dots\dots (13)$$

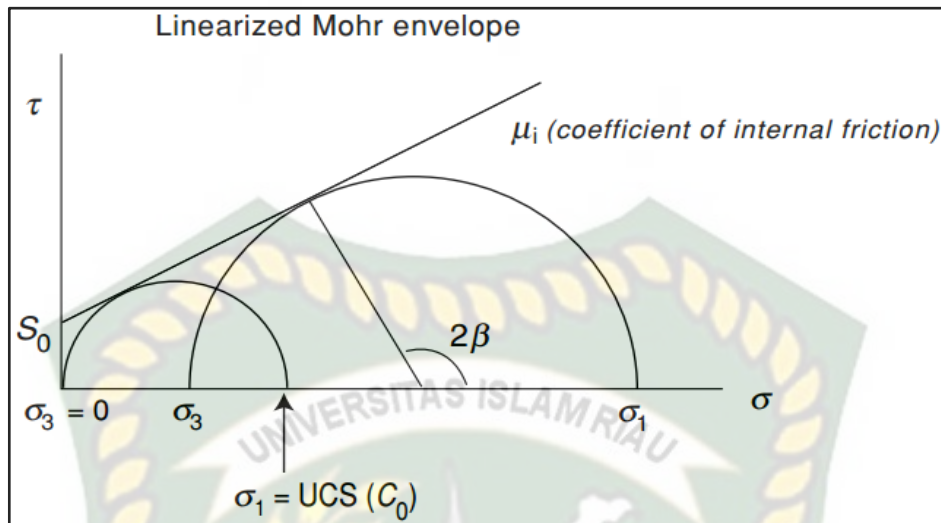
Dimana β adalah sudut antara fault normal dan σ_1

Garis *linear Mohr failure* bisa menggambarkan *intercept* ketika $\sigma_3 = 0$ yang disebut juga sebagai *cohesive strength (cohesion)*, S_0 , umumnya dalam *soil mechanics*. Garis *linearized Mohr failure* dapat ditulis sebagai :

$$\tau = C_0 + \sigma_n \mu_i \dots\dots\dots (14)$$

Cohesion bukan parameter *physically*, hal ini umumnya untuk menyatakan *rock strength* (C_0). hubungan antara S_0 dan C_0 adalah :

$$C_0 = 2S_0[(\mu_1^2 + 1)^{1/2} + \mu_i] \dots\dots\dots (15)$$



Gambar 2.14 Linear Mohr Failure Envelope (Zoback, 2007)

Coefficient of sliding friction (μ) bisa diperoleh dari persamaan 16. (Hubbert, & Rubey, 1959)

$$\mu = \tan (FANG) \dots\dots\dots (16)$$

Friction experiment pertama kali dikeluarkan oleh Leonardo da Vinci. Da Vinci menemukan bahwa *frictional sliding* pada *plane* akan terjadi ketika *ratio shear* terhadap *normal stress* mencapai sebuah properti dari material, μ , *coefficient of friction*, hal ini dikenal sebagai *Amontons law*. (Zoback, 2007)

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \mu \dots\dots\dots (17)$$

Penting untuk diingat bahwa μ pada persamaan 17 menggambarkan *slip* pada *pre-existing fault* dimana μ adalah gambaran mengenai meningkatnya strength dari intact rock dengan pressure (yaitu *slope* dari *failure* pada *mohr diagram*). (Zoback, 2007)

τ adalah *shear stress* yang menggambarkan *sliding plane*. *Effective normal stress* (σ_n) didefinisikan sebagai $(S_n - P_p)$, dimana S_n adalah *normal stress* dan P_p adalah *pore pressure*. Dengan demikian meningkatnya *pore pressure* pada sebuah *fault* (melalui fluida injeksi) bisa menyebabkan *fault slip* dengan berkurangnya *effective normal stress*. (Hubbert, & Rubey, 1959)

Fault dan *fracture* dapat ditentukan dengan menggunakan *coulomb failure function* (CFF), yang pada dasarnya merupakan perbedaan antara *shear stress* dan

effective normal stress (normal stress dikurang pore pressure). Jika coulomb failure function pada sebuah fault atau fracture nilainya positif (berarti shear stress lebih besar dari normal stress), maka besar kemungkinan bahwa patahan tersebut akan meloloskan atau menjadi sebuah saluran pada aliran fluida (Jaeger, & Cook, 2007).

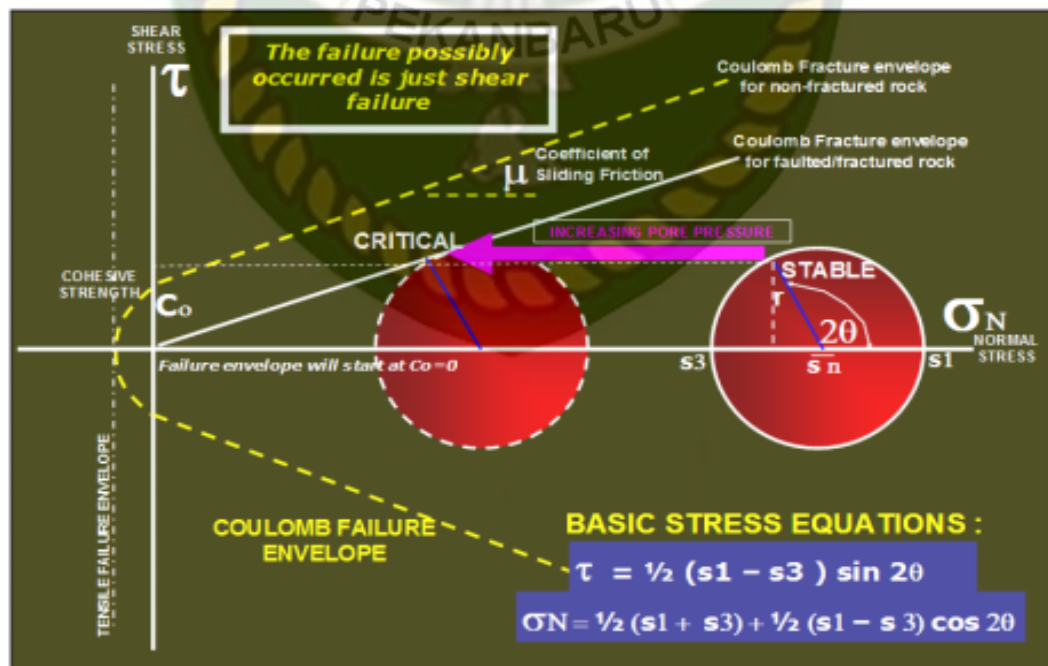
Coulomb failure criterion menyatakan bahwa sebuah fault merupakan critical stress (slip) ketika CFF positif. (Adlan, 2012)

$$CFF = \tau - \mu(S_n - P_p) \geq 0 \quad (18)$$

Coulomb failure criterion dapat juga dipecah untuk pore pressure (disebut juga critical pore pressure, P_{pcrit}) dimana fault akan mulai slip. (Adlan, 2012)

$$P_{pcrit} = \mu * S_n - \tau / \mu \quad (19)$$

Perhitungan P_{pcrit} dan CFF memanfaatkan sebuah koefisien dari sliding friction 0,5. Itu memungkinkan hydraulic fracture fault yang sub-paralel terhadap arah maksimum horizontal stress jika tekanan memasuki fault melebihi normal stress. (Adlan, 2012)



Gambar 2.15 Ilustrasi Mohr Diagram Rock Failure karena Meningkatnya Tekanan Reservoir pada Intact Rock (Cap Rock) dan Faulted/Fractured Rock (Setiawan, & Vera, 2016)