

SKRIPSI

**ANALISIS GEOMEKANIKA BATUAN BERDASARKAN *ID
MECHANICAL EARTH MODEL* SUMUR B LAPANGAN X
CEKUNGAN TARAKAN PROVINSI KALIMANTAN UTARA**

Disusun dan diajukan oleh

**REINAL ARSANDY TANDIRERUNG
D061 18 1307**



**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS GEOMEKANIKA BATUAN BERDASARKAN *ID MECHANICAL EARTH MODEL* SUMUR B LAPANGAN X CEKUNGAN TARAKAN PROVINSI KALIMANTAN UTARA

Disusun dan diajukan oleh

REINAL ARSANDY TANDIRERUNG
D061 18 1307

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 28 Juli 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr.Eng. Hendra Pachri, S.T., M. Eng.
NIP 197712142005011002

Dr. Ir. Busthan Azikin, M.T.
NIP 195910081987031001

Ketua Program Studi,

Dr.Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng.
NIP 197712142005011002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Reinal Arsandy Tandirerung
NIM : D061 18 1307
Program Studi : Teknik Geologi
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Geomekanika Batuan Berdasarkan ID *Mechanical Earth Model* Sumur
B Lapangan X Cekungan Tarakan Provinsi Kalimantan Utara}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 8 Agustus 2023

Yang Menyatakan

Reinal Arsandy Tandirerung

ABSTRAK

REINAL ARSANDY TANDIRERUNG. *Analisis Geomekanika Batuan Berdasarkan 1D Mechanical Earth Model Sumur B Lapangan X Cekungan Tarakan Provinsi Kalimantan Utara* (dibimbing oleh Hendra Pachri dan Busthan Azikin)

Analisis geomekanika sangat berguna dalam mengetahui kestabilan lubang sumur untuk mencegah resiko yang bisa terjadi pada saat proses pemboran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui log bor sumur B lapangan X berdasarkan *wireline logging*, membuat model geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model*, menentukan kestabilan sumur berdasarkan model *wellbore failure* serta korelasi keterkaitan model *wellbore failure* dengan aspek geomekanika. Penelitian ini dilakukan dengan metode perhitungan dinamis dengan formula rumus menggunakan data *wireline log* berupa log *gamma ray*, log *sonic*, log densitas, log porositas, *mud log* dan laporan akhir hasil pemboran yang kemudian diolah menggunakan aplikasi Microsoft Excel dan Techlog. Hasil analisis log menunjukkan jenis batuan berdasarkan tingkat radioaktivitasnya, kepadatan/kekerasan batuan berdasarkan kecepatan gelombang, serta memberikan informasi tentang kepadatan batuan berdasarkan densitas, tingkat porositas batuan serta sifat-sifat mekanik batuan. Hasil analisis geomekanika dan tegangan bawah permukaan adalah nilai mekanik yang bervariasi pada masing-masing litologi serta besarnya tegangan insitu yaitu $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ atau berada pada rezim sesar normal. Berdasarkan model *wellbore failure* pada zona *safe mud weight window* berat lumpur yang aman digunakan adalah 1.13-1.3 SG. Parameter geomekanik seperti modulus young, *friction angle*, *poisson's ratio*, UCS, dan *tensile strength* mempengaruhi perilaku dan respon mekanik batuan selain itu tegangan insitu (S_{Hmax} , S_{Hmin} , S_v dan tekanan pori) dan berat lumpur pemboran juga berperan dalam terjadinya *wellbore failure*.

Kata Kunci : *Geomekanika, wireline logging, mechanical earth model, wellbore failure.*

ABSTRACT

REINAL ARSANDY TANDIRERUNG. *Rock Geomechanics Analysis Based on 1D Mechanical Earth Model Well B Field X Tarakan Basin North Kalimantan Province (supervised by Hendra Pachri and Busthan Azikin)*

Geomechanical analysis is very useful in determining the stability of the wellbore to prevent risks that can occur during the drilling process. The aims of this research are to determine the drill log of well B field X based on wireline logging, create a rock geomechanical model based on a 1D mechanical earth model, determine the stability of the well based on the wellbore failure model and correlate the linkage of the wellbore failure model with geomechanical aspects. This research was conducted using the dynamic calculation method with formulas using wireline log data in the form of gamma ray logs, sonic logs, density logs, porosity logs, mud logs and final drilling results reports which were then processed using Microsoft Excel and Techlog applications. The results of log analysis show the type of rock based on its level of radioactivity, rock density/hardness based on wave speed, and providing information about rock density based on density, rock porosity level and rock mechanical properties. The results of geomechanical analysis and subsurface stress are mechanical values that vary in each lithology and the amount of insitu stress is $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ or is in the normal fault regime. Based on the wellbore failure model in the safe mud weight window zone, the mud weight that is safe to use is 1.13-1.3 SG. Geomechanical parameters such as young's modulus, friction angle, Poisson's ratio, UCS, and tensile strength affect the behavior and mechanical response of the rock. In addition, in-situ stress (S_{Hmax} , S_{Hmin} , S_v and pore pressure) and drilling mud weight also play a role in the occurrence of wellbore failure.

Keywords: *Geomechanics, wireline logging, mechanical earth model, wellbore failure.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Maksud dan Tujuan	2
1.4 Batasan masalah	3
1.5 Lokasi dan Kesampaian Daerah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian	5
2.1.1 Geomorfologi Regional.....	5
2.1.2 Stratigrafi Regional	5
2.1.3 Struktur Geologi Regional	8
2.2 Konsep dan Definisi Geomekanik.....	10
2.3 1D Mechanical Earth Model (1D MEM)	10
2.4 Tegangan In Situ	12
2.4.1 Tegangan Overburden/Vertikal.....	12
2.4.2 Tegangan Horizontal	12
2.5 Tekanan Hidrostatik	15
2.6 Tekanan Pori	16
2.7 Tekanan Rekah.....	16
2.8 Parameter Mekanik	17
2.8.1 Modulus Young.....	17

2.8.2	<i>Poisson's Ratio</i>	18
2.8.3	<i>Friction Angles</i>	18
2.8.4	Volume Shale	18
2.8.5	Unconfined <i>Compressive Strength</i> (UCS)	19
2.8.6	<i>Tensile Strength</i>	19
2.9	Overpressure.....	20
2.10	Kestabilan Sumur	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		26
3.1	Metode Penelitian.....	26
3.2	Tahapan Penelitian	26
3.2.1	Tahap <i>Persiapan</i>	26
3.2.2	Tahap Pengumpulan Data	26
3.2.3	Tahap Pengolahan Data.....	29
3.2.4	Tahap Penyusunan Skripsi	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Log Bor Berdasarkan <i>Wireline Logging</i>	32
4.2	Pemodelan Geomekanika Batuan Berdasarkan <i>1D Mechanical Earth Model</i>	38
4.3	Kestabilan Sumur Berdasarkan <i>Wellbore Failure</i>	47
4.4	Korelasi Model <i>Wellbore Failure</i> Dengan Aspek Geomekanika	53
BAB V PENUTUP.....		56
5.1.	Kesimpulan.....	56
5.2.	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA		58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Peta Tunjuk Lokasi Penelitian	4
Gambar 2	Cekungan Tarakan dibagi menjadi empat sub-cekungan yaitu Sub-Cekungan Tidung, Tarakan, Berau, dan Muara (Achmad dan Samuel, 1984).....	6
Gambar 3	Peta geologi regional daerah penelitian (Hidayat dkk, 2011	7
Gambar 4	Struktur geologi regional Cekungan Tarakan menurut Lentini dan Darman (1996)	9
Gambar 5	Tampilan log vertikal 1D <i>mechanical earth model</i> (Berard & Priou, 2016).....	11
Gambar 6	Distribusi tegangan pada sumur vertikal (Darvishpour et al., 2019).....	14
Gambar 7	Skema klasifikasi E.M Anderson untuk besaran tegangan relatif pada sesar normal, strike-slip dan sesar turun (Zoback, 2007)	15
Gambar 8	Mekanisme terjadinya <i>overpressure</i> (Ramdhan, 2010)	20
Gambar 9	Konsep jendela berat lumpur yang aman untuk pengeboran pada model <i>wellbore failure</i> (Le & Rasouli, 2012)	22
Gambar 10	<i>Loss circulation</i> (Azar, 2007).....	22
Gambar 11	Ilustrasi terjadinya <i>kick</i> (Azar, 2007)	23
Gambar 12	(a) <i>Borehole breakout</i> (b) <i>Borehole fracture</i> (yang diambil menggunakan downhole camera) (Asquith & Krygowski, 2004). 24	
Gambar 13	Skema representatif dari lubang bor vertikal dari inisiasi <i>fracture</i> hingga <i>breakdown</i> (Zhang, 2019)	25
Gambar 14	Mekanisme pengambilan data <i>mud log</i>	27
Gambar 15	Mekanisme pengambilan data log sumur menggunakan metode <i>wireline log</i>	28
Gambar 16	Mekanisme <i>leak off test</i>	29
Gambar 17	<i>Flow chart</i> penelitian	31
Gambar 18	Log bor sumur B berdasarkan <i>wireline logging</i>	32
Gambar 19	Log geomekanika batuan berdasarkan 1D <i>mechanical earth model</i>	38
Gambar 20	Grafik penyebaran nilai mekanik vs kedalaman yang memperlihatkan nilai mekanik yang bervariasi	45
Gambar 21	Model <i>wellbore failure</i> sumur B	47
Gambar 22	Log model geomekanika batuan berdasarkan 1D <i>mechanical earth model</i> dan <i>wellbore failure</i>	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Besar tegangan relatif dan rezim sesar (Zoback, 2007).....	14
Tabel 2	Penyebab ketidakstabilan sumur (Passic et al., 2007)	21
Tabel 3	Nilai log bor sumur B berdasarkan <i>wireline logging</i> pada setiap kedalaman 50 meter	34
Tabel 4	Nilai geomekanika batuan berdasarkan 1D <i>mechanical earth model</i> setiap kedalaman 50 meter	40
Tabel 5	Nilai <i>wellbore failure</i> sumur B pada setiap kedalaman 50 meter	49

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
φ	<i>Friction angle</i>
Δ_{tn}	Waktu interval sonik pada saat terjadi kompaksi normal
Δ_{to}	Waktu interval sonik terukur (μ/f)
Δ_{tx}	Shear Sonic
Δ_{tp}	Compressional Sonic
Δ_{ts}	Shear Sonic
$\mu\text{sec/ft}$	<i>Micro second per feet</i>
1D	<i>One Dimension</i>
α	Koefisien Biot
ρ	Densitas
BOP	<i>Blow out preventer</i>
BSB	Berat satuan batuan
E	Modulus Young
ECD	<i>Equivalent circulating density</i>
E_s	Modulus Young statis
E_d	Modulus Young dinamis
FIT	<i>Formation Integrity Test</i>
GPa	Gigapascal
gr/cm^3	Satuan massa jenis dalam system CGS
GR_{\log}	<i>Log gamma ray</i>
GR_{\max}	<i>Log gamma ray maksimum</i>
GR_{\min}	<i>Log gamma ray minimum</i>
LOT	<i>Leak off Test</i>
MPa	Mega Pascal
MWI	Berat lumpur (<i>Mud weight</i>)
N	<i>Friction Number</i>
P_h	Tekanan Hidrostatik
P_p	Tekanan Pori

Psi	Unit satuan tekanan
P_{WBO}	<i>Breakout</i>
P_{WBD}	<i>Breakdown</i>
SG	Gradien tekanan (<i>Specific gravity</i>)
SHmax	Tegangan horizontal maksimum
Shmin	Tegangan horizontal minimum
Sv	Tegangan Vertikal/ <i>overburden</i>
T_0	<i>Tensile Strength</i>
TVD	<i>True Vertical Depth</i>
UCS	<i>Unconfined Compressive Strength</i>
ν	<i>Poisson's Ratio</i>
ν_s	<i>Poisson's Ratio</i> statis
V_{shale}	<i>Volume shale</i>
ν_d	<i>Poisson's Ratio</i> dinamis
Z	Kedalaman

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan amanat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyusun Tugas Akhir yang berjudul *“Analisis Geomekanika Batuan Berdasarkan 1D Mechanical Earth Model Sumur B Lapangan X Cekungan Tarakan, Provinsi Kalimantan Timur”*. Penulisan laporan ini merupakan salah satu tahap dalam penyusunan Tugas Akhir yang dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan laporan ini, saya banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak yang berperan penting selama penyusunan ini. Pada kesempatan ini, tak lupa saya ucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak, di antaranya:

1. Bapak Dr.Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng. sebagai Dosen Pembimbing Utama, Dosen Pembimbing Akademik sekaligus sebagai Ketua Program Studi S1 Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah meluangkan waktu serta memberikan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Busthan Azikin, M.T. sebagai Dosen Pembimbing Pendamping yang telah meluangkan waktu serta memberikan bimbingan dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Ir. Hj. Ratna Husain L, M.T. dan Bapak Dr. Sultan, S.T., M.T. sebagai dosen penguji yang memberikan masukan kepada penulis untuk penyusunan skripsi.
4. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bimbingannya selama ini
5. Bapak Edwin Harris P. Siahaan selaku Manajer Well Operation, Petrophysics & Data Management PT. Pertaamina Hulu Kalimantan Timur.
6. Bapak Bobby Mazmur Sihole selaku Senior Geophysicist PT. Pertamina Hulu Kalimantan Timur dan pembimbing magang yang telah membimbing dan mengarahkan selama magang.
7. Dian Ponco, Arnoman, Aldion, Remil, Margion, Anggi, Sem dan There yang telah banyak membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini.

8. Kedua Orang Tua tercinta yang telah memberikan dukungan semangat, doa hingga materil.
9. Teman-teman Mahasiswa Geologi Universitas Hasanuddin yang mendukung dan membantu dalam penyusunan Proposal Tugas Akhir ini.

Saya menyadari bahwa laporan ini masih terdapat berbagai kelemahan dan kekurangan, sehingga kritik maupun saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk menyempurnakan laporan ini. Akhir kata saya mengucapkan terima kasih dan semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi diri saya sendiri dan bagi orang lain yang menggunakannya.

Gowa, Agustus 2023

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Cekungan Tarakan merupakan salah satu cekungan dengan waktu eksplorasi tertua di wilayah Indonesia. Cekungan Tarakan merupakan objek potensi minyak dan gas di Indonesia yang terletak di timur Pulau Kalimantan. Potensi minyak dan gas pada cekungan Tarakan yang cukup menjanjikan. Kegiatan eksplorasi maupun eksploitasi dalam rangka mempertahankan produksi hidrokarbon ini tidak terlepas dari salah satu komponen penting yaitu operasi pengeboran (Wijaya dkk., 2012)

Operasi pengeboran memiliki resiko yang besar yang dapat merugikan dengan biaya yang tidak sedikit. Resiko pengeboran tidak lepas disebabkan akibat ketidakstabilan lubang sumur. Ketidakstabilan lubang sumur pada saat pemboran adalah salah satu tantangan paling kritis yang memengaruhi seluruh keberlangsungan sumur. Ketidakstabilan sumur pada saat pemboran dapat disebabkan oleh *kick*, *breakout*, *loss* dan *breakdown*. Salah satu kemungkinan untuk mengurangi frekuensi kejadian ketidakstabilan adalah dengan menganalisis situasi geomekanis. (Knoll, 2016). Kestabilan sumur pada saat dilakukan pengeboran dapat dianalisis dengan membuat model *wellbore failure* (kerusakan sumur) menggunakan parameter-parameter geomekanik (Hasugian et al., 2020).

Geomekanik merupakan studi geologi terhadap perilaku batuan yang berhubungan dengan karakterisasi dan mekanika massa batuan. Geomekanik termasuk diantara ilmu yang berfokus pada studi yang berkaitan dengan, pengeboran, pengembangan, dan eksploitasi ladang hidrokarbon (Addis, 2017). Sifat geomekanik meliputi: sifat elastis (modulus young, dan rasio poisson) dan sifat inelastis (*fracture pressure* dan kekuatan formasi). Sifat-sifat geomekanis ini biasanya dikuantifikasi oleh *mechanical earth model* (MEM). Kuantifikasi ini hampir selalu membutuhkan data akustik dari seismik, log sumur, atau pengukuran laboratorium (Borchardt et.al, 2016) dalam Ostad et al (2018)

Pemodelan Geomekanik berdasarkan 1D *mechanical earth model* (MEM) adalah pengukuran dan model yang mewakili sifat mekanik batuan, rekahan

tegangan, tekanan, dan suhu yang bekerja pada setiap kedalaman dalam 1 dimensi (Berard & Priou, 2016). Pemodelan *ID mechanical earth model* adalah representasi numerik dari sifat mekanik batuan dan keadaan tegangan in situ sepanjang lubang bor (Zain-Ul-Abedin & Henk, 2020).

Penelitian dilakukan pada sumur B di lapangan X dengan kedalaman akhir 2665,93 meter *true vertical depth* (TVD) yang berlokasi pada Cekungan Tarakan Sub-cekungan Tarakan Kalimantan Utara. Sumur B merupakan sumur yang berada pada area *onshore* dengan ketersediaan data *wireline log*, *mud log* dan *final well report*. Dalam menganalisis kestabilan sumur biasanya dilakukan dengan metode *pore pressure & fracture gradien* (PPFG) namun dengan menggunakan metode geomekanik akan lebih presisi. Oleh karena itu berdasarkan ketersediaan data pemboran pada daerah penelitian maka dapat dilakukan analisis geomekanika batuan berdasarkan *ID mechanical earth model* pada sumur B lapangan X Cekungan Tarakan, Provinsi Kalimantan Utara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana log bor sumur B lapangan X berdasarkan *wireline logging*?
2. Bagaimana model geomekanik berdasarkan *ID Mechanical Earth Model* sumur B lapangan X?
3. Bagaimana kestabilan sumur berdasarkan *wellbore failure* sumur B lapangan X?
4. Bagaimana korelasi keterkaitan *wellbore failure* dengan karakteristik aspek geomekanika?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis model geomekanika batuan berdasarkan *ID Mechanical Earth Model* dan kestabilan sumur B lapangan X.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui log bor sumur B lapangan X berdasarkan *wireline logging*.

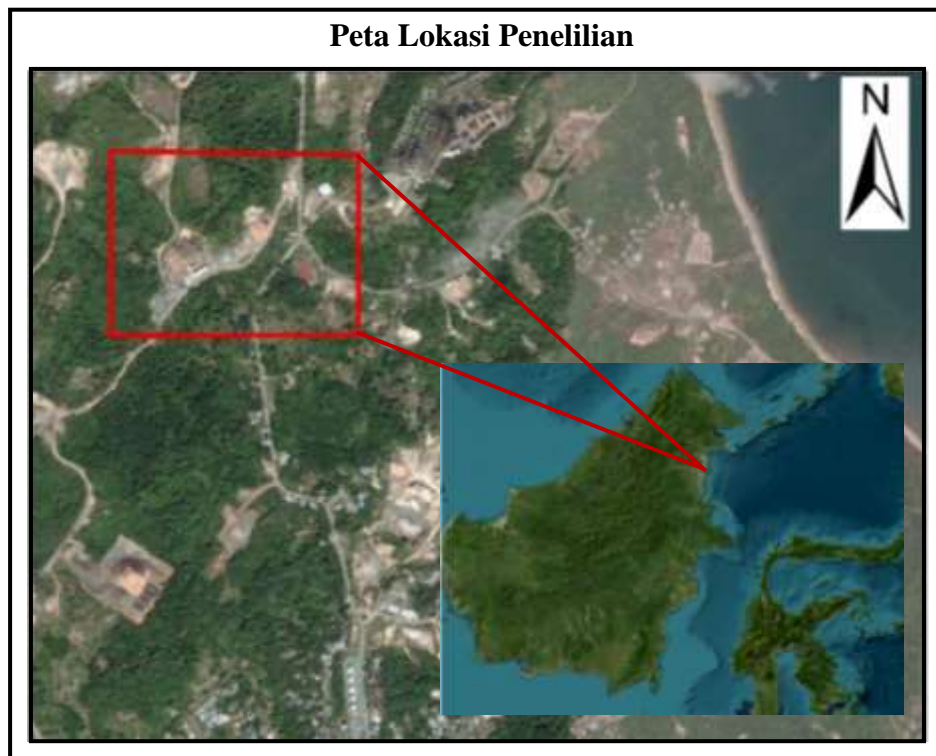
2. Membuat model geomekanik berdasarkan *1D Mechanical Earth Model* sumur B lapangan X.
3. Menentukan kestabilan sumur berdasarkan model *wellbore failure* sumur B lapangan X.
4. Membuat korelasi keterkaitan *wellbore failure* dengan aspek geomekanika.

1.4 Batasan masalah

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui aspek geomekanik berupa sifat mekanika batuan (modulus young, *poisson ratio*, *friction angle*, UCS, *tensile strenght*) dan tegangan in-situ (tegangan vertikal, tegangan horizontal minimum dan tegangan horizontal maksimum) pada sumur B lapangan X Cekungan Tarakan dengan menggunakan perhitungan secara dinamis tanpa menggunakan analisis pada laboratorium (statis). Serta untuk mengetahui model geomekanika batuan dan menentukan kestabilan sumur berdasarkan model *wellbore failure* sumur B menggunakan data yang tersedia.

1.5 Lokasi dan Kesampaian Daerah

Lokasi penelitian berlokasi di Kota Tarakan, Provinsi Kalimantan Utara. Jarak dari kota Makassar sekitar 1.762 kilometer ke arah utara. Lokasi penelitian dapat ditempuh dengan jalur udara menggunakan pesawat dari Bandara Internasional Sultan Hasanuddin di Makassar ke Bandara Internasional Juwata di Tarakan. Waktu tempuh penerbangan langsung ini sekitar 2 jam waktu tempuh. Atau dengan menggunakan kapal ferry dari Pelabuhan Soekarno Hatta Makassar menuju Pelabuhan Tarakan dengan waktu tempuh dapat mencapai 1-2 hari tergantung pada kondisi cuaca dan kecepatan kapal.



Gambar 1 Peta Tunjuk Lokasi Penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian

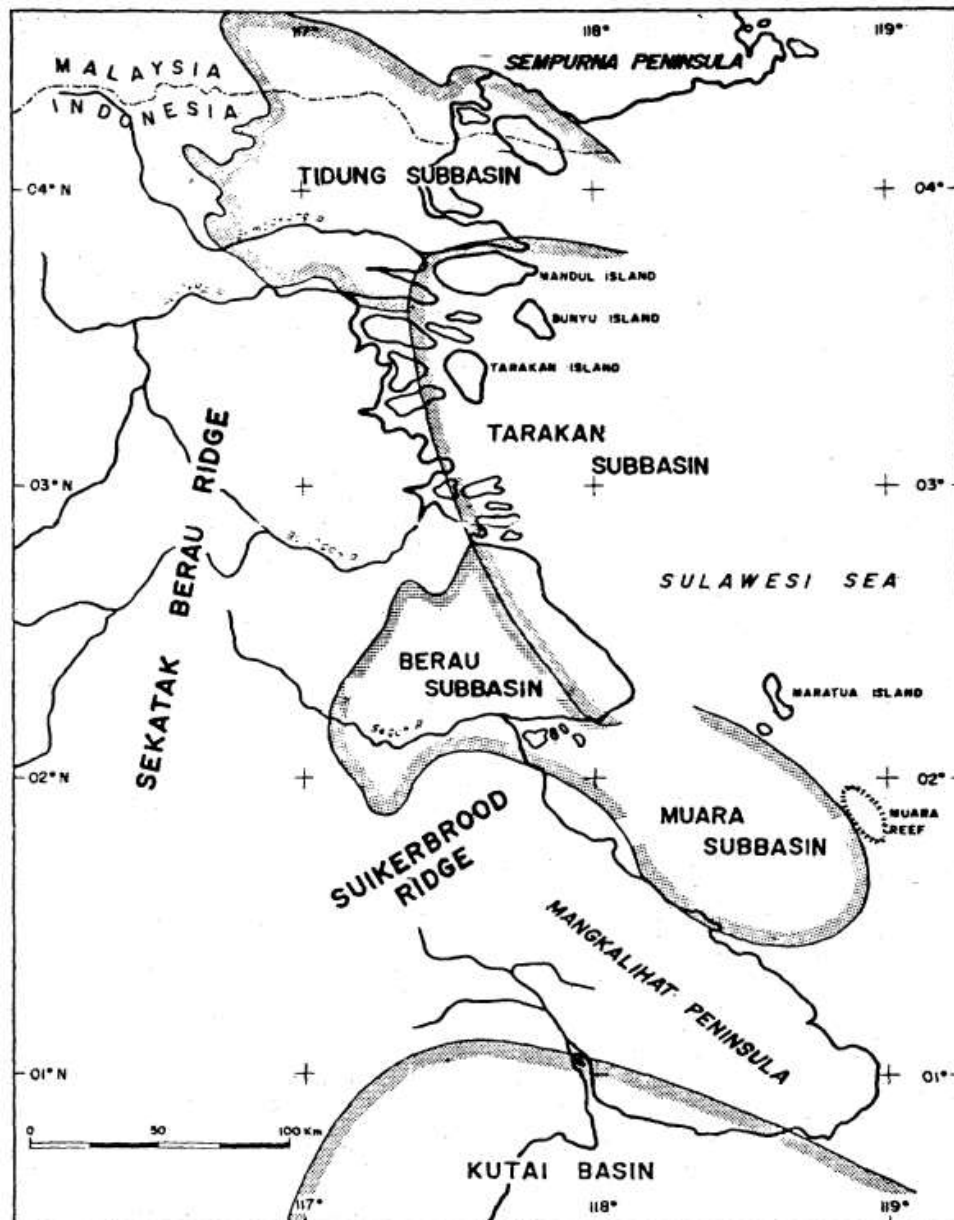
2.1.1 Geomorfologi Regional

Menurut Lentini dan Darman (1996), Cekungan Tarakan termasuk daerah delta pada cekungan tipe *passive margin* dengan kontrol tektonik minor geser lateral. Dari anomali magnetik, cekungan ini diindikasikan terjadi pemekaran lantai samudera dengan asosiasi patahan-patahan geser berarah ke barat laut.

Cekungan ini dibatasi oleh Punggungan Sekatak Berau di sebelah barat, Punggungan Suikerbrood dan Mangkalihat Peninsula di bagian selatan, Punggungan Sempurna Peninsula di utara, dan Laut Sulawesi di sebelah timur (Lentini & Darman, 1996).

2.1.2 Stratigrafi Regional

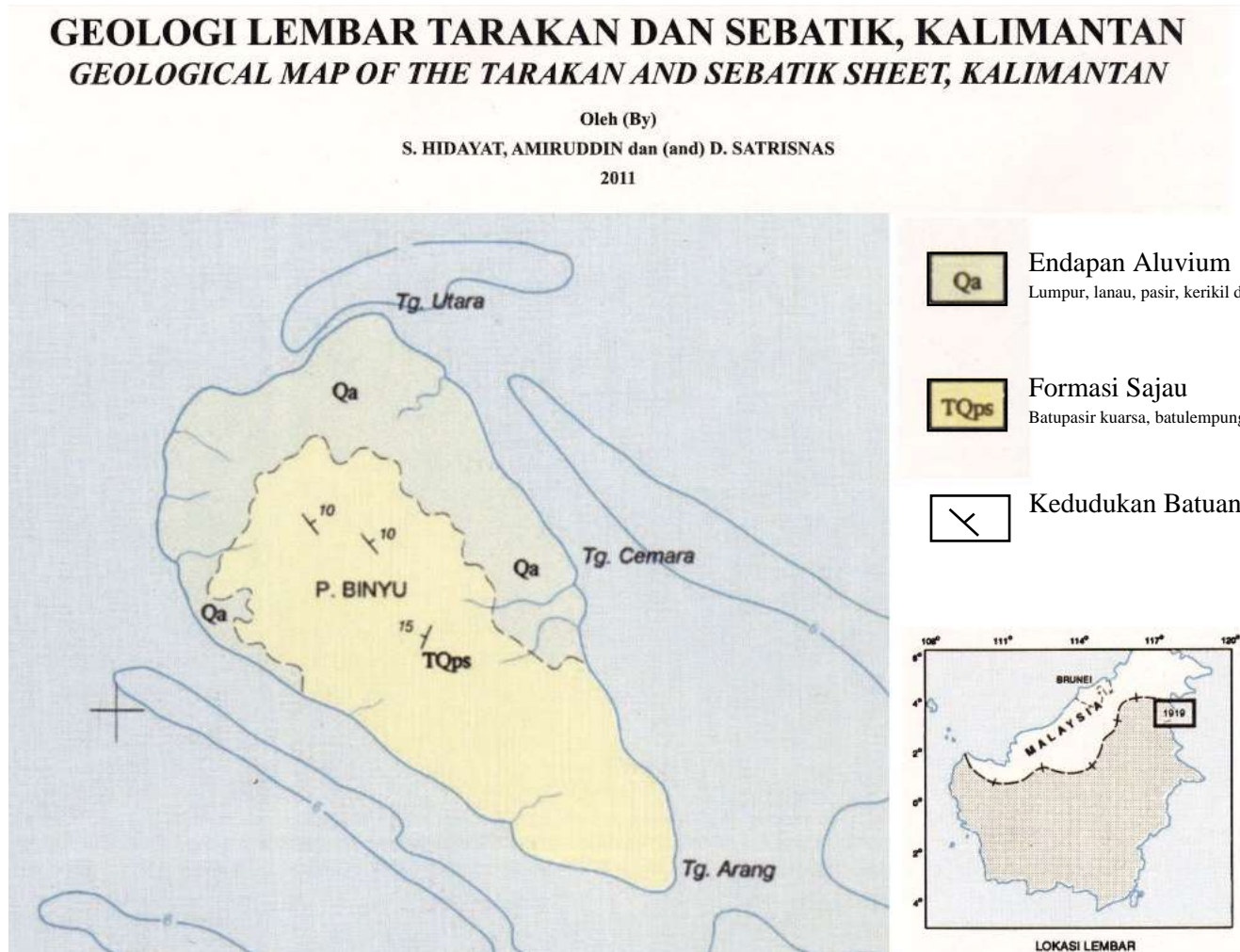
Menurut Achmad dan Samuel (1984) Cekungan Tarakan terdiri dari empat sub-cekungan yaitu Sub-cekungan Tidung, Sub-cekungan Tarakan, Sub-cekungan Berau, dan Sub-cekungan Muara. Letak daerah penelitian berada pada Sub-cekungan Tarakan.



Gambar 2 Cekungan Tarakan dibagi menjadi empat Sub-cekungan yaitu Sub-cekungan Tidung, Tarakan, Berau, dan Muara (Achmad dan Samuel, 1984)

Stratigrafi daerah penelitian terdiri dari batuan formasi Sajau yang tersusun atas batupasir kuarsa, batulempung, batulanau, batubara. Struktur sedimen pada formasi ini yaitu peralihan silang siur planar, bioturbasi, bintil besi, mengandung fosil kayu, umumnya karbonan, Formasi ini berumur Plio-Plistosen berdasarkan fosil moluska (Boets, 1950) dan diendapkan pada lingkungan fluvial sampai delta dan tebal formasi 600-2000 meter. (Hidayat dkk, 2011)

Endapan aluvium lumpur, lanau, pasir, kerikil dan koral, merupakan endapan pantai, sungai dan rawa (Hidayat dkk, 2011).

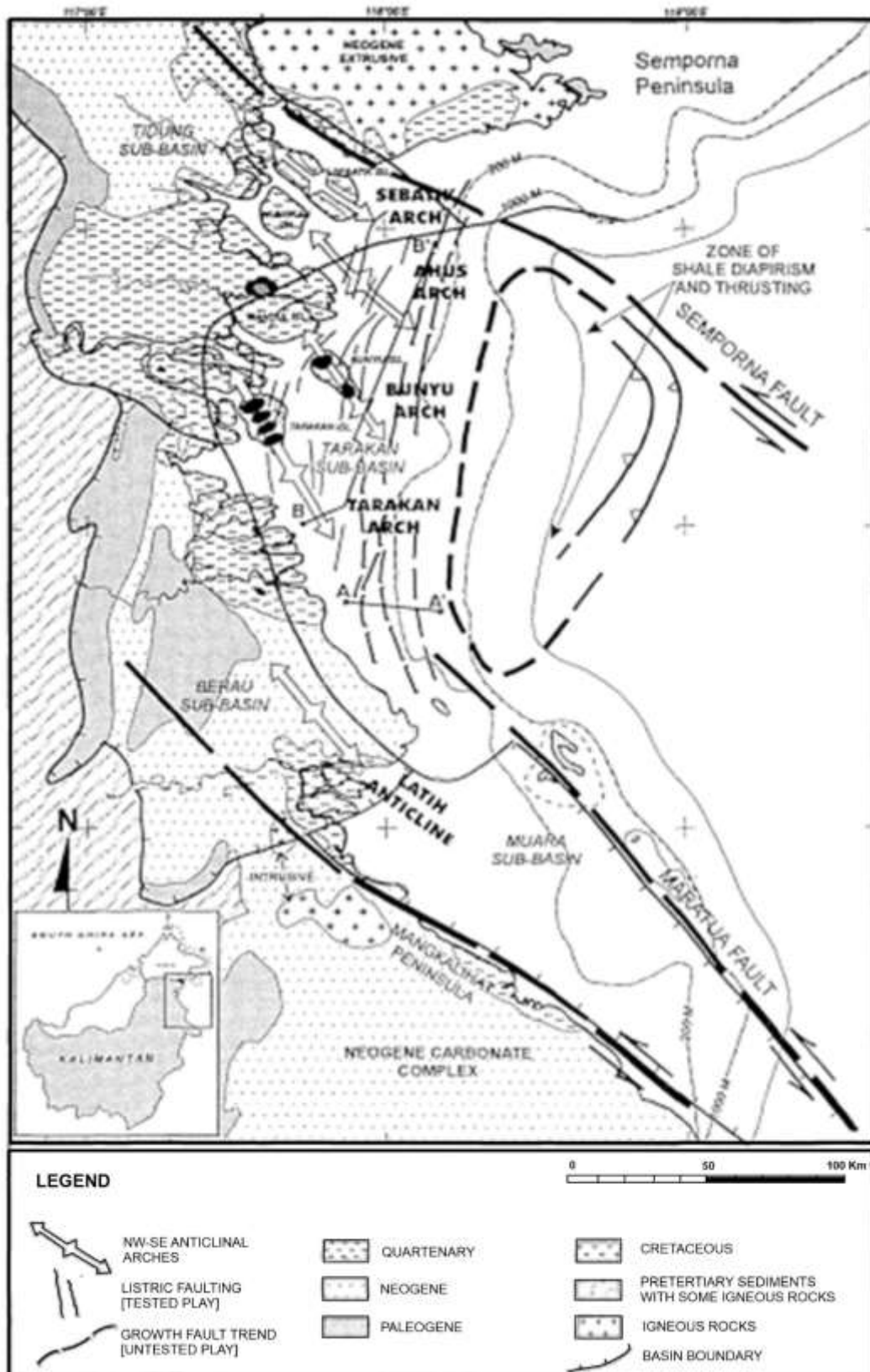


Gambar 3 Peta geologi regional daerah penelitian (Hidayat dkk, 2011)

2.1.3 Struktur Geologi Regional

Struktur geologi yang terdapat di Lembar Tarakan dan Sebatik adalah lipatan dan sesar. Lipatan berupa antiklin dan sinklin dengan sumbu lipatan berarah baralaut-tenggara dan melibatkan semua formasi batuan di lembar ini. Sesar yang dijumpai pada umumnya berupa sesar normal yang sebagian merupakan hasil pengakifan kembali sesar-sesar yang telah terbentuk sebelumnya. Sesar umumnya berarah baratlaut- tenggara dan beberapa berarah baratdaya-timurlaut. Di beberapa tempat sesar-sesar ini ditempati batuan beku. Sebagian dari struktur yang ditemukan di Lembar ini ditafsirkan dari citra SAR (Hidayat dkk, 2011).

Dari hasil pengamatan struktur sedimen dan komposisi batuan Tersier, pada umumnya di Lembar Tarakan dan Sebatik telah mengalami beberapa kali kegiatan tektonika. Pengangkatan "Daratan Sunda" yang berlangsung pada Akhir Eosen telah diikuti oleh penurunan dasar cekungan secara perlahan-lahan mulai dari kala Oligosen sampai Miosen Akhir. Periode tektonik berlangsung pada Akhir Miosen atau Awal Pliosen sampai kala Plistosen. Fase ini merupakan masa terjadinya kegiatan pengangkatan kembali tepi cekungan yang ditandai dengan pembentukan endapan paralik-fluvial delta seperti batupasir, batubara dan batulempung dari Formasi Sajau. Pada masa ini juga di daerah daratan terjadi kegiatan gunungapi yang menghasilkan batuan gunungapi dari Formasi Sinjin dan terobosan andesit, dasit dan basal (Qpl) yang berupa sumbat dan retas. Kegiatan tektonika terakhir terjadi pada kala Plistosen menghasilkan perlipatan dan sesar yang membentuk struktur geologi seperti sekarang ini. (Hidayat dkk, 2011)



Gambar 4 Struktur geologi regional Cekungan Tarakan menurut Lentini dan Darman (1996)

2.2 Konsep dan Definisi Geomekanik

Geomekanik adalah studi geologi terhadap perilaku batuan yang berhubungan dengan karakterisasi dan mekanika massa batuan. Pada konteks geologi struktur disepakati bahwa tekanan (tegangan) di kedalaman selalu positif karena tegangan di kedalaman selalu kompresi. Analisis geomekanik didasarkan pada perbandingan sifat dan kekuatan mekanik batuan dengan tegangan in situ (Addis, 2022).

Data *wireline log* dapat digunakan untuk memprediksi parameter-parameter geomekanik seperti tekanan pori, tekanan *overburden*, serta tegangan horizontal minimum dan maksimum. Prinsip dasar *wireline log* adalah mengukur parameter sifat – sifat fisik dari suatu batuan pada setiap kedalaman secara kontinyu dari sumur pemboran (Ellis & Singer, 2008).

Pengukuran sifat geomekanis dengan tes secara langsung disebut pengukuran sifat geomekanis statis melalui uji laboratorium. Pengukuran sifat geomekanis dengan tes tidak langsung menggunakan teknik geofisika disebut pengukuran sifat geomekanis dinamis menggunakan hubungan kecepatan gelombang (*wave velocity*) dengan menggunakan persamaan. Kecepatan gelombang dapat diperoleh dengan kabel *log*, inversi seismik 3-D, atau uji transmisi pulsa ultrasonik dalam sampel inti (Venieri et al., 2020).

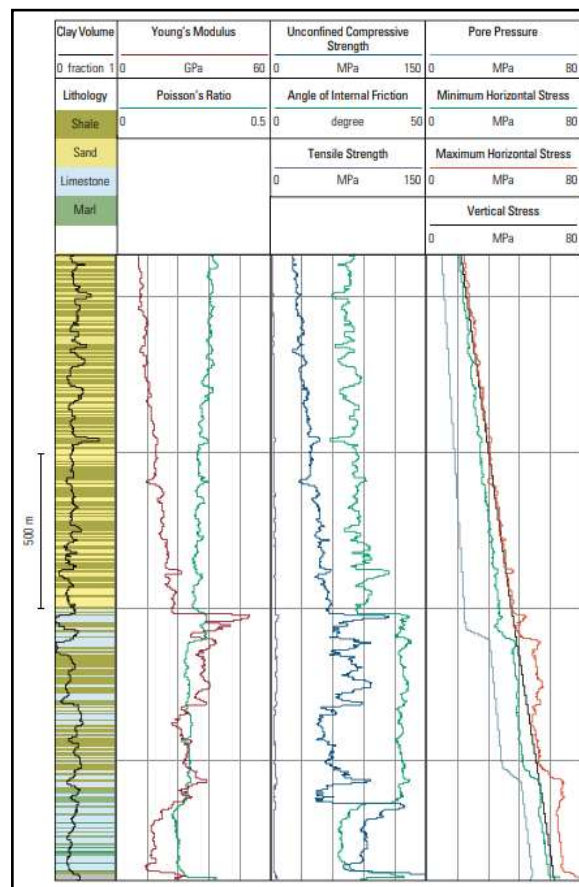
2.3 1D Mechanical Earth Model (1D MEM)

1D Mechanical earth model (1D MEM) adalah representasi numerik dari mekanika batuan, sifat dan keadaan tegangan in situ sepanjang lubang bor. Oleh karena itu, data *log* sumur digunakan untuk mendapatkan berbagai sifat material, perkiraan tekanan pori dan tegangan in situ di sepanjang lubang sumur. Kualitas model *1D mechanical earth model* bergantung pada ketersediaan data *log* sumur dan ketersediaan tes laboratorium untuk kalibrasi (Zain-Ul-Abedin & Henk, 2020).

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 & Marsden, 2005).

Alasan utama untuk membangun *mechanical earth model* adalah untuk desain sumur yang optimal untuk penempatan yang tepat selama masa pakai ladang minyak dan gas. *Mechanical earth model* sangat penting selama eksplorasi, pengembangan lapangan, pembangunan kembali seperti pengeboran *infill*, pembiasan dan operasi pemulihan sekunder (Zain-UI-Abedin & Henk, 2020).

Mechanical earth model mungkin sederhana atau kompleks, dengan resolusi tinggi atau rendah, pada skala meteran di wilayah dekat sumur atau skala puluhan kilometer di cekungan sedimen dan dalam 1D, 2D, atau 3D. Misalnya, model 3D akan lebih sesuai daripada model 1D untuk memodelkan bagaimana fitur struktural, seperti *salt bodies*, mempengaruhi medan tegangan *in situ* namun dalam membangun model 3D memerlukan interpolasi dan kriging dari beberapa model 1D (Zain-UI-Abedin & Henk, (2020); Berard & Priou, (2016). Kualitas model 1D *mechanical earth model* bergantung pada ketersediaan data *log* sumur dan ketersediaan uji laboratorium pada *core* untuk kalibrasi (Zain-UI-Abedin & Henk, 2020).



Gambar 5 Tampilan log vertikal 1D *mechanical earth model* (Berard & Priou, 2016)

2.4 Tegangan In Situ

Dalam istilah yang paling sederhana, tekanan didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada area tertentu. Untuk lebih tepatnya, tekanan adalah tensor yang menggambarkan kepadatan gaya yang bekerja pada semua permukaan yang melalui suatu titik tertentu (Nauroy, 2011).

2.4.1 Tegangan Overburden/Vertikal

Tekanan yang membebani tekanan pori adalah tekanan vertikal (*total stress/lithostatic stress/overburden stress*/ σ_v/S_v). Tekanan vertikal yang memberikan pembebanan pada suatu formasi di kedalaman tertentu akibat berat total dari batuan dan fluida yang berada di atas kedalaman tersebut. Tekanan vertikal merupakan kombinasi dari densitas matriks, porositas, dan densitas fluida yang terkandung didalam pori. Perhitungan nilai tekanan *overburden* juga menggunakan hukum Archimedes. Namun besaran berat jenis yang digunakan dalam perhitungan tekanan *overburden* didapatkan dari data log densitas. Tegangan ini dipengaruhi oleh nilai densitas, percepatan gravitasi, serta kedalaman. Dengan kata lain tegangan vertikal adalah fungsi kedalaman dari densitas dan percepatan gravitasi (Hasugian et al., 2020).

Besarnya tegangan vertikal dianggap berasal dari integrasi densitas batuan dari permukaan ke kedalaman yang diinginkan. Tegangan *overburden* dalam massa batuan dihitung dengan cara yang sama seperti: Berat satuan batuan sebagai 27 kN/m³ dalam menghitung tegangan *overburden* (Sivakugan et al., 2013).

$$S_v = BSB \times z \quad (1)$$

Dimana,

S_v = Tekanan vertikal (MPa)

z = Kedalaman (m)

BSB = Berat satuan batuan, 0,027 (MPa)

2.4.2 Tegangan Horizontal

Tegangan horizontal minimum dan maksimum adalah dua dari tiga tegangan utama, yang diperlukan untuk setiap studi geomekanik (analisis stabilitas sumur, produksi pasir, dan rekahan hidrolik). Estimasi tegangan horizontal adalah

salah satu langkah utama dalam pemodelan geomekanik dan berkontribusi pada penilaian akurasi model geomekanik yang diukur (Gholilou et al., 2007).

2.4.2.1 Tegangan Horizontal Minimum (Shmin)

Tegangan horizontal minimum adalah salah satu dari tiga tegangan utama yang dapat diestimasi secara langsung. Nilai dari tegangan minimum pada umumnya didapatkan dari data pengukuran uji rekah hidraulik yang merepresentasikan ketahanan batuan dalam menerima tekanan fluida. Tegangan horizontal minimum atau tekanan rekah didefinisikan juga sebagai total dari tekanan yang dapat ditahan oleh formasi sebelum suatu formasi tersebut rusak atau hancur (Zoback, 2007).

Besarnya tegangan horizontal minimum dapat diukur secara langsung menurut *International Society of Rock Mechanics* dengan melakukan *leak off test* (LOT), *Extended leak off test* (XLOT), *formation breakdown* (FBP), *formation integrity test* (FIT), *hydraulic fracture test*, *minifrac test* (Hudson & Harrison 1997, Tan 2013, Zoback et al 2003 dalam Abija et al, 2018)

Nilai dari tegangan horizontal minimum (Shmin) dapat dihitung menggunakan persamaan 2 (Heydari et al., 2022)

$$Sh_{min} = \frac{v}{1-v} (Sv - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{Es}{1-v^2} \varepsilon_x + \frac{v \times Es}{1-v^2} \varepsilon_y \quad (2)$$

2.4.2.2 Tegangan Horizontal Maksimum (SHmax)

SHmax atau tegangan horizontal maksimum adalah salah satu dari tiga tegangan yang tidak dapat diukur secara langsung. Estimasi nilai dari tegangan horizontal maksimum secara empiris dapat dilakukan dengan menggunakan data *wireline log* yang tersedia. Nilai dari tegangan horizontal maksimum (SHmax) dapat dihitung menggunakan persamaan 3 (Heydari et al., 2022)

$$SH_{max} = \frac{v}{1-v} (Sv - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{Es}{1-v^2} \varepsilon_y + \frac{v \times Es}{1-v^2} \varepsilon_x \quad (3)$$

$$\varepsilon_x = \frac{Sv \times v}{Es} \times \left(\frac{1}{1-v} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{Sv \times v}{Es} \times \left(1 - \frac{v^2}{1-v} \right) \quad (5)$$

dimana,

Sh_{min} = Tekanan horizontal minimum (MPa)

S_{Hmax} = Tekanan horizontal maksimum (MPa)

ν = Poisson's ratio

S_v = Tekanan vertical (MPa)

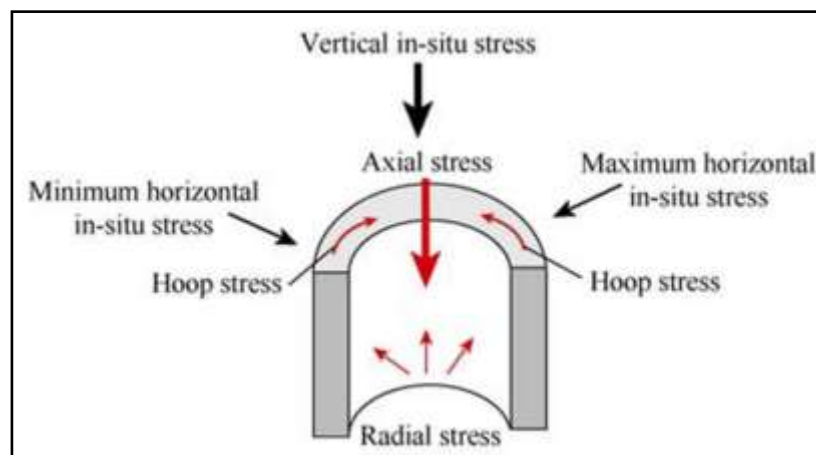
α = Koefisien Biot (1)

P_p = Tekanan Pori (MPa)

E = Modulus Young (GPa)

ϵ_x = Minimum horizontal strain

ϵ_y = Maximum horizontal strain

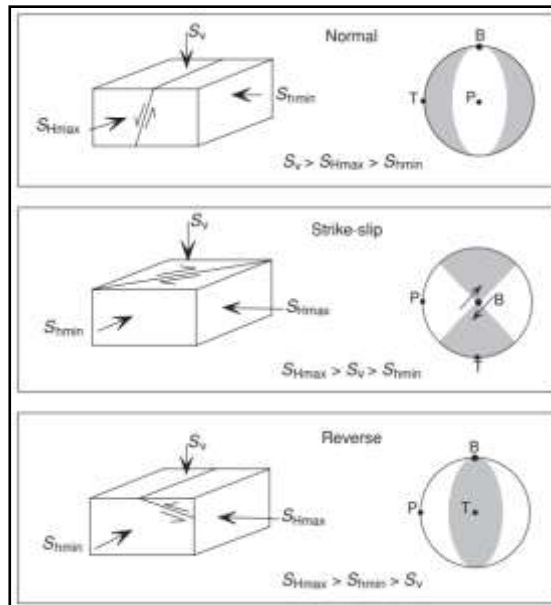


Gambar 6 Distribusi tegangan pada sumur vertikal (Darvishpour et al., 2019)

Skema klasifikasi Anderson juga mendefinisikan besaran tegangan utama horizontal terhadap tegangan vertikal. Tegangan vertikal (S_v), adalah tegangan utama maksimum (S_1) dalam rezim *normal fault*, tegangan utama menengah (S_2) dalam rezim *strike-slip* dan tegangan utama terkecil (S_3) dalam rezim *reverse fault* (Zoback, 2007).

Tabel 1 Besar tegangan relatif dan regim sesar (Zoback, 2007)

Regim	Tegangan		
	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



Gambar 7 Skema klasifikasi E.M Anderson untuk besaran tegangan relatif pada sesar normal, *strike-slip* dan sesar turun (Zoback, 2007)

2.5 Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik (P_h) merupakan tekanan yang dihasilkan oleh kolom fluida statis yang besarnya sama ke segala arah. Ukuran dan geometri merupakan variabel bebas karena kolom fluida ini tidak memiliki pengaruh terhadap besarnya tekanan hidrostatik. Berdasarkan Hukum Archimedes, besarnya tekanan hidrostatik akan sama dengan jumlah dari densitas fluida rata-rata dan tinggi vertikalnya (Zoback, 2007)

Tekanan hidrostatik dapat diukur dengan persamaan 0,44 psi/ft atau 1,420 psi/m (tergantung salinitas). Rumus dari tekanan hidrostatik adalah sebagai berikut (Zoback, 2007):

$$P_h = Depth \times \rho \times 1,420 \times 0,00689 \quad (6)$$

dimana,

P_h = Tekanan hidrostatik (MPa)

ρ = Densitas air (1,03)

$Depth$ = Kedalaman (m)

1,420 = Konstanta dalam Psi

0,00689 = Konstanta dalam MPa

2.6 Tekanan Pori

Tekanan pori (P_p) merupakan tekanan hidrolik yang bersifat skalar, yang terbentuk karna adanya pori yang saling berhubungan (*interconnected*) di kedalaman. Pada saat kondisi kompaksi normal (*normal compaction*), tekanan pori didefinisikan sebagai tekanan hidrostatik (*hydrostatic pore pressure / P_p hydro*) yang nilainya meningkat tergantung dari besarnya densitas air seiring dengan bertambahnya kedalaman yaitu sebesar 10 MPa/km atau 0,44 psi/ft (Zoback, 2007).

Jika tekanan pori lebih rendah atau lebih tinggi dari tekanan hidrostatik (tekanan pori normal), maka tekanan pori abnormal. Ketika tekanan pori melebihi tekanan normal, disebut *overpressure*. (Zhang, 2011).

Tekanan pori dapat dihitung menggunakan persamaan 7 dengan menggunakan metode Eaton (Zoback, 2007):

$$P_p = S_v - [S_v - P_h] \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^{3.0} \quad (7)$$

dimana,

P_p = Tekanan Pori (MPa)

S_v = Tegangan vertikal/*overburden* (MPa)

P_h = Tekanan hidrostatik (MPa)

Δt_n = Waktu interval sonik pada saat terjadi kompaksi normal (μ/f)

Δt_o = Waktu interval sonik terukur (μ/f)

2.7 Tekanan Rekah

Tekanan rekah atau *Fracture propagation pressure* didefinisikan juga sebagai total dari tekanan yang dapat ditahan oleh formasi sebelum suatu formasi tersebut rusak atau hancur (tegangan minimum). Tekanan rekah memiliki nilai yang lebih kecil dari tekanan *overburden* dan lebih besar dari tekanan pori (Yanto, 2011).

Untuk mendapatkan estimasi tekanan rekah, digunakan persamaan Eaton (Zoback, 2007), dengan persamaan berikut:

$$FP = \left(\frac{v}{1-v} \right) (S_v - P_p) + P_p \quad (8)$$

dimana,

FP = tekanan rekah (MPa)

v = *poisson's ratio*

S_v = tekanan overburden (MPa)

P_p = tekanan pori (MPa)

2.8 Parameter Mekanik

Sifat mekanik batuan terutama terdiri dari parameter kekuatan, kekuatan tarik, dan parameter elastis. Properti ini terutama digunakan dalam analisis stabilitas lubang sumur dan penentuan lumpur yang optimal tekanan untuk pengeboran yang aman. Profil kontinyu sifat mekanik batuan memberikan indikasi yang baik variasi alami dalam kekuatan dan stabilitas formasi di sekitar lubang sumur di berbagai lapisan di dalamnya. Tes laboratorium dianggap sebagai cara penentuan yang paling langsung dan andal sifat mekanik batuan (Abbas et al., 2020)

Parameter mekanis seperti kuat tekan uniaksial (UCS), modulus Young (E) dan rasio Poisson (ν) menggambarkan kekuatan dan sifat elastis formasi batuan, banyak digunakan untuk pemodelan geomekanik reservoir (Asef & Najibi, 2013).

2.8.1 Modulus Young

Modulus Young (E), didefinisikan sebagai rasio tegangan terhadap regangan dalam tegangan uniaksial (Schon, 2011). Modulus Young (modulus elastisitas) merupakan kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastiknya (Arif, 2016)

Menurut Pertamina Hulu Kalimantan Timur (2022) di salah satu sumur pada lapangan X hubungan Modulus young statis dan dinamis adalah ($E_{\text{statis}}=0,725 E_{\text{dinamis}}$)

$$E_d = \left[\frac{\rho}{\Delta t x^2} \right] + \left[\frac{3\Delta t x^2 - 4\Delta t p^2}{\Delta t x^2 - \Delta t p^2} \right] \times 1,34 \times 10^{10} \times 6,895 \times 10^{-6} \quad (9)$$

dimana,

E_d = Modulus Young Dinamis (GPa)

ρ = Densitas (g/cm^3)

Δt_x = *Shear sonic* (μ/f)

Δt_p = *Compressional sonic* (μ/f)

$1,34 \times 10^{10}$ = Konstanta dalam Psi

$6,895 \times 10^{-6}$ = Konstanta dalam GPa

2.8.2 Poisson's Ratio

Poisson's Ratio (ν), didefinisikan sebagai rasio (negatif) regangan lateral terhadap regangan aksial dalam keadaan tegangan uniaksial (Schon, 2011)

Menurut Pertamina Hulu Kalimantan Timur (2022) di salah satu sumur pada lapangan X hubungan poisson rasio statis dan dinamis adalah ($\nu_{static}=0,7$ $\nu_{dynamic}$)

$$\nu = 0.5 \left(\frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2} \right) \quad (10)$$

dimana,

ν = *Poisson's ratio*

Δt_s = *Shear sonic* (μ/f)

Δt_p = *Compressional sonic* (μ/f)

2.8.3 Friction Angles

Sudut geser dalam (*friction angle*) adalah sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam material. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka material tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya (Das dkk, 1994).

Perhitungan *friction angle* dapat menggunakan hubungan empiris menggunakan persamaan berikut (Hoseinpour & Riahi, 2022)

$$\varphi = 26,5 - 37,4(1 - Porosity - V_{shale}) + 62,1(1 - Porosity - V_{shale})^2 \quad (11)$$

$$N = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (12)$$

dimana,

φ = *Friction Angle*

V_{shale} = *Volume shale/clay*

N = *Friction number*

2.8.4 Volume Shale

Volume of shale atau yang dikenal sebagai V_{shale} merupakan persentasi atau *desimal fraction* dari shale pada sebuah volume batuan (Rider, 2002).

$$V_{shale} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (13)$$

dimana,

V_{shale} = Volume clay/shale

GR = Gamma Ray

2.8.5 Unconfined Compressive Strength (UCS)

Nilai kekuatan batuan yang digunakan dalam model geomekanika sebaiknya menggunakan hasil dari percobaan laboratorium (UCS atau TCS). Hal ini guna mendapatkan nilai yang lebih mendekati kondisi sebenarnya. Penggunaan nilai kekuatan batuan dengan data dinamis (sonic, VSP, dsb) harus memperhitungkan tingkat kesalahan alat log pada saat melakukan akuisisi. Selain nilai C_0 , dari hasil percobaan laboratorium juga akan diperoleh nilai koefisien friksi yang akan digunakan dalam analisis tekanan rekah kritis. (Gunawan dkk, 2017.)

Estimasi secara tidak langsung dimungkinkan dengan menggunakan berbagai metode korelasi. Korelasi kekuatan tekan bebas (UCS) dengan modulus statis Young (Persamaan 9) untuk pembentukan (modulus Young <12 GPa) yang dapat digunakan untuk menghitung UCS. (Abbas & Almohammed, 2020)

$$UCS = 4.242E_s \quad (14)$$

dimana,

UCS = Unconfined Compressive Strength (MPa)

E_s = Modulus Young statis (GPa)

2.8.6 Tensile Strength

Kekuatan tarik batuan didefinisikan sebagai gaya tarik, yang diperlukan untuk memecah sampel batuan, dibagi dengan luas penampang sampel. Kekuatan tarik batuan sangat kecil dan berada di urutan 0,1 kali kekuatan tekan (UCS). Dengan demikian, material batuan lebih cenderung rusak/hancur dalam tarikan daripada dalam tekan (Aadnoy & Looyeh, 2019).

Tensile strength dapat dihitung menggunakan persamaan rumus:

$$T_0 = 0,1 \times UCS \quad (15)$$

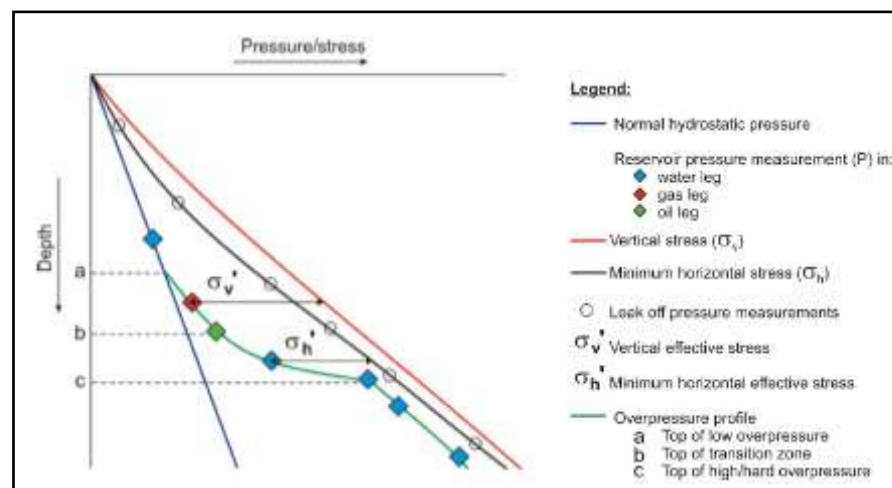
dimana,

T_0 = Tensile Strength (MPa)

UCS = *Unconfined Compressive Strength* (MPa)

2.9 Overpressure

Overpressure merupakan istilah untuk mendeskripsikan tekanan fluida dalam pori-pori batuan bawah permukaan (tekanan pori) yang lebih tinggi dari normal, yaitu ketika tekanan pori tersebut melebihi tekanan hidrostatik. Pembentukan, kedalaman, besar, dan evolusi dari *overpressure* di suatu daerah dikontrol oleh kondisi geologi daerah tersebut, yaitu meliputi variasi litologi, sedimentasi, sejarah kompaksi, sejarah stratigrafi, tektonik serta geokimia organik. Masalah-masalah yang mengkompromikan keamanan pengeboran seperti *kick, loss, breakout*, dan runtuhnya dinding lubang bor dikontrol oleh karakteristik-karakteristik *overpressure*. Prediksi *overpressure* menjadi fondasi dalam perencanaan program pengeboran untuk memastikan bahwa pengeboran akan berjalan seaman mungkin dengan biaya serendah mungkin. Semakin akurat prediksi *overpressure*, rencana pengeboran akan semakin sukses: prediksi *overpressure* di suatu daerah akan menjadi semakin akurat ketika seorang analis tekanan pori mampu merangkul kondisi geologi yang mengontrol pembentukan *overpressure* di daerah tersebut (Sausan, 2014).



Gambar 8 Mekanisme terjadinya *overpressure* (Ramdhan, 2010)

2.10 Kestabilan Sumur

Kestabilan lubang bor dipengaruhi oleh dua factor, faktor yang tidak dapat kita kendalikan seperti tekanan-in-situ, tekanan pori, kekuatan batuan. Dan faktor

lainnya yang bisa kita optimalkan dan rancang untuk mengurangi permasalahan geomekanika terkait permasalahan kestabilan seperti *well trajectory*, *casing seats*, berat jenis lumpur dan *drilling practice*. Tekanan pori formasi adalah properti batuan yang sangat penting untuk operasi pengeboran yang aman dan pemodelan reservoir yang efisien. Estimasi tekanan pori yang akurat memungkinkan untuk menentukan tegangan in-situ yang efektif, memilih berat jenis lumpur yang tepat, mengoptimalkan *casing program* sehingga memungkinkan untuk mengoptimalkan struktur sumur dan mengurangi permasalahan stabilitas lubang bor. Di sisi lain, ketidakakuratan dalam prediksi tekanan pori meningkatkan banyak risiko insiden pengeboran seperti ketidakstabilan lubang bor, *kick*, *loss circulation* dan *pipe stuck* (Zhang, 2011).

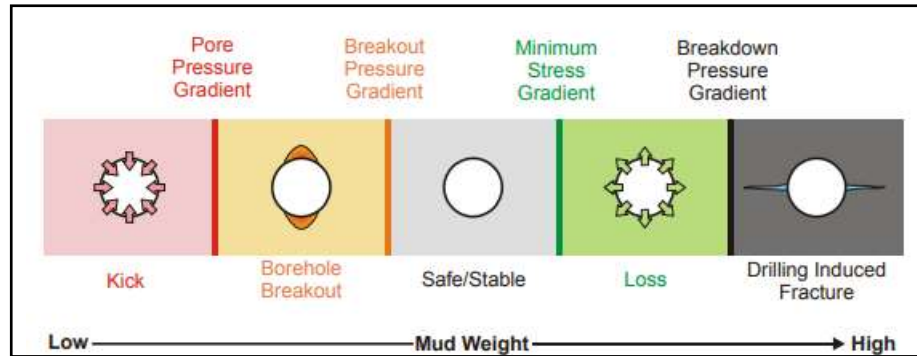
Kestabilan lubang sumur saat dilakukannya pengeboran sangat dipengaruhi berat lumpur. Besar kecilnya berat lumpur harus disesuaikan dengan karakteristik geologinya. Dalam melakukan estimasi berat lumpur, digunakan perhitungan dengan parameter tekanan lumpur minimum yang dibatasi oleh tekanan pori, dan tekanan lumpur maksimum yang dibatasi oleh *Shmin (Fracture Pressure)* (Cook et al., 2011).

Bila berat lumpur terlalu rendah, yang terjadi adalah lubang sumur menjadi tidak stabil dan beresiko kerontokan dinding sumur, *kick*, *blow*. Sedangkan bila berat lumpur terlalu tinggi maka akan menyebabkan *lost circulation* dan *well breakdown* (Hasugian et al., 2020). Ketidakstabilan lubang sumur biasanya disebabkan oleh kombinasi faktor-faktor yang diklasifikasikan sebagai dapat dikontrol dan tidak dapat dikontrol. Faktor-faktor ini ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Penyebab ketidakstabilan sumur (Passic et al., 2007)

Penyebab Ketidakstabilan Sumur	
Faktor Tidak Terkendali	Faktor Terkendali
Formasi rekah atau sesar	Tekanan bawah lubang
Tegangan tektonik formasi	Kemiringan dan arah sumur
Tegangan Insitu tinggi	Tekanan pori transien
Formasi tidak terkonsolidasi	Getaran drill string
Over-Pressured Shale Collapse	Erosi
Induced Over-Pressured Shale Collapse	Suhu

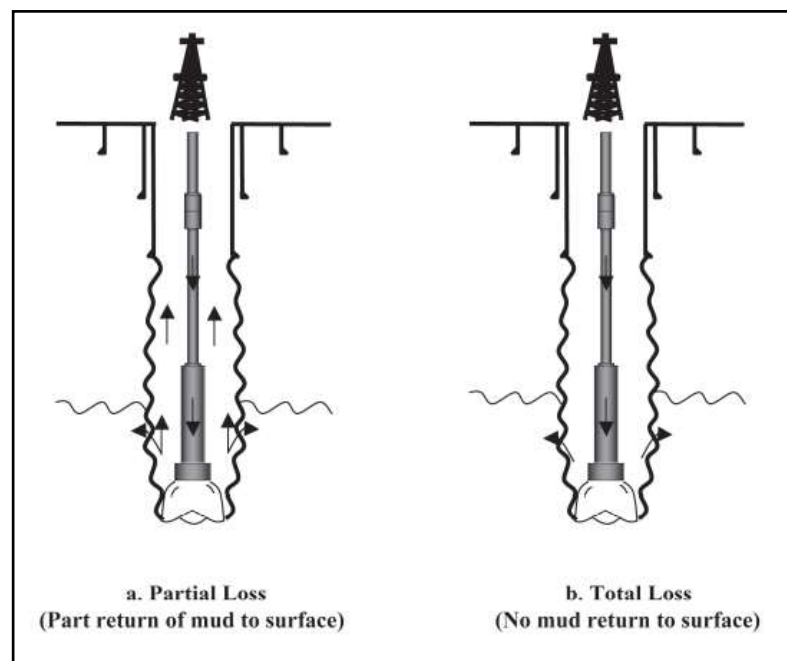
Kestabilan sumur pemboran dapat dilihat dari *safe mud weight window* pada model *wellbore failure* yang memperlihatkan posisi stabil lubang bor.



Gambar 9 Konsep jendela berat lumpur yang aman untuk pengeboran pada model *wellbore failure* (Le & Rasouli, 2012)

a. *Loss Circulation*

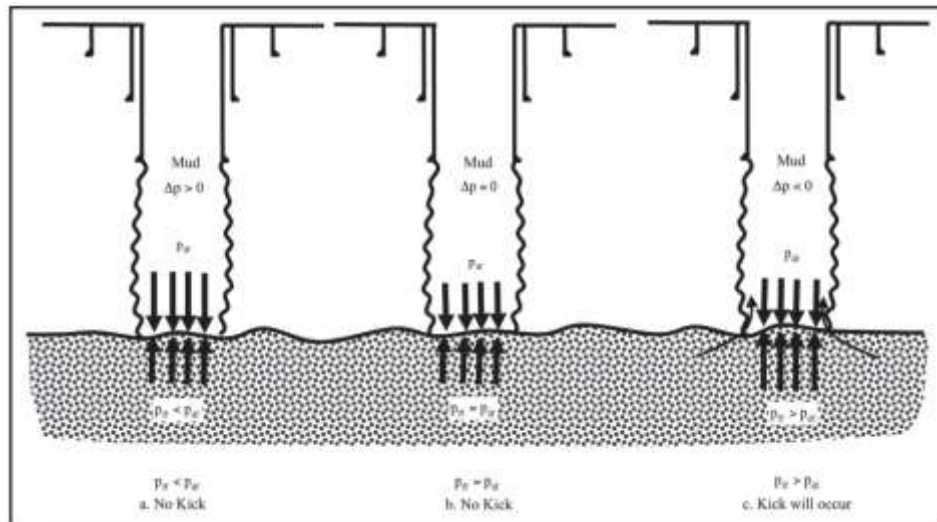
Loss circulation didefinisikan sebagai aliran lumpur utuh yang tidak terkendali ke dalam formasi. Formasi yang secara inheren retak, habis, atau memiliki permeabilitas tinggi, di satu sisi, adalah zona potensial *loss circulation*. Di lain sisi, di bawah kondisi pengeboran tertentu yang tidak tepat, rekahan yang diinduksi menjadi zona potensial *loss circulation*. Penyebab utama rekahan yang diinduksi adalah tekanan lubang bawah yang berlebihan dan kedalaman pengaturan *casing* yang tidak tepat, terutama di zona transisi (Azar, 2007). Nilai *loss circulation* didapatkan dari nilai S_{hmin} atau tekanan rekah yang menjadi batas antara *loss circulation* dan zona stabil.



Gambar 10 *Loss circulation* (Azar, 2007)

b. *Kick*

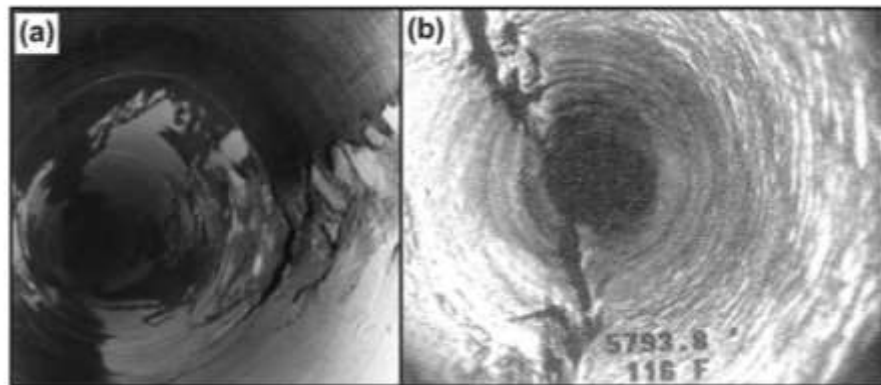
Selama operasi pemboran, intrusi cairan formasi (air, minyak, gas atau kombinasi dari ketiganya) ke dalam sumur disebut *kick*. Saat *kick* terjadi ada potensi terjadinya *blowout*. *Blowout* dapat terjadi selama operasi pengeboran *tripping*, *casing* atau *workover*. Dan dianggap sebagai kecelakaan, dan dapat membahayakan nyawa manusia, keuangan investasi dan lingkungan (Azar, 2007). Nilai *kick* didapatkan dari nilai tekanan pori yang menjadi batas antara *kick* dan zona stabil.



Gambar 11 Ilustrasi terjadinya *kick* (Azar, 2007)

c. *Breakout*

Breakout lubang bor adalah pembesaran yang disebabkan oleh tegangan dari penampang lubang sumur (Bell & Gough, 1979). Saat lubang sumur dibor, material yang dikeluarkan dari bawah permukaan tidak lagi menopang batuan sekitarnya. Akibatnya, tegangan menjadi terkonsentrasi di batuan sekitarnya (yaitu dinding lubang sumur). *Breakout* lubang bor terjadi ketika tekanan di sekitar lubang bor melebihi yang dibutuhkan menyebabkan kegagalan tekanan dinding lubang bor (Zoback et al., 1985; dalam Bell 1990).



Gambar 12 (a) *Borehole breakout* (b) *Borehole fracture* (yang diambil menggunakan downhole camera) (Asquith & Krygowski, 2004)

Nilai *breakout* dapat dihitung dengan persamaan rumus:

$$P_{W_{BO}} = \frac{3\sigma_H - \sigma_h - P_p(1-N) - UCS}{1+N} \quad (16)$$

dimana,

$P_{W_{BO}}$ = *Breakout*

σ_H = Tegangan Horizontal Maksimum

σ_h = Tegangan Horizontal Minimum

P_p = Tekanan Pori

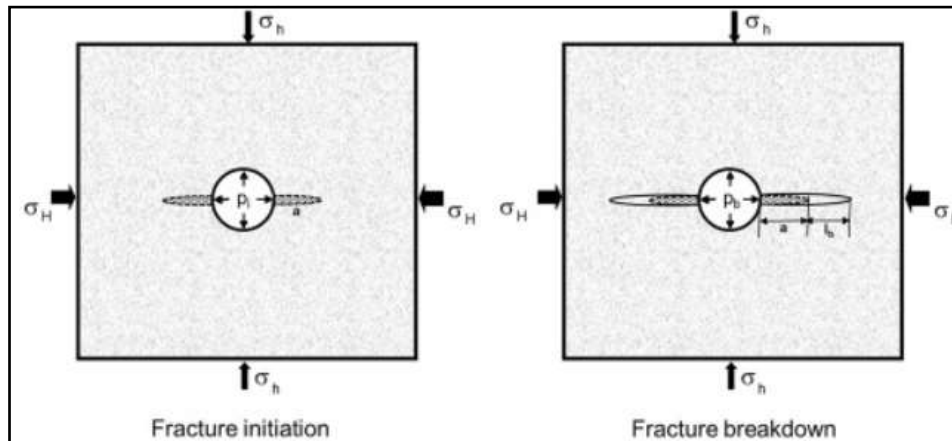
N = *Friction number*

UCS = *Unconfined compressive strength*

d. *Breakdown*

Breakdown didefinisikan sebagai tekanan lubang sumur dimana fluida pemboran memasuki rekahan, yang menyebabkan tidak stabil (perambatan rekahan) (Lavrov, 2016). *Breakdown pressure* tergantung pada faktor-faktor berikut:

1. Tegangan In-situ
2. Orientasi sumur
3. *Tensile strength* batuan
4. Pendinginan area dekat sumur oleh fluida pemboran
5. Diameter lubang bor
6. Modulus young batuan
7. Permeabilitas batuan
8. Kapasitas fluida pengeboran untuk menutup rekahan



Gambar 13 Skema representatif dari lubang bor vertikal dari inisiasi *fracture* hingga *breakdown* (Zhang, 2019)

$$P_{WBD} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + T_0 \quad (17)$$

dimana,

P_{WBD} = *Breakdown*

σ_H = Tegangan Horizontal Maksimum

σ_h = Tegangan Horizontal Minimum

P_p = Tekanan Pori

T_0 = *Tensile Strenght*

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Keberhasilan dari suatu penelitian ditentukan oleh persiapan yang baik. Dimana keberhasilan pengambilan dan pengumpulan data, pengolahan serta analisis data untuk penyusunan laporan sangat tergantung dari kesiapan metode dan tahapan yang digunakan.

Dalam melakukan analisis geomekanik metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif analisis dengan menggunakan data log sumur. Data yang terkumpul kemudian diolah secara kualitatif dan kuantitatif untuk mendapatkan parameter geomekanik yang dibutuhkan untuk melakukan analisis.

3.2 Tahapan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini tercakup beberapa tahapan penelitian, yaitu tahap persiapan, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, dan tahap penyusunan laporan.

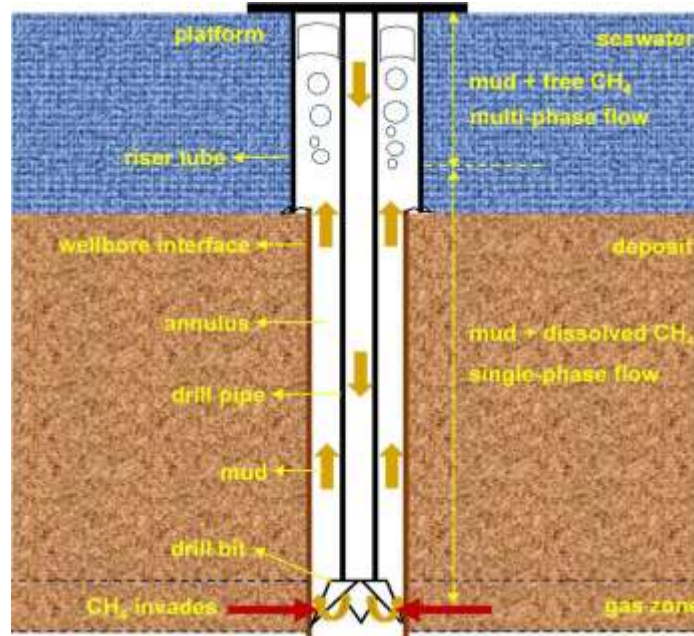
3.2.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan dilakukan sebelum penelitian dengan tujuan memperlancar pelaksanaannya, yaitu sebagai berikut: Studi pustaka, mempelajari literatur peneliti terdahulu, khususnya yang berhubungan dengan daerah penelitian yang dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran secara umum keadaan daerah penelitian. Persiapan peralatan dan perlengkapan yang akan digunakan selama penelitian berlangsung. Persiapan administrasi, berupa pengurusan surat-surat perizinan.

3.2.2 Tahap Pengumpulan Data

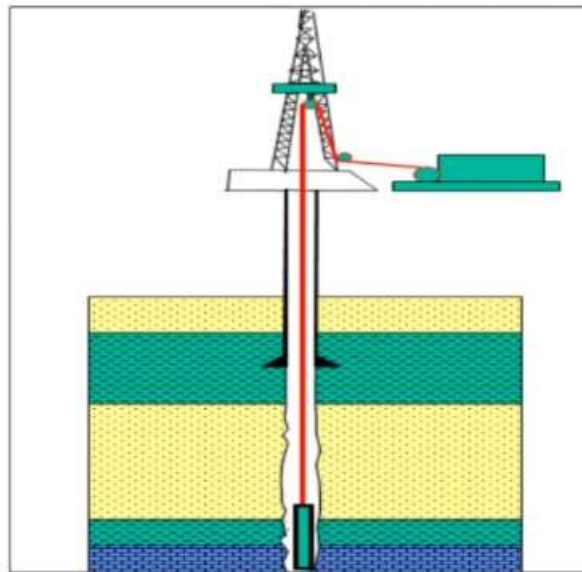
Pada tahap pengumpulan data yaitu mengumpulkan data-data yang akan digunakan berupa *mud log*, *wireline log* dan *leak off test* (LOT). Adapun pengambilan data dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Data *mudlog* yaitu memuat penggunaan berat lumpur pada saat pengeboran berlangsung dan juga memuat data *cutting* atau litologi serta *equivalen circulation density* (ECD).



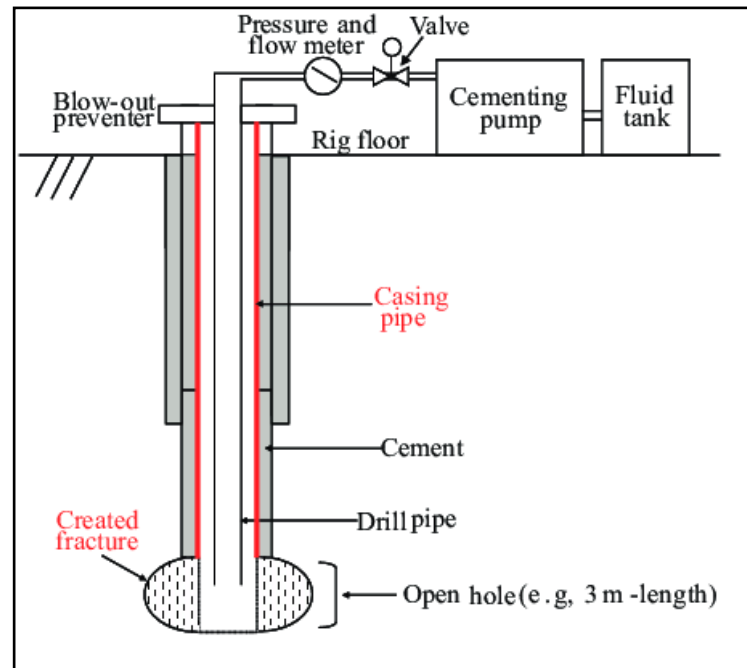
Gambar 14 Mekanisme pengambilan data mud log

2. Data wireline log (gamma ray, densitas, porositas, sonik, *caliper*, *bit size*) yang didapatkan dari pengukuran menggunakan alat *wireline logging* yang tergantung pada kabel atau kawat yang menanggungkan alat dan membawa data kembali ke permukaan. Proses perekaman data dilakukan pada saat pengeboran selesai. Perekaman data *wireline logging* pada sumur B dimulai dari kedalaman 500 meter.



Gambar 15 Mekanisme pengambilan data log sumur menggunakan metode *wireline logging*

3. Data *leak off test* (LOT) yang didapatkan pada saat *running* dan penyemenan *casing*, *drill out* kira kira 10 ft di bawah dudukan casing, menutup BOP, dan memompakan secara perlahan dan diamati perubahan tekanannya. Ketika tekanan mengalami penurunan secara tiba-tiba maka tekanan tersebut merupakan batas suatu formasi untuk mengalami rekah (*leak-off*). Hasil dari *leak-off test* berguna untuk menentukan gradient tekanan rekah pada batuan yang dapat digunakan sebagai validasi dari model geomekanika, karena tes ini memberikan respon batuan terhadap tekanan yang diberikan.



Gambar 16 Mekanisme *leak off test*

3.2.3 Tahap Pengolahan Data

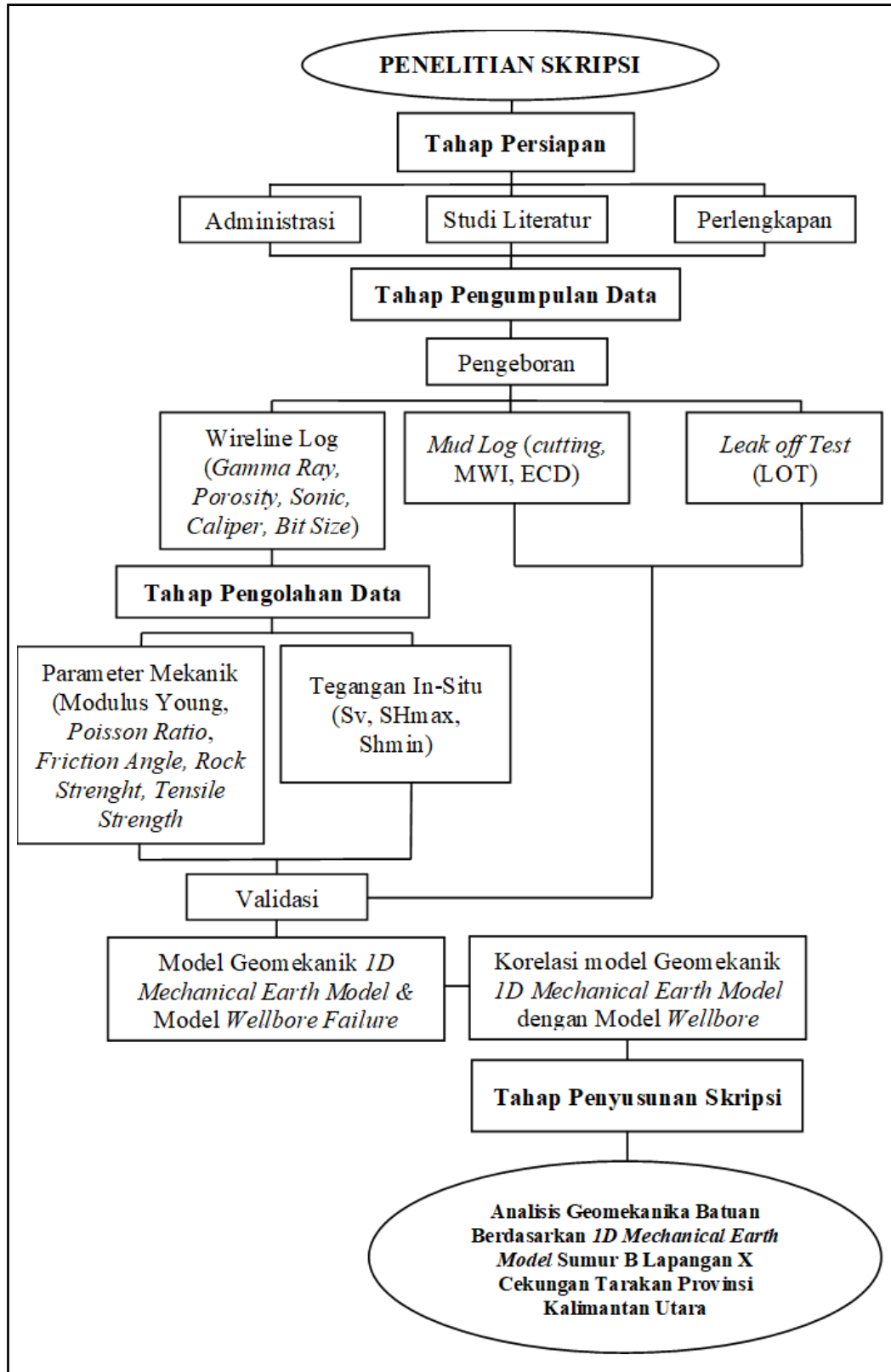
Pada tahapan ini, data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis dengan menggunakan *software Ms. Excel 2007* dan *Schlumberger Techlog64 2015.3*. Adapun Langkah-langkah pengolahan data sebagai berikut:

1. Perhitungan besar tekanan hidrostatik
2. Perhitungan besar tekanan pori dapat menggunakan log sonik menggunakan metode *Equivalent depth* dan Eaton.
3. Perhitungan parameter mekanik dilakukan dengan pengukuran tidak langsung menggunakan teknik pengukuran sifat geomekanik dinamis. Parameter geomekanik didapatkan dari perhitungan menggunakan data *wireline log (gamma ray, densitas, porosity, sonic)* dengan formula rumus. Modulus young didapatkan dari log sonik dan log densitas kemudian dikonversi menjadi modulus young statis. Nilai *poisson's ratio* didapatkan dari data log sonik dan dikonversi menjadi *poisson's ratio* statis. Nilai friction angle didapatkan dari log *porosity* (NPHI) dan perhitungan volume shale menggunakan data log *gamma ray*. Nilai UCS didapatkan dari nilai modulus young. Nilai tensile strength didapatkan dari 10% dari nilai UCS.

4. Perhitungan tegangan in situ yaitu tegangan *overburden* (S_v), tegangan horizontal maksimum ($S_{H_{max}}$) dan tegangan horizontal minimum ($S_{H_{min}}$). Tegangan *overburden* dihitung dengan persamaan berat satuan batuan yaitu 27 kN/m^3 . Tegangan horizontal dihitung dengan menggunakan nilai poisson ratio, tegangan *overburden*, tekanan pori, modulus young serta nilai minimum dan maksimum *horizontal strain*.
5. Pemodelan geomekanik berdasarkan *1D mechanical earth model* dibuat menggunakan aplikasi Schlumberger Techlog64 2015.3 dengan memasukkan semua nilai mekanik, tekanan pori, tekanan hidrostatik dan juga tegangan insitu
6. Model *wellbore failure* untuk penentuan *safe mud weight window* menggunakan aplikasi Schlumberger Techlog64 2015.3 berdasarkan parameter geomekanik. Nilai *kick* didapatkan dari perhitungan nilai tekanan pori. Nilai *breakout* didapatkan dari tegangan horizontal, friction angle, tekanan pori dan UCS. Nilai *loss* didapatkan dari perhitungan nilai tegangan horizontal minimum ($S_{H_{min}}$) atau tekanan rekah. Nilai *breakdown* didapatkan dari nilai tegangan horizontal, tekanan pori dan *tensile strength*.
7. Validasi model geomekanik berdasarkan *1D mechanical earth model* menggunakan plot nilai *leak off test* (LOT) sedangkan validasi model *wellbore failure* menggunakan plotting grafik ECD dan MWI dan juga dengan mengamati log caliper. Laporan hasil pemboran juga dapat digunakan untuk memvalidasi model dengan melihat kesesuaian model dengan kejadian-kejadian pada saat operasi pemboran yang tertuang didalam *drilling report*.
8. Korelasi antara model geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model* dengan model *wellbore failure* dengan melihat parameter geomekanika yang menyebabkan terjadinya *wellbore failure*.

3.2.4 Tahap Penyusunan Skripsi

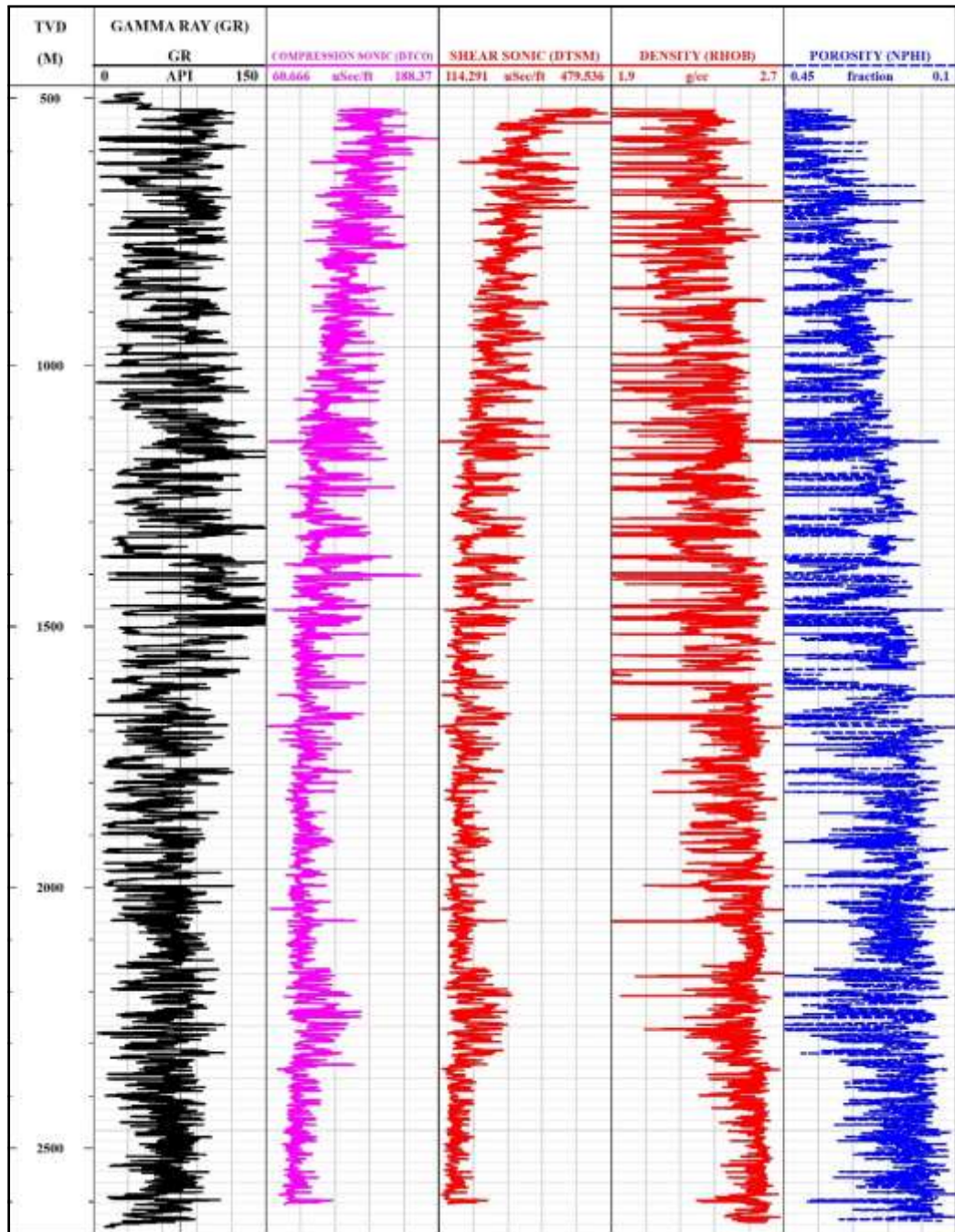
Tahap ini merupakan tahap akhir dari kegiatan penelitian. Pada tahapan ini semua data yang telah diolah akan disusun dalam bentuk tulisan ilmiah yaitu skripsi yang dapat dijadikan acuan atau referensi.



Gambar 17 Flow chart penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Log Bor Berdasarkan *Wireline Logging*



Gambar 18 Log bor sumur B berdasarkan *wireline logging*

Pada gambar 18 merupakan log bor sumur B berdasarkan *wireline logging* yang terdiri dari log *gamma ray* (GR), log sonik (*compressional sonic* dan *shear sonic*), log density (RHOB) dan porosity (NPHI). Kolom vertikal memperlihatkan nilai kedalaman sedangkan kolom horizontal menunjukkan besarnya nilai dari setiap log.

Pada kolom pertama yang merupakan TVD atau *true vertical depth* merupakan nilai kedalaman dalam satuan meter secara vertikal tanpa menggunakan nilai kedalaman berdasarkan panjang *trajectory*.

Pada kolom kedua dengan grafik berwarna hitam, merupakan log *gamma ray* (GR) yang memiliki satuan API (*American Petroleum Institute*), biasanya berada dalam skala 0-150 dari kiri ke kanan, di mana semakin ke kanan grafik *gamma ray*, nilai dari *gamma ray* semakin besar.

Pada kolom ketiga dengan grafik berwarna ungu, merupakan log *compressional sonic* (DTSM), memiliki satuan $\mu\text{sec}/\text{ft}$, di mana semakin ke kanan grafik *compressional sonic*, nilai dari *compressional sonic* semakin besar.

Pada kolom keempat dengan grafik berwarna merah, merupakan log *shear sonic* (DTCO) yang memiliki satuan $\mu\text{sec}/\text{ft}$ (mikrodetik per kaki), dimana semakin ke kanan grafik *shear sonic* maka semakin besar nilai dari *shear sonic*.

Pada kolom kelima dengan grafik berwarna merah, merupakan log Density (RHOB) yang memiliki satuan g/cc , semakin ke kanan grafik density maka semakin besar nilai dari log density.

Pada kolom keenam dengan grafik berwarna biru, merupakan log porosity (NPHI) dalam satuan fraksi dimana semakin kekanan grafik *porosity* maka semakin besar nilai dari porositas.

Tabel 3 Nilai log bor sumur B berdasarkan *wireline logging* pada setiap kedalaman 50 meter

No	DEPTH	GAMMA RAY (GR)	COMPRESSIONAL SONIC (DTCO)	SHEAR SONIC (DTSM)	DENSITY (RHOB)	POROSITY (NPHI)
	m	API	$\mu\text{sec}/\text{ft}$	$\mu\text{sec}/\text{ft}$	g/cm^3	fraction
1	500	44,143	137,701	434,470	1,808	0,809
2	550	106,692	137,194	393,696	2,282	0,503
3	600	85,591	151,670	264,559	2,218	0,512
4	650	96,004	129,396	265,794	2,396	0,442
5	700	87,016	138,972	254,151	2,272	0,343
6	750	107,230	140,329	296,040	2,361	0,455
7	800	73,915	125,546	231,935	2,448	0,300
8	850	26,327	125,846	240,102	2,131	0,329
9	900	26,575	115,918	245,036	2,141	0,311
10	950	26,973	131,797	274,526	2,105	0,365
11	1000	27,405	113,743	210,933	2,173	0,299
12	1050	41,438	108,440	213,206	2,215	0,271
13	1100	111,050	111,447	219,310	2,359	0,435
14	1150	85,313	96,603	201,787	2,473	0,255
15	1200	73,621	98,871	184,232	2,404	0,285
16	1250	76,505	89,835	193,330	2,479	0,241
17	1300	52,371	90,081	163,937	2,347	0,213
18	1250	94,904	110,791	241,220	2,187	0,458
19	1400	11,169	147,914	247,361	1,217	0,852
20	1450	109,195	95,270	177,860	2,455	0,334
21	1500	103,230	87,924	173,312	2,567	0,259
22	1550	79,421	89,546	153,625	2,502	0,196
23	1600	23,066	99,475	182,634	2,211	0,289
24	1650	70,459	112,046	220,780	2,457	0,287

No	DEPTH	GAMMA RAY (GR)	COMPRESSIONAL SONIC (DTCO)	SHEAR SONIC (DTSM)	DENSITY (RHOB)	POROSITY (NPHI)
	m	API	$\mu\text{sec}/\text{ft}$	$\mu\text{sec}/\text{ft}$	g/cm^3	fraction
25	1700	72,684	101,993	193,855	2,525	0,263
26	1750	78,933	86,508	163,432	2,492	0,358
27	1800	21,766	87,217	173,124	2,325	0,202
28	1850	19,374	110,239	196,127	2,378	0,180
29	1900	83,765	89,916	166,017	2,537	0,288
30	1950	63,852	94,059	186,922	2,584	0,184
31	2000	51,740	94,297	183,027	2,494	0,199
32	2050	31,270	92,832	181,959	2,471	0,150
33	2100	61,076	80,774	139,266	2,400	0,181
34	2150	73,548	95,209	181,391	2,538	0,235
35	2200	72,463	87,458	156,681	2,518	0,259
36	2250	84,515	95,220	192,408	2,482	0,340
37	2300	65,099	93,971	174,826	2,547	0,212
38	2350	97,571	107,286	213,393	2,532	0,348
39	2400	64,683	79,940	128,304	2,610	0,168
40	2450	86,326	95,070	182,062	2,469	0,274
41	2500	65,792	79,170	140,436	2,607	0,189
42	2550	43,759	79,955	128,998	2,501	0,128
43	2600	89,638	90,747	168,954	2,583	0,250
44	2650	41,218	74,266	163,467	2,610	0,131
45	2700	36,305	74,183	196,127	2,612	0,135

Pada tabel 3 merupakan nilai dari log bor berdasarkan *wireline logging* yang terdiri dari log *gamma ray*, *compressional sonic*, *shear sonic*, *density* dan *porosity* yang ditampilkan pada setiap kedalaman 50 meter.

Log bor pada sumur B lapangan X didapatkan dari pengukuran menggunakan metode *wireline logging*, pengukuran dilakukan setelah proses pemboran selesai. Data *wireline logging* bervariasi tergantung kebutuhan dan spesifik, namun dalam analisis geomekanika dapat menggunakan log *gamma ray*, sonik, densitas, dan *porosity*. Pengambilan data *wireline logging* dimulai pada kedalaman 500 meter TVD atau *true vertical depth* dimana perhitungan kedalaman dilakukan secara vertikal dari permukaan ke titik tertentu di dalam sumur bor atau formasi geologi.

Log *gamma ray* mengukur radioaktivitas alami dalam formasi dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi litologi, zona korelasi dan volume *shale*. Intensitas sinar gamma yang tinggi menunjukkan adanya formasi shale, sedangkan intensitas sinar gamma yang rendah menunjukkan adanya formasi pasir dikarenakan lapisan *shale* mengandung banyak unsur radioaktif. Berdasarkan gambar log *gamma ray*, ditemukan bahwa formasi di sekitar sumur bor terdiri dari lapisan-lapisan batuan dengan ketebalan bervariasi.

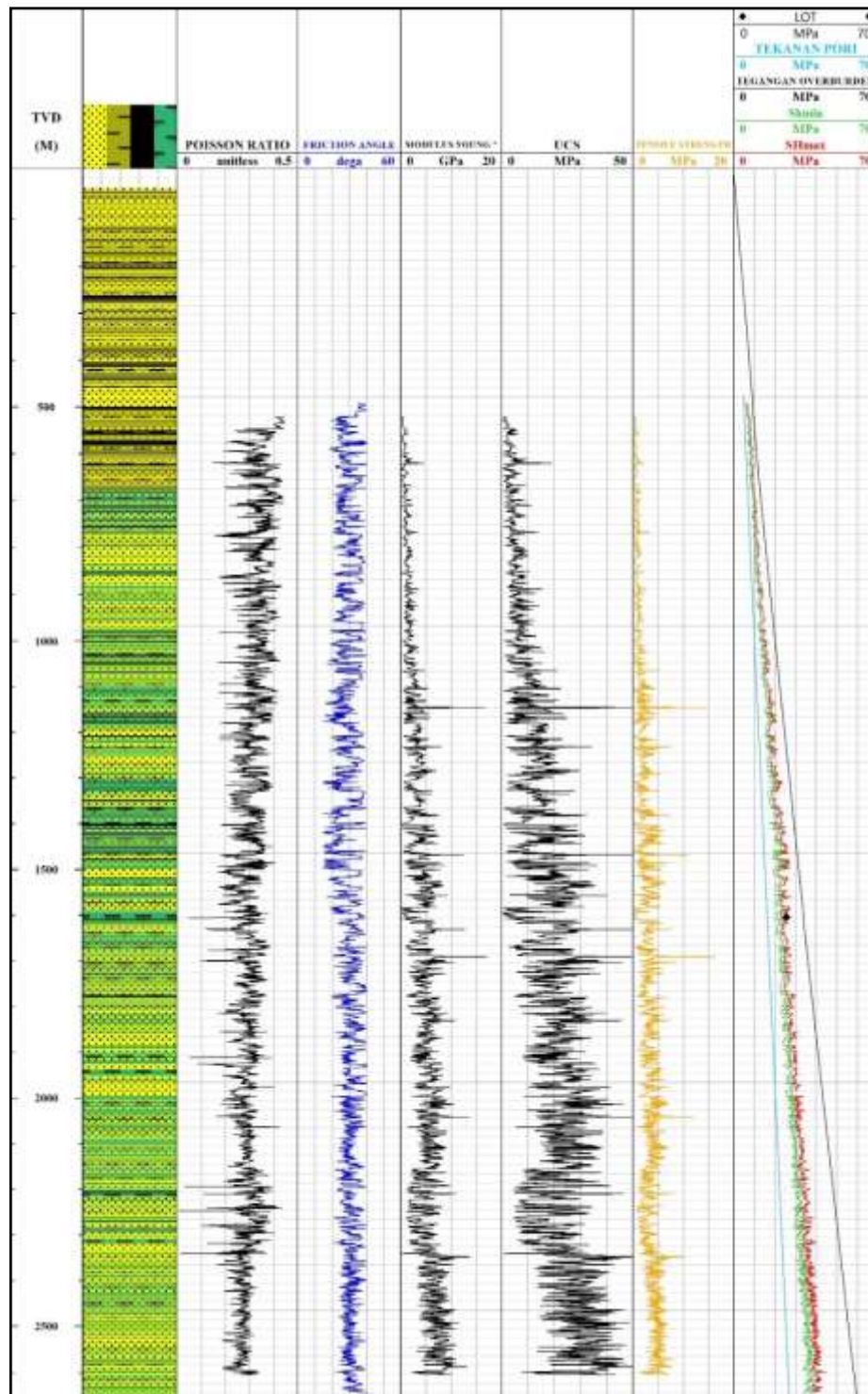
Log sonik menunjukkan kecepatan gelombang bunyi yang merambat melalui formasi di sekitar sumur bor. Dari hasil log sonik ini, dapat dilihat bahwa formasi di sekitar sumur bor memiliki kecepatan gelombang bunyi yang berbeda-beda, yang mengindikasikan adanya lapisan-lapisan batuan dengan karakteristik yang berbeda-beda. Log sonik terdiri dari *compressional sonic* (DTCO) dan *shear sonic* (DTSM). Pada umumnya, nilai *shear sonic* lebih tinggi daripada nilai *compressional sonic* dalam batuan. Hal ini dikarenakan gelombang *shear sonic* merambat dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada gelombang *compressional sonic* dalam medium padat. Nilai log sonik yang lebih besar menunjukkan kepadatan batuan yang lebih tinggi atau kekakuan yang lebih besar. Batuan yang padat atau keras umumnya memiliki kecepatan perambatan gelombang suara yang lebih tinggi, sedangkan batuan yang lebih porous atau lemah cenderung memiliki kecepatan yang lebih rendah.

Log densitas (RHOB) adalah log yang menunjukkan tingkat kepadatan batuan di sekitar sumur bor dalam satuan g/cc atau gr/cm^3 . Batuan dengan densitas yang lebih tinggi memiliki partikel yang lebih rapat atau lebih banyak bahan padat yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, semakin tinggi nilai log densitas, semakin tinggi pula kepadatan batuan tersebut.

Log neutron atau *porosity* (NPHI) adalah log yang menunjukkan tingkat porositas batuan di sekitar sumur bor dalam satuan fraksi atau persentase pori. Dalam interpretasi formasi, log neutron porosity (NPHI) digunakan untuk mengidentifikasi jenis batuan dan perkiraan sifat-sifat batuan seperti porositas, saturasi air, dan saturasi hidrokarbon. Batuan yang memiliki porositas tinggi, seperti batu pasir dan batu kapur, akan menunjukkan nilai NPHI yang lebih tinggi, sedangkan batuan yang rapat dan kurang berpori, seperti batuan sedimen *shale*, biasanya akan menunjukkan nilai NPHI yang lebih rendah.

Log bor menunjukkan jenis batuan berdasarkan tingkat radioaktifitasnya, kepadatan/kekerasan batuan berdasarkan kecepatan gelombang, memberikan informasi tentang kepadatan batuan berdasarkan densitas, tingkat porositas batuan serta sifat-sifat mekanik batuan. Litologi yang dijumpai pada sumur B adalah batulempung, batubara, batupasir dan batulanau. Log bor sumur B lapangan X yang merupakan data yang nantinya digunakan dalam menganalisis geomekanika batuan berdasarkan 1D *mechanical earth model*.

4.2 Pemodelan Geomekanika Batuan Berdasarkan *ID Mechanical Earth Model*



Gambar 19 Log geomekanika batuan berdasarkan *ID mechanical earth model*

Pada gambar 19 memperlihatkan log model geomekanika batuan *berdasarkan 1D mechanical earth model* yang terdiri dari log litologi, *poisson's ratio*, *friction angle*, modulus young, *unconvined compressive strength (UCS)*, *tensile strength* dan tegangan insitu. Kolom vertikal memperlihatkan nilai kedalaman sedangkan kolom horizontal menunjukkan besarnya nilai dari setiap log.

Pada kolom pertama yang merupakan TVD atau *true vertical depth* merupakan nilai kedalaman dalam satuan meter secara vertikal tanpa menggunakan nilai kedalaman berdasarkan panjang *trajectory*.

Pada kolom kedua yang merupakan log litologi merupakan profil litologi secara vertikal dari sumur B.

Kolom ketiga yang merupakan log *poissons's ratio* yang memiliki nilai 0-0,5 dimana semakin ke kanan grafik *poissons's ratio* maka semakin besar pula nilai dari *poissons's ratio*.

Kolom keempat yang merupakan log *friction angle*/sudut geser yang memiliki satuan derajat, dimana semakin ke kanan grafik *friction angle* maka semakin besar pula nilai dari *friction angle*.

Kolom kelima yang merupakan log modulus young dengan satuan GPa yang dimana semakin ke kanan grafik modulus young maka semakin besar nilai dari modulus young tersebut.

Kolom keenam yang merupakan log *unconvined compression strength (UCS)* yang memiliki satuan MPa dimana semakin ke kanan grafik UCS maka semakin besar nilai dari UCS tersebut

Kolom ketujuh yang merupakan log *tensile strength* yang memiliki satuan MPa, dimana semakin ke kanan grafik UCS maka semakin besar nilai dari *tensile strength* tersebut.

Kolom kedelapan merupakan log tegangan insitu yang terdiri dari tegangan vertikal/*overburden (Sv)*, tegangan horizontal maksimum (*SHmax*), tegangan horizontal minimum (*Shmin*), tekanan pori dan nilai *leak off test*.

Tabel 4 Nilai geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model* setiap kedalaman 50 meter

No	TVD Depth	<i>Unconvined Compressive Stength (UCS)</i>	<i>Tensile Stength</i>	<i>Poisson's Ratio</i>	<i>Friction Angle</i>	Modulus Young	Tekanan Vertikal	Tekanan Pori	Sh _{min}	SH _{max}	Litologi
	(m)	(MPa)	(MPa)	(Unitless)	(°)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	Batubara
1	500	0,6270	0,144	0,444	34,223	0,1480	9,0200	5,2200	6,4260	7,0690	Batulempung
2	550	1,2420	0,371	0,430	22,495	0,2930	9,6690	5,2870	7,2450	7,9690	Batulempung
3	600	3,4880	0,347	0,255	26,451	0,8225	10,683	5,7610	7,6490	8,4140	Batulempung
4	650	4,3550	0,759	0,344	24,499	1,0267	11,650	6,2430	8,4800	9,3280	Batulanau
5	700	4,3010	0,520	0,286	26,184	1,0141	12,701	6,7330	9,0460	9,9510	Batubara
6	750	3,0350	0,531	0,355	22,394	0,7155	13,814	7,2290	10,180	11,198	Batupasir
7	800	6,5810	0,842	0,292	28,640	1,5516	14,893	7,7300	10,251	11,276	Batubara
8	850	4,8020	0,459	0,310	37,563	1,1321	15,987	8,2350	10,115	11,126	Batupasir
9	900	4,7870	0,602	0,355	37,517	1,1286	17,069	8,7430	10,766	11,843	Batulanau
10	950	3,1980	0,354	0,350	37,442	0,7540	18,215	9,2520	11,437	12,581	Batubara
11	1000	7,4050	0,730	0,295	37,361	1,7458	19,361	9,7620	12,111	13,323	Batulanau
12	1050	7,6620	0,989	0,325	34,730	1,8065	20,474	10,271	13,068	14,375	Batulanau
13	1100	7,7430	1,404	0,325	21,678	1,8256	21,604	10,780	15,765	17,342	Batupasir
14	1150	11,299	2,431	0,351	26,503	2,6639	22,747	11,289	15,677	17,244	Batulempung
15	1200	13,579	2,104	0,297	28,696	3,2015	23,936	11,797	16,060	17,666	Batupasir
16	1250	13,206	3,035	0,362	28,155	3,1135	25,076	12,306	16,888	18,577	Batupasir
17	1300	18,748	2,582	0,283	32,680	4,4202	26,230	12,815	16,822	18,504	Batulanau
18	1350	5,2800	1,112	0,366	24,705	1,2448	27,390	13,324	19,097	21,007	Batubara
19	1400	1,5670	0,069	0,221	40	0,3695	28,496	13,832	17,021	18,723	Batubara
20	1450	15,777	2,920	0,298	22,025	3,7196	29,613	14,341	21,282	23,410	Batulanau
21	1500	19,094	4,289	0,326	23,144	4,5018	30,808	14,850	21,802	23,983	Batupasir
22	1550	24,364	3,510	0,242	27,608	5,7442	31,948	15,359	21,441	23,585	Batulanau
23	1600	12,067	1,253	0,289	38,175	2,8450	33,148	15,869	19,948	21,943	Batulanau
24	1650	8,1040	1,276	0,326	29,288	1,9107	33,987	16,378	22,418	24,660	Batulanau

No	TVD Depth	<i>Unconvined Compressive Stength (UCS)</i>	<i>Tensile Stength</i>	<i>Poisson's Ratio</i>	<i>Friction Angle</i>	<i>Modulus Young</i>	<i>Tekanan Vertikal</i>	<i>Tekanan Pori</i>	<i>Sh_{min}</i>	<i>SH_{max}</i>	<i>Litologi</i>
	(m)	(MPa)	(MPa)	(Unitless)	(°)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	Batubara
25	1700	12,634	2,024	0,3086	28,871	2,9787	35,205	16,887	23,276	25,604	Batulanau
26	1750	21,439	3,950	0,305	27,699	5,0546	36,409	17,395	24,342	26,777	Batupasir
27	1800	16,385	2,242	0,329	38,418	3,8630	37,625	17,904	22,509	24,759	Batubara
28	1850	10,502	0,936	0,269	38,867	2,4759	38,823	18,413	23,084	25,392	Batulanau
29	1900	20,642	3,630	0,292	26,794	4,8666	40,046	18,922	26,918	29,610	Batulanau
30	1950	15,164	2,720	0,330	30,527	3,5751	41,253	19,431	26,551	29,206	Batupasir
31	2000	15,123	2,362	0,3193	32,798	3,5654	42,483	19,939	26,641	29,305	Batulanau
32	2050	15,277	2,137	0,324	36,636	3,6019	43,695	20,448	26,319	28,951	Batupasir
33	2100	31,473	4,401	0,246	31,048	7,4201	44,928	20,957	28,614	31,476	Batupasir
34	2150	15,832	2,704	0,309	28,709	3,7327	46,178	21,467	30,142	33,156	Batupasir
35	2200	24,029	3,776	0,273	28,913	5,6652	47,426	21,976	30,838	33,922	Batulanau
36	2250	13,048	2,651	0,337	26,653	3,0764	48,645	22,485	32,444	35,688	Batupasir
37	2300	17,657	2,758	0,296	30,293	4,1629	49,865	22,994	31,846	35,030	Batupasir
38	2350	9,5490	1,848	0,330	24,205	2,2514	51,074	23,502	35,040	38,544	Batulanau
39	2400	43,196	5,306	0,182	30,371	10,1839	52,310	24,011	33,306	36,636	Batulanau
40	2450	15,014	2,752	0,3125	26,313	3,5398	53,555	24,520	35,719	39,291	Batupasir
41	2500	35,970	5,805	0,2670	30,164	8,4803	54,817	25,029	34,892	38,381	Batulanau
42	2550	39,912	4,295	0,188	34,295	9,4097	56,083	25,537	34,066	37,473	Batupasir
43	2600	20,197	3,730	0,297	25,692	4,7617	57,347	26,046	38,414	42,255	Batulanau
44	2650	42,751	7,031	0,265	30,689	10,0791	58,599	26,460	35,630	39,194	Batupasir
45	2700	43,200	6,550	0,268	33,603	10,1850	59,887	26,555	37,458	41,204	Batulanau

Pada tabel 4 merupakan nilai dari log geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model* yang terdiri dari litologi, *poisson's ratio*, *friction angle*, modulus young, ucs, tensile strength dan tegangan insitu (tekanan pori, tekanan vertikal, SHmax dan Shmin) pada setiap kedalaman 50 meter sepanjang lubang sumur.

Model geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model* dapat dilihat pada gambar 19 Perhitungan nilai mekanik dimulai dari kedalaman 500 meter disebabkan pengambilan/perekaman data *wireline logging* dimulai dari kedalaman 500 meter. Proses pemboran dimulai dari permukaan sehingga data *cutting* litologi dan tegangan overburden dimulai dari kedalaman 0 meter.

Log litologi menggunakan data *cutting* yang merupakan material batuan yang djumpai saat proses pengeboran. Dari data *cutting* yang digunakan didapatkan empat jenis litologi yaitu batupasir, batubara, batulanau, dan batulempung.

Nilai *poisson's ratio* didapatkan dari log sonik (*compressional sonic* dan *shear sonic*). *Poisson's ratio* berkisar antara 0 hingga 0,5. Nilai *poisson's ratio* yang rendah menunjukkan bahwa formasi tersebut relatif kaku dan tidak elastis, sedangkan *Poisson's ratio* yang tinggi menunjukkan bahwa formasi tersebut lebih elastis. Nilai *poisson's ratio* harus dikonversi dari *poisson's ratio* dinamis menjadi *poisson's ratio* statis hal ini bertujuan agar hasil perhitungan mendekati kondisi sebenarnya, dimana $v_{statis}=0,7v_{dinamis}$ berdasarkan hasil pengujian disalah satu sumur pada lapangan X.

Friction angle didapatkan dari log porositas (NPHI) dan perhitungan *volume shale* menggunakan nilai log *gamma ray*. *Friction angle* yang tinggi menunjukkan bahwa formasi tersebut relatif stabil dan kuat, sedangkan *friction angle* yang rendah menunjukkan bahwa formasi tersebut lebih mudah bergeser.

Modulus young merupakan kemampuan batuan untuk mempertahankan kondisi elastisnya. Modulus Young didapatkan dari log sonik (*compressional sonic* dan *shear sonic*) dan log densitas (RHOB). Grafik log modulus young yang tinggi menunjukkan bahwa formasi tersebut memiliki kekakuan yang tinggi, sedangkan kurva yang rendah menunjukkan kekakuan yang rendah. Semakin tinggi modulus Young batuan, semakin sulit bagi batuan tersebut untuk mengalami deformasi atau perubahan bentuk ketika dikenai tekanan atau gaya. Nilai modulus young harus dikonversi dari modulus young dinamis menjadi statis hal ini bertujuan agar hasil

perhitungan mendekati kondisi sebenarnya, dimana $E_{\text{statis}}=0,725E_{\text{dinamis}}$ berdasarkan hasil pengujian disalah satu sumur pada lapangan X.

Unconfined compressive strength (UCS) didapatkan dari nilai modulus young yang dikonversi menjadi modulus young statis. Nilai UCS merupakan nilai dari kekuatan batuan. Semakin tinggi nilai UCS maka semakin tinggi nilai kekuatan batuan.

Tensile strength adalah gaya tarik yang diperlukan untuk memecah batuan, *tensile strength* didapatkan dari nilai *unconfined compressive strength* (UCS). Nilai *tensile strength* yang semakin besar menunjukkan bahwa formasi tersebut menjadi lebih kuat terhadap gaya tarik.

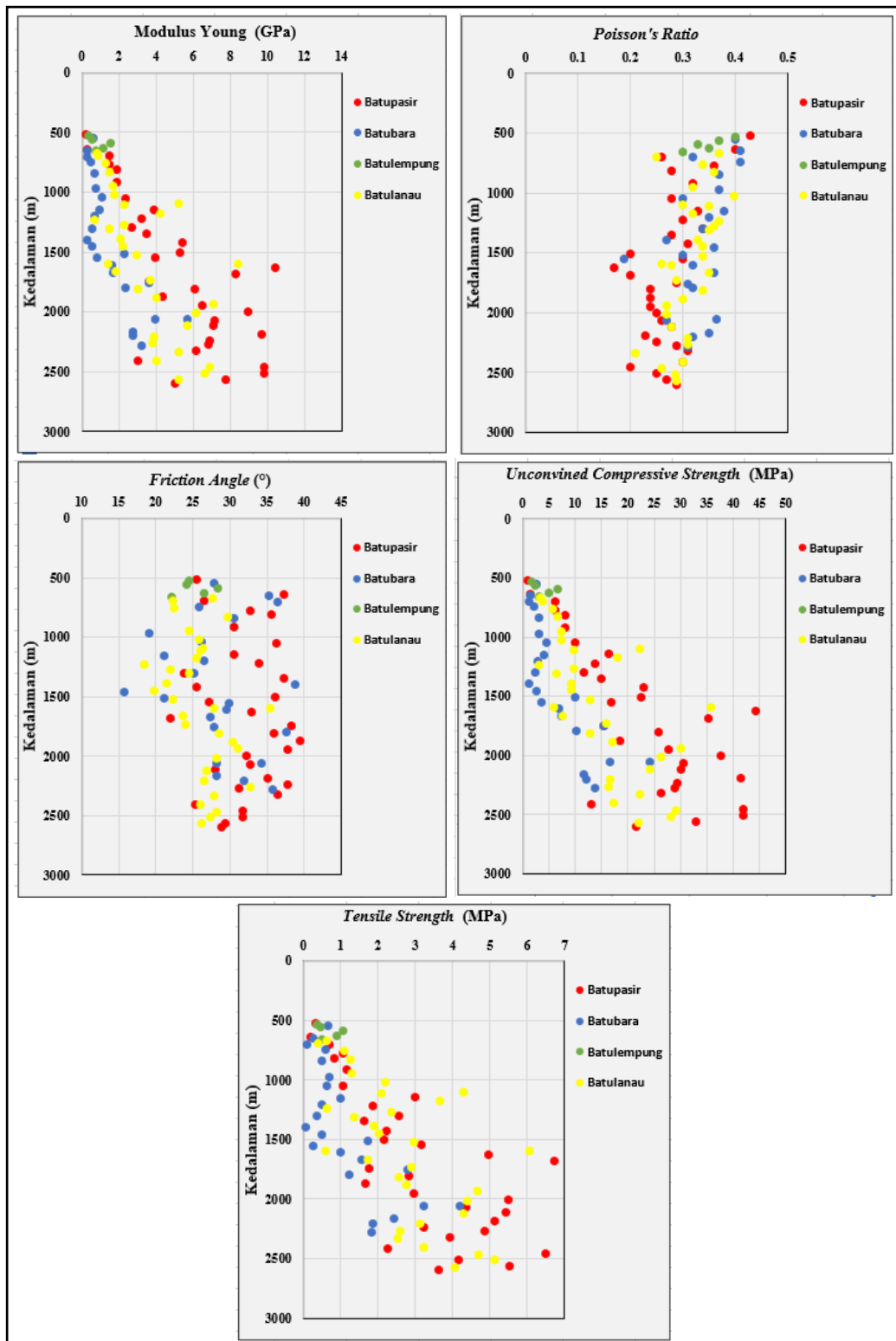
Untuk mendapatkan nilai tekanan pori dapat menggunakan metode *Equivalent depth* dan metode Eaton menggunakan log sonik, tekanan hidrostatik dan tegangan *overburden*. Jika tekanan pori menjadi terlalu tinggi, dapat mengurangi kekuatan batuan, sehingga lebih rentan terhadap kerusakan seperti keruntuhan.

Nilai tegangan *overburden* didapatkan dari berat satuan batuan menurut Sivakugan et al (2013) yaitu 27 kN/m³ atau 0,027 MPa. Tegangan *overburden* dapat mempengaruhi sifat dan perilaku batuan, seperti kekuatan, deformasi, dan permeabilitas. Tekanan yang disebabkan oleh lapisan *overburden* dapat memadatkan batuan di bawahnya, sehingga meningkatkan kepadatan dan kekuatan. Namun, jika tekanan *overburden* menjadi terlalu besar, dapat menyebabkan deformasi dan retak pada batuan, yang dapat mengakibatkan kegagalan atau keruntuhan.

SH_{max} dan Sh_{min} didapatkan dari *poisson's ratio*, tekanan pori, tegangan *overburden*, modulus young, koefisien biot, dan tektonik strain. Semakin besar tegangan horizontal maksimum dan minimum, maka semakin besar pula gaya geser atau gaya lateral yang bekerja pada batuan di bawah permukaan bumi. Hal ini dapat mempengaruhi stabilitas batuan dan kemungkinan terjadinya retak atau patahan. Selain itu, besar kecilnya tegangan horizontal maksimum dan minimum juga dapat mempengaruhi orientasi patahan pada lokasi penelitian.

Nilai *leak off test* (LOT) digunakan untuk memvalidasi model geomekanika yang telah dibuat. *Leak off test* digunakan untuk memperkirakan kemampuan

formasi untuk menahan tekanan dan memperkirakan tekanan fraktur atau rekah (Sh_{min}) pada formasi. Sehingga untuk memvalidasi model geomekanika nilai pengukuran LOT harus sama dengan nilai Sh_{min} yang telah dihitung. Nilai *leak off test* yang didapatkan pada saat pengujian adalah pada kedalaman 1.605,41 meter TVD sebesar 1.622 SG atau 25,5189 MPa.



Gambar 20 Grafik penyebaran nilai mekanik vs kedalaman yang memperlihatkan nilai mekanik yang bervariasi

Gambar 20 menampilkan perbandingan nilai mekanik, seperti *poisson's ratio*, *friction angle*, modulus young, *unconfined compressive strength*, dan *tensile strength*, dalam hubungannya dengan kedalaman. Dengan mengamati gambar ini, kita dapat melihat bagaimana nilai-nilai mekanik ini berubah seiring dengan peningkatan kedalaman.

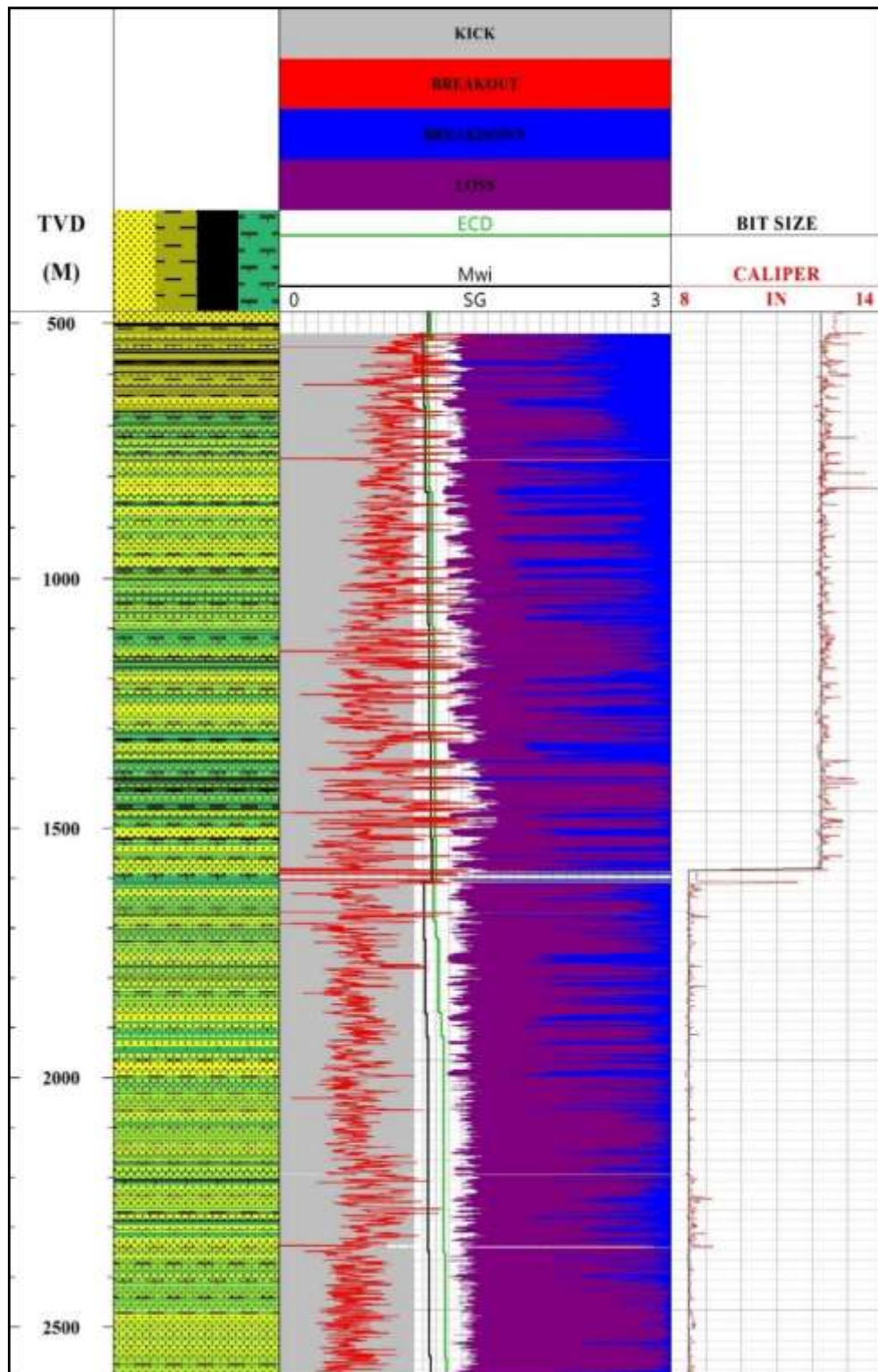
Pada umumnya, perubahan kedalaman dapat berpengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanik batuan. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi perbedaan nilai mekanik batuan pada kedalaman yang berbeda.

Perbedaan nilai mekanik pada batuan dapat dipengaruhi oleh:

1. Tekanan litostatik/*overburden* meningkat seiring dengan kedalaman karena berat batuan di atasnya. Tekanan ini dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik batuan, seperti kekuatan dan kekakuan. Tekanan litostatik meningkat dapat menyebabkan peningkatan kepadatan dan penurunan porositas batuan.
2. Peningkatan tegangan dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanik batuan, seperti kekuatan dan deformabilitas. Nilai parameter geomekanik seperti kekuatan geser (*shear strength*) batuan dapat berubah dengan tingkat tegangan dalam yang berbeda pada kedalaman yang berbeda.
3. Kehadiran dan orientasi struktur geologi dapat mempengaruhi kekuatan, kekakuan, dan deformabilitas batuan.
4. Suhu dapat mempengaruhi kekuatan batuan, peningkatan suhu menyebabkan penurunan kekuatan batuan. Perubahan suhu berpengaruh pada tegangan dan regangan. Serta besar ketidakpastian suhu di mana rekahan tarik terbentuk

Model geomekanika menghasilkan nilai mekanik yang bervariasi dari litologi batulempung, batubara, batupasir dan batulanau. Dari model geomekanika batuan dilihat bahwa nilai $S_V > S_{H_{max}} > S_{H_{min}}$ maka besaran tegangan relatif dan rezim sesar menurut E.M. Anderson pada lokasi penelitian berada pada rezim sesar normal.

4.3 Kestabilan Sumur Berdasarkan *Wellbore Failure*



Gambar 21 Model *wellbore failure* sumur B

Pada gambar 21 memperlihatkan log model *wellbore failure* sumur B yang terdiri dari log litologi, log wellbore failure, log caliper dan bit size. Kolom vertikal memperlihatkan nilai kedalaman sedangkan kolom horizontal menunjukkan besarnya nilai dari setiap log.

Pada kolom pertama yang merupakan TVD atau *true vertical depth* merupakan nilai kedalaman dalam satuan meter secara vertikal tanpa menggunakan nilai kedalaman berdasarkan panjang *trajectory*.

Pada kolom kedua yang merupakan log litologi merupakan profil litologi secara vertikal dari sumur B.

Pada kolom ketiga yang merupakan log wellbore failure yang terdiri dari kick (berwarna abu-abu), breakout (berwarna merah), loss (berwarna ungu) dan breakdown (berwarna biru) yang ditampilkan dalam satuan SG atau g/cm^3 , dimana semakin ke kanan grafik pada model wellbore failure maka semakin besar pula nilainya.

Pada kolom keempat yang merupakan log caliper (warna merah) yang merupakan besar ukuran diameter lubang bor dan bit size (warna hitam) yang merupakan ukuran dari mata bor yang digunakan pada saat pemboran ditampilkan dalam satuan inchi.

Tabel 5 Nilai *wellbore failure* sumur B pada setiap kedalaman 50 meter

No	Depth	Kick	Breakout	Loss	Breakdown	MWI	ECD	Bit Size	Caliper
	(m)	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	In	In
1	500	1.024	1.310	1.261	1.356	1.14	1.16	12.25	12.818
2	550	1.024	1.160	1.404	2.316	1.1	1.13	12.25	12.769
3	600	1.025	1.023	1.362	2.056	1.1	1.13	12.25	12.242
4	650	1.026	0.869	1.394	2.534	1.1	1.13	12.25	12.322
5	700	1.027	0.842	1.380	2.456	1.12	1.15	12.25	12.490
6	750	1.028	1.022	1.448	2.544	1.12	1.15	12.25	12.493
7	800	1.029	0.673	1.364	2.548	1.12	1.15	12.25	12.284
8	850	1.029	0.943	1.264	1.698	1.12	1.15	12.25	12.277
9	900	1.030	0.931	1.268	1.744	1.14	1.17	12.25	12.234
10	950	1.030	1.045	1.273	1.645	1.14	1.17	12.25	12.670
11	1000	1.030	0.857	1.278	1.805	1.14	1.17	12.25	12.286
12	1050	1.031	0.801	1.312	2.033	1.14	1.17	12.25	12.161
13	1100	1.031	0.951	1.508	2.753	1.14	1.17	12.25	12.478
14	1150	1.031	0.626	1.432	2.944	1.15	1.18	12.25	12.324
15	1200	1.032	0.619	1.404	2.670	1.15	1.18	12.25	12.308
16	1250	1.032	0.585	1.416	2.909	1.15	1.18	12.25	12.432
17	1300	1.032	0.526	1.355	2.492	1.15	1.18	12.25	12.137
18	1350	1.032	1.061	1.480	2.444	1.15	1.18	12.25	12.358
19	1400	1.033	1.257	1.271	1.387	1.16	1.19	12.25	12.957
20	1450	1.033	0.748	1.533	3.117	1.16	1.19	12.25	12.347
21	1500	1.033	0.655	1.516	3.180	1.16	1.19	12.25	12.245
22	1550	1.033	0.450	1.442	2.976	1.16	1.19	12.25	12.275
23	1600	1.033	0.863	1.299	1.866	1.17	1.2	12.25	12.143
24	1650	1.033	0.724	1.388	2.546	1.11	1.18	8.5	8.669
25	1700	1.033	0.677	1.424	2.769	1.11	1.18	8.5	8.482
26	1750	1.034	0.634	1.446	2.800	1.11	1.2	8.5	8.577

No	Depth	Kick	Breakout	Loss	Breakdown	MWI	ECD	Bit Size	Caliper
	(m)	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	gr/cm ³	In	In
27	1800	1.034	0.712	1.300	2.075	1.12	1.22	8.5	8.460
28	1850	1.034	0.744	1.296	2.043	1.12	1.22	8.5	8.470
29	1900	1.034	0.624	1.471	2.983	1.12	1.22	8.5	8.552
30	1950	1.034	0.601	1.413	2.829	1.13	1.24	8.5	8.514
31	2000	1.034	0.636	1.382	2.586	1.14	1.26	8.5	8.500
32	2050	1.034	0.620	1.331	2.372	1.14	1.26	8.5	8.470
33	2100	1.034	0.481	1.412	2.763	1.14	1.26	8.5	8.514
34	2150	1.034	0.672	1.452	2.885	1.14	1.26	8.5	8.501
35	2200	1.034	0.603	1.452	2.867	1.14	1.26	8.5	8.536
36	2250	1.034	0.833	1.493	2.841	1.14	1.26	8.5	8.476
37	2300	1.035	0.638	1.433	2.811	1.14	1.26	8.5	8.583
38	2350	1.035	0.923	1.543	3.012	1.14	1.26	8.5	8.544
39	2400	1.035	0.356	1.435	2.956	1.15	1.27	8.5	8.509
40	2450	1.035	0.796	1.507	2.963	1.15	1.27	8.5	8.476
41	2500	1.035	0.455	1.443	2.981	1.15	1.27	8.5	8.514
42	2550	1.035	0.401	1.380	2.689	1.15	1.27	8.5	8.510
43	2600	1.035	0.767	1.526	3.048	1.16	1.28	8.5	8.533
44	2650	1.035	0.603	1.504	3.138	1.16	1.28	8.5	8.585
45	2700	1.035	0.358	1.394	2.868	1.17	1.29	8.5	8.705

Pada tabel 5 merupakan nilai dari log wellbore failure yang terdiri dari *kick*, *breakout*, *loss*, *breakdown* serta nilai ukuran caliper dan bit size pada setiap kedalaman 50 meter sepanjang lubang sumur.

Dari model *wellbore failure* dapat ditentukan kestabilan sumur berdasarkan zona *safe mud weight window*. *Wellbore Failure* diperoleh dengan memasukan hasil dari nilai *kick*, *breakout*, *breakdown* dan *loss circulation*. Model *wellbore failure* didapatkan dari hasil perhitungan parameter-parameter geomekanika yang telah didapatkan sebelumnya. Model *wellbore failure* sumur B lapangan X dapat dilihat pada gambar 21. Model *wellbore failure* digunakan untuk mengetahui dimana zona kestabilan sumur diantara *kick*, *breakout*, *loss circulation*, dan *breakdown*.

Dari model *wellbore failure* dapat ditentukan kestabilan sumur yang dideskripsikan sebagai berikut:

1. Zona yang beresiko mengalami influks hidrokarbon, atau yang sering disebut dengan istilah *kick*, ditandai dengan zona berwarna abu-abu. Zona tersebut dibatasi oleh *pore pressure*, sehingga semua berat lumpur yang berada dibawah grafik tersebut akan berpotensi mengalami *kick*. Zona ini juga dapat menjadi penanda terjadinya sumur runtuh (*wellbore collapse/breakout*).
2. Zona merah menunjukkan sumur akan mengalami *breakout* atau keruntuhan. Sehingga berat lumpur yang berada dibawah grafik tersebut berpotensi membuat dinding sumur runtuh. *Breakout* pada sebelah kanan dibatasi oleh zona stabil (*stable mud window*).
3. Zona berwarna putih merupakan *safe mud window*. Zona ini dibatasi oleh *Breakout* dan pada bagian kanan dibatasi oleh *Shmin* atau *loss*. Berat lumpur yang berada pada zona tersebut menunjukkan sumur akan tetap pada diameter yang benar tanpa adanya *lost circulation* ataupun *breakout*.
4. Zona berwarna ungu menunjukkan sumur akan mengalami *loss circulation* (fluida pemboran masuk kedalam formasi) bila berat lumpur mencapai daerah tersebut. Daerah ini dibatasi antara zona stabil dengan *breakdown*,

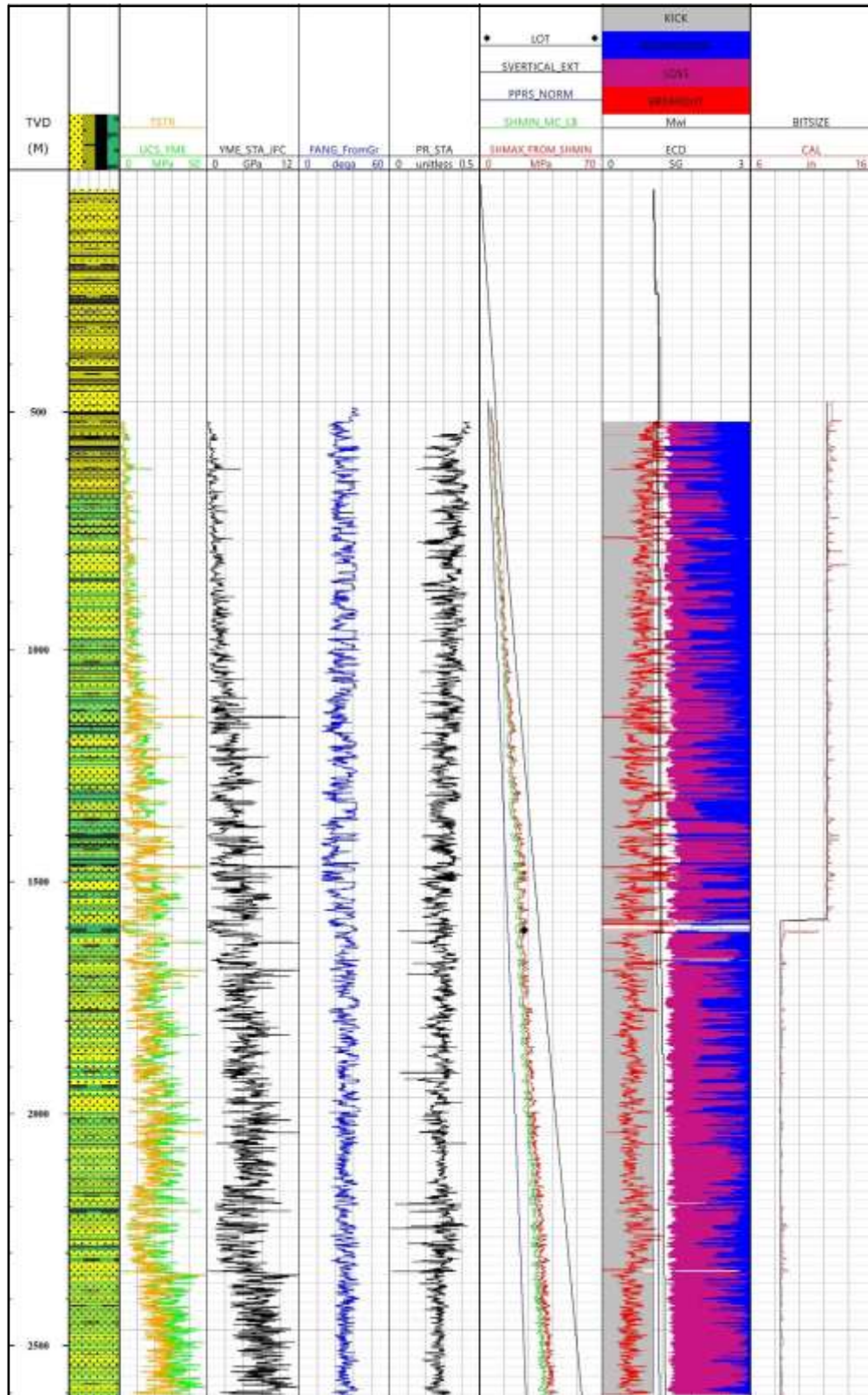
dan bila berat lumpur melebihi daerah yang dibatasi oleh grafik tersebut, maka sumur akan mengalami *breakdown* (zona berwarna biru).

5. Zona berwarna biru menunjukkan sumur akan mengalami *breakdown*. *Breakdown* dapat menyebabkan terbentuknya rekahan atau celah di dalam batuan yang semula solid. Akibatnya, fluida pemboran dapat mengalir ke dalam rekahan yang baru terbentuk. Jika proses *breakdown* tidak terkendali, dapat terjadi kerusakan pada formasi batuan dan bahkan kebocoran fluida ke dalam lapisan batuan yang lain.

Validasi model *wellbore failure* dapat dilakukan menggunakan data berat lumpur (MWI dan ECD) dan juga log *caliper*. *Wellbore failure* dapat diprediksi dengan menggunakan berat lumpur aktual yang telah diterapkan untuk mengebor sumur yang berada pada zona stabil. Pencocokan keruntuhan dinding sumur kemudian dapat dilakukan dengan membandingkan prediksi ketidakstabilan lubang sumur dengan keruntuhan dinding sumur yang ditunjukkan pada log *caliper* yang dibandingkan dengan log *bitsize* yang menunjukkan ukuran lubang sumur yang seharusnya terbentuk dan sesuai dengan ukuran mata bor (*drill bit*) yang digunakan.

Berdasarkan zona *safe mud weight window* yang ditandai pada zona yang berwarna putih dapat disimpulkan bahwa berat lumpur yang aman digunakan dan sumur akan berada pada kondisi stabil adalah 1.13-1.3 SG atau dalam gr/cm^3 . Dari data zona kestabilan sumur yang telah diperoleh dapat digunakan sebagai acuan dalam pemboran selanjutnya baik dalam penggunaan berat lumpur pemboran, laju pemboran, desain casing serta pada saat proses penyemenan sumur.

4.4 Korelasi Model *Wellbore Failure* Dengan Aspek Geomekanika



Gambar 22 Log model geomekanika batuan berdasarkan *1D mechanical earth model* dan *wellbore failure*

Pada gambar 22 merupakan log geomekanika batuan berdasarkan 1D *mechanical earth model* dan *wellbore failure* pada sumur B. Mengkorelasikan model geomekanik dengan *wellbore failure* dapat dilakukan dengan cara memperhatikan faktor-faktor geomekanik yang menyebabkan *wellbore failure*.

Kick disebabkan oleh karena tekanan pada formasi lebih besar dibandingkan tekanan yang diberikan oleh fluida atau lumpur pemboran sehingga terjadinya intrusi cairan formasi (air, minyak, gas atau kombinasi dari ketiganya) ke dalam sumur. Batas *kick* didapatkan dari nilai tekanan pori. Sehingga tekanan pori tidak boleh lebih besar dari tekanan lumpur pemboran untuk menghindari terjadinya *kick*. Tekanan pori juga tidak lebih besar dari tekanan hidrostatik yang dapat menyebabkan kondisi *overpressure*. Besarnya nilai tekanan pori dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik dan tekanan *overburden* yang bertambah seiring kedalaman dibawah permukaan.

Ketika tekanan pada formasi batuan melebihi kekuatan batuan, maka batuan akan mengalami deformasi atau retak, dan *breakout* dapat terjadi. Dalam hal ini, semakin besar kekuatan batuan, semakin besar tekanan yang dibutuhkan untuk menyebabkan *breakout*. Dalam hal sebaliknya, semakin rendah kekuatan batuan, semakin rendah tekanan yang diperlukan untuk menyebabkan *breakout*. Oleh karena itu, kekuatan batuan adalah faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan pemboran, karena dapat mempengaruhi risiko terjadinya *breakout* dan keamanan operasi pemboran. Semakin tinggi tekanan yang diterapkan pada formasi batuan, maka semakin besar risiko terjadinya *breakout*. Dapat dilihat pada gambar 22 terjadinya *breakout* sangat dipengaruhi oleh parameter geomekanika (modulus young, *friction angle*, UCS, *tensile strength* dan *poisson's ratio*) dan tegangan in situ. *Breakout* terjadi pada batuan yang memiliki modulus young, *friction angle*, UCS, *tensile strength* dan *poisson's ratio* yang cenderung lebih rendah dengan nilai tegangan in situ atau tekanan pada formasi yang jauh lebih tinggi.

Parameter geomekanika modulus young, sudut geser (*friction angle*), UCS (*unconvined compressive strength*), *tensile strength* dan *poisson's ratio* merupakan faktor penting dalam menentukan kemampuan sebuah formasi batuan untuk menahan tekanan. Jika tekanan lumpur yang diterapkan pada formasi melebihi

batas tekanan yang dapat diterima oleh batuan, hal ini dapat mengakibatkan masuknya lumpur pemboran ke dalam formasi (loss) dan apabila tekanan yang diterima oleh formasi meningkat akibat lumpur pemboran maka dapat menyebabkan terjadinya retakan atau kerusakan pada formasi, yang dikenal sebagai *breakdown*.

Dari hasil korelasi model geomekanika dengan *wellbore failure* dapat dilihat bahwa parameter geomekanik mempengaruhi terjadinya *wellbore failure*. Besarnya nilai parameter geomekanik seperti modulus young, *friction angle*, *poisson's ratio*, UCS, dan *tensile strength* mempengaruhi perilaku dan respon mekanik batuan selain itu tegangan insitu (S_{Hmax} , S_{Hmin} , S_v dan tekanan pori) dan berat lumpur pemboran juga berperan dalam terjadinya *wellbore failure*.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengolahan data, maka kesimpulan dari laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Log bor sumur B berdasarkan *wireline logging* dengan menggunakan data log *gamma ray*, sonik (*compressional sonic dan shear sonic*), densitas dan *porosity*. Log bor menunjukkan jenis batuan berdasarkan tingkat radioaktifitasnya, kepadatan/kekerasan batuan berdasarkan kecepatan gelombang, memberikan informasi tentang kepadatan batuan berdasarkan densitas, tingkat porositas batuan serta sifat-sifat mekanik batuan. Litologi yang dijumpai pada sumur B adalah batulempung, batubara, batupasir dan batulanau.
2. Model geomekanika batuan berdasarkan *ID mechanical earth model* yang didasarkan pada parameter mekanis batuan (modulus young, *friction angle*, *poisson's ratio*, UCS, *tensile strength*) dan tegangan in situ (SHmax, Shmin, Sv, tekanan pori) yang bekerja dihitung dengan menggunakan data log bor tanpa pengukuran secara langsung. Model geomekanika menghasilkan nilai mekanik yang bervariasi dari litologi batulempung, batubara, batupasir dan batulanau serta besarnya tegangan insitu yaitu $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ atau berada pada rezim sesar normal.
3. Berdasarkan model *wellbore failure* dijumpai faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan sumur yaitu seperti *kick*, *breakout*, *loss* dan *breakdown*. Untuk menentukan kestabilan sumur yang berada diantara batas *breakout* dan *loss* maka pada zona *safe mud weight window* (jendela berat lumpur yang aman/ stabil) digunakan adalah 1.13-1.3 SG.
4. Dari hasil korelasi model geomekanika dengan *wellbore failure* dapat dilihat parameter geomekanik yang mempengaruhi terjadinya *wellbore failure*. Besarnya nilai parameter geomekanik seperti modulus young, *friction angle*, *poisson's ratio*, UCS, dan *tensile strength* mempengaruhi perilaku dan respon mekanik batuan selain itu tegangan insitu

(S_{Hmax} , S_{Hmin} , S_v dan tekanan pori) dan berat lumpur pemboran juga berperan dalam terjadinya *wellbore failure*.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Dalam menentukan model geomekanika dan kestabilan sumur untuk mengetahui keberhasilan model perlu memperhatikan semua aspek geomekanik serta sangat diperlukan data kalibrasi atau validasi.
2. Dalam menganalisis parameter mekanis batuan yang lebih representatif dengan kondisi sebenarnya sebaiknya menggunakan uji laboratorium menggunakan data *core* batuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aadnoy, B. S., & Looyeh, R. (2019). *Petroleum Rock Mechanics Drilling Operations and Well Design*. Cambridge: Gulf Professional Publishing.
- Abbas, A. K., Al-Asadi, Y. M. B., Flori, R. E., & Shaban, A. (2020). *Development of a Geomechanical Model for Drilling Deviated Wells through the Zubair Formation in Southern Iraq*. SPE/IADC-189306-MS.
- Abbas, A. K., & Almohammed, H. H. (2020). Determination of Safe Operating Mud Weight Window from Well Logging Data Using Machine Learning Algorithms. OTC-30264-MS
- Abija, A., Ankwo, F., & Tse, T. (2018). *In Situ Stress Magnitude and Orientation in a Onshore Field, Eastern Niger Delta: Implications for Directorial Drilling*. Society of Petroleum Engineers. SPE-184234-MS
- Achmad, Z., & Samuel, L. (1984). *Stratigraphy and Depositional Cycles in the NE. Kalimantan Basin*. Proceedings Indonesia Petroleum Association. 13th Ann. Conv. pp 109-120.
- Addis, M. A. 2017. *The geology of geomechanics: petroleum geomechanical engineering in field development planning*. Geological Society London. Special Publications, 458, <https://doi.org/10.1144/SP458.7>.
- Arif, I. (2015). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Asef, M. R., & Najibi, A. R. (2013). *The effect of Confining Pressure On Elastic Wave Velocities and Dynamic to Static Young*. Iran: Kharazmi University. GEOPHYSICS, VOL. 78, NO. 3 (MAY-JUNE 2013); P. D135–D142, 11.
- Asquith, G. & Krygowski, D. (2004). *Basic well log analysis*. AAPG Methods in Exploration 16, AAPG, Tulsa, Oklahoma, 244 p.
- Azar, J. J. 2007. *Drilling Engineering*. Tulsa: Pen Well.
- Bell, J. S., & Gough, D. I. (1979): *Northeast-southwest compressive stress in Alberta: Evidence from oil wells*. Earth and Planetary Science Letters, v. 45, p.475–482.
- Bell, J.S. (1990): *The stress regime of the Scotian Shelf offshore eastern Canada to 6 kilometres depth and implications for rock mechanics and hydrocarbon migration*. - In: Maury, V. and D. Fourmaintraux, eds., *Rock at Great Depth*, Rotterdam: Balkema, 1243-1265.
- Berard, T., & Priou, R. (2016). *Defining Series: Mechanical Earth Model*. Schlumberger.

- Chardac, O., Murray, D., Carnegie, A., & Marsden, J.R. (2005). *A Proposed Data Acquisition Program for Successful Geomechanics Projects*. 14th SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain. SPE # 93182.
- Cook, J., Growcock., Guo., Hodder, M. & van Oort, E. (2011). *Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation*. Schlumberger Technical Paper 0826.
- Das, B. M., Endah, N., & Mochtar, I. B. (1994). *Mekanika Tanah II (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) jilid 1 dan 2*. Jakarta: Erlangga.
- Darvishpour, A., Cheraghi, S. M., & Wood, D. G. (2019). *Wellbore stability analysis to determine the safe mud weight window for sandstone layers*. Petroleum Exploration and Development Volume 46(5): 1031–1038
- Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well Logging for Earth Scientists 2nd Edition*. Netherlands: Springer.
- Gholilou, A., Behnoud far, P., Vialle, S., & Madadi, M. (2017). *Determination of safe mud window considering time-dependent variations of temperature and pore pressure analytical and numerical approaches*. J Rock Mech Geotech Eng
- Gunawan, A., Sapiie, B., & Wibowo, B. (2017). *Analisis Geomekanika Pada Batuan Dasar, di Area JS-1 Ridge Bagian Selatan, Cekungan Jawa Timur Utara*. Buletin Of Geology, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB) Institut Teknologi Bandung (ITB). Vol.1, No.1.
- Hasugian, D. A., Muslim, D., Firmansyah, Y., & Atmadibrata, R. (2020). *Kestabilan Sumur Berdasarkan Karakteristik Geomekanik Batuan Pada Ladang Gas Arun, Aceh*. Bandung: Padjadjaran Geoscience Journal. i-ISSN: 2597-4033 Vol. 4, No. 1.
- Heydari, M., Emamqeyasi, M. R. A., & Sanei, M. (2022). *Finite element analysis of wellbore stability and optimum drilling direction and applying NYZA method for a safe mud weight window*. Iran: Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd. Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering Vol. 11, No. 29, Winter 2022, pages 67-76
- Hidayat, S., Amiruddin., & Satrisna. (2011). *Geologi Lembar Tarakan dan Sebatik, Kalimantan*. Bandung: Pusat Survey Geologi.
- Hoek, E & Bray J.W. (1981). *Rock Slope Engineering Civil and Mining Third Edition*. New York: Taylor & Francis.
- Hoseinpour, M., & Riahi, M. A. (2022). *Determination of the mud weight window, optimum drilling trajectory, and wellbore stability using geomechanical parameters in one of the Iranian hydrocarbon reservoirs*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 12:63–82

- Knöll, L. 2016. *The Process of Building a Mechanical Earth Model Using Well Data*. Austria: Department Petroleum Engineering Montan Universität.
- Lavrov, A. (2016). *Lost Circulation: Mechanisms and Solutions*. Cambridge: Gulf Professional Publishing.
- Le, K. V., & Rasouli. (2012). Determination of safe mud weight windows for drilling deviated wellbores: a case study in the North Perth Basin. Australia: Department of Petroleum Engineering, Curtin University.
- Lentini, M. R., & Darman, H. (1996). *Aspects of the Neogene Tectonic History and Hydrocarbon Geology of the Tarakan Basin*. Proceedings of the Indonesian Petroleum Association, 25th Annual Convention, Jakarta, pp. 241-251
- Ostad, M. N., Niri, M. E., & Darjani, M. (2018). *3D modeling of geomechanical elastic properties in a carbonate-sandstone reservoir: a comparative study of geostatistical co-simulation methods*. J. Geophys. Eng. 15 (2018) 1419–1431 (13pp)
- Pertamina Hulu Kalimantan Timur. (2022). *Hubungan Modulus Statis dan Dinamis*. [Unpublished].
- Ramdhan, A. M. (2010). *Overpressure and Compaction in the Lower Kutai Basin, Indonesia*. United Kingdom: Durham University.
- Rider, M. (2002). *The Geological Interpretation of Well Logs, Second Edition, Revised*. Scotland: Whitetles Publishing.
- Sausan, S. (2014). *Overpressure dan Geomekanik Daerah Deepwater Pada Lapangan “Verde”, Selat Makassar*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Schon, J. H. (2011). *Handbook of Petroleum Exploration and Production Volume 8: Physical Properties of Rocks*. Amsterdam.
- Sivakugan, N., Kumar, S. S., & Das, B. M. (2013). *Rock Mechanics an introduction*. London: CRC Press
- Zain-Ul-abedin, M., & Henk, A. (2020). *Building 1D and 3D Mechanical Earth Models for Underground Gas Storage—A Case Study from the Molasse Basin, Southern Germany*. Germany: Energies. 13, 5722; doi:10.3390/en13215722
- Venieri, M. & Weir, R., McKean, S. H., Perdesen, P. K., & Eaton, D. W. D. (2020). *Determining elastic properties of organic-rich shales from core, wireline logs and 3-D seismic: A comparative study from the Duvernay play, Alberta, Canada*. Journal of natural gas Science and Engineering. Volume 84, December 2020, 103637.
- Wijaya, P.H., Noeradi, D., Permadi, A.K., Usman, E., & Djaja, A.W. (2012). *Potensi Migas Berdasarkan Integrasi Data Sumur dan Penampang Seismik*

di Wilayah Offshore Cekungan Tarakan Kalimantan Timur. Bandung: Jurnal Geologi Kelautan Volume 10, No.3.

- Zahiri, J., Abdideh, M., & Golab, E. G. (2018). *Determination of safe mud weight window based on well logging data using artificial intelligence*. Iran: Department of Petroleum Engineering, Omidiyeh Branch, Islamic Azad University. ISSN: 1226-9328 (Print) 2166-3394 (Online) Journal homepage., Omidiyeh,
- Zhang, J. J. (2011). *Pore Pressure Prediction from Well Logs: methods, modification, and new approaches*. Elsevier, Earth-Science Reviews.
- Zhang, J. J. (2019). *Applied Petroleum Geomechanics*. Cambridge: Gulf Professional Publishing.
- Zoback, M. D. (2007). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L. G., & Anderson, R. N. (1985). *Well bore breakouts and in situ stress*. - J. Geophys. Res., 90, 5523-5530.