

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*.

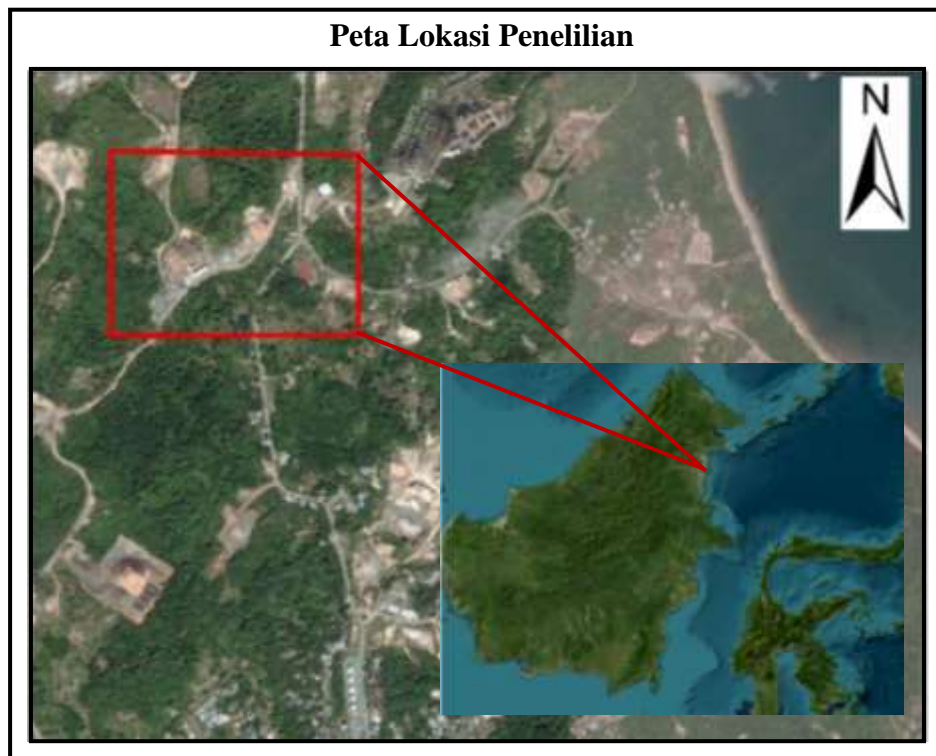
2. Membuat model geomekanik berdasarkan *1D Mechanical Earth Model* sumur B lapangan X.
3. Menentukan kestabilan sumur berdasarkan model *wellbore failure* sumur B lapangan X.
4. Membuat korelasi keterkaitan *wellbore failure* dengan aspek geomekanika.

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

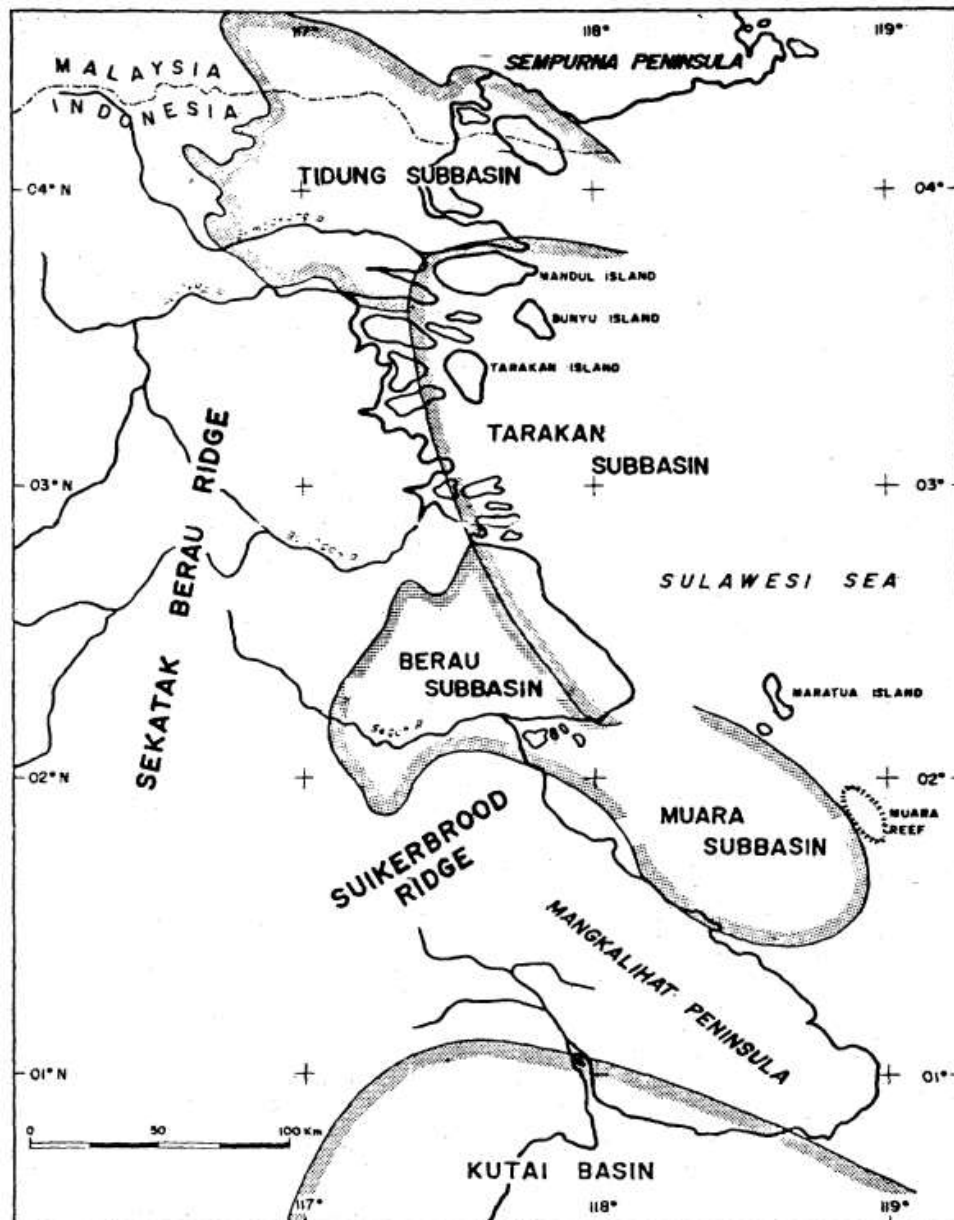
2.1.1 Geomorfologi Regional

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

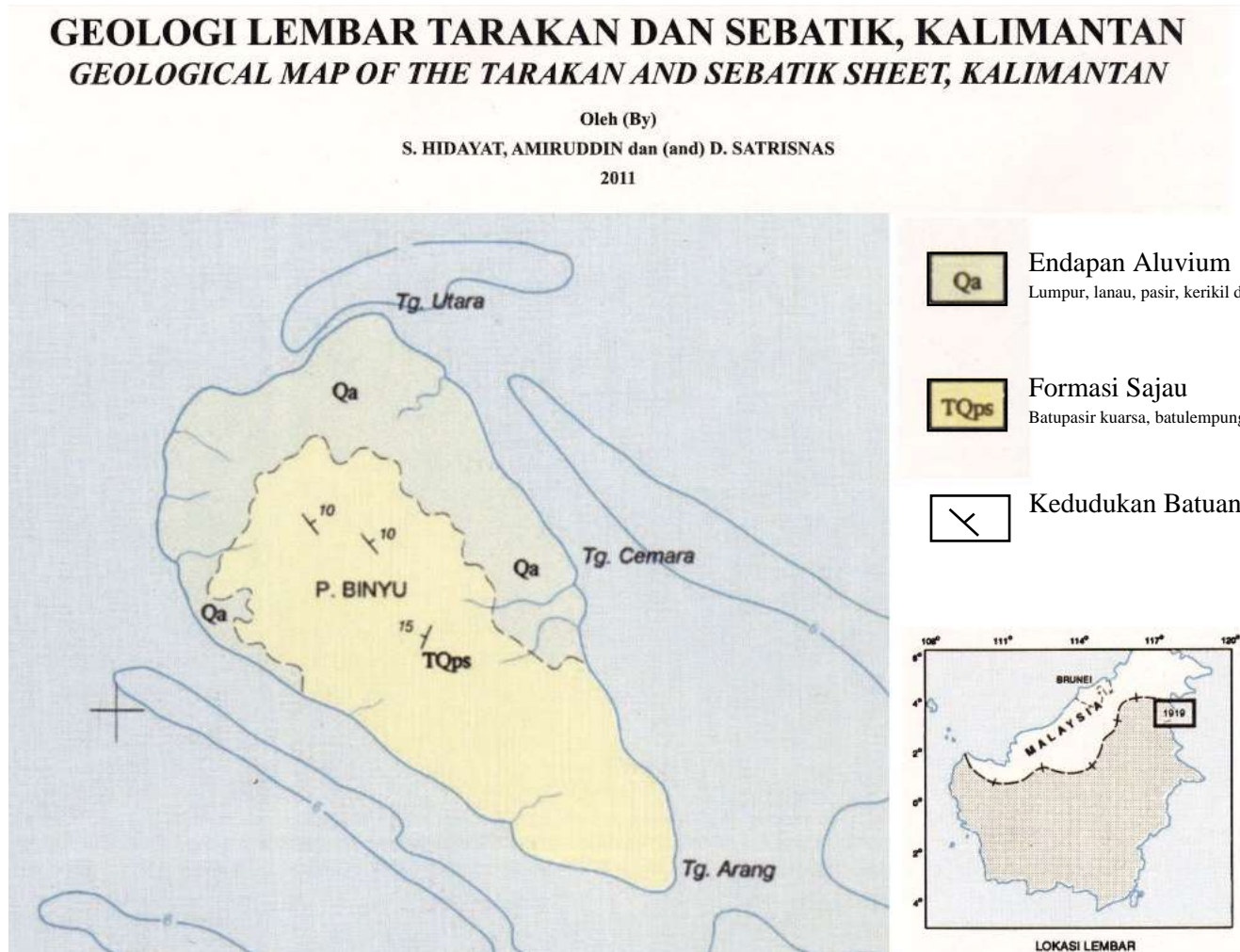
Menurut Achmad dan Samuel (1984) Cekungan Tarakan terdiri dari empat sub-cekungan yaitu Sub-cekungan Tidung, Sub-cekungan Tarakan, Sub-cekungan Berau, dan Sub-cekungan Muara. Letak daerah penelitian berada pada Sub-cekungan Tarakan.



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).

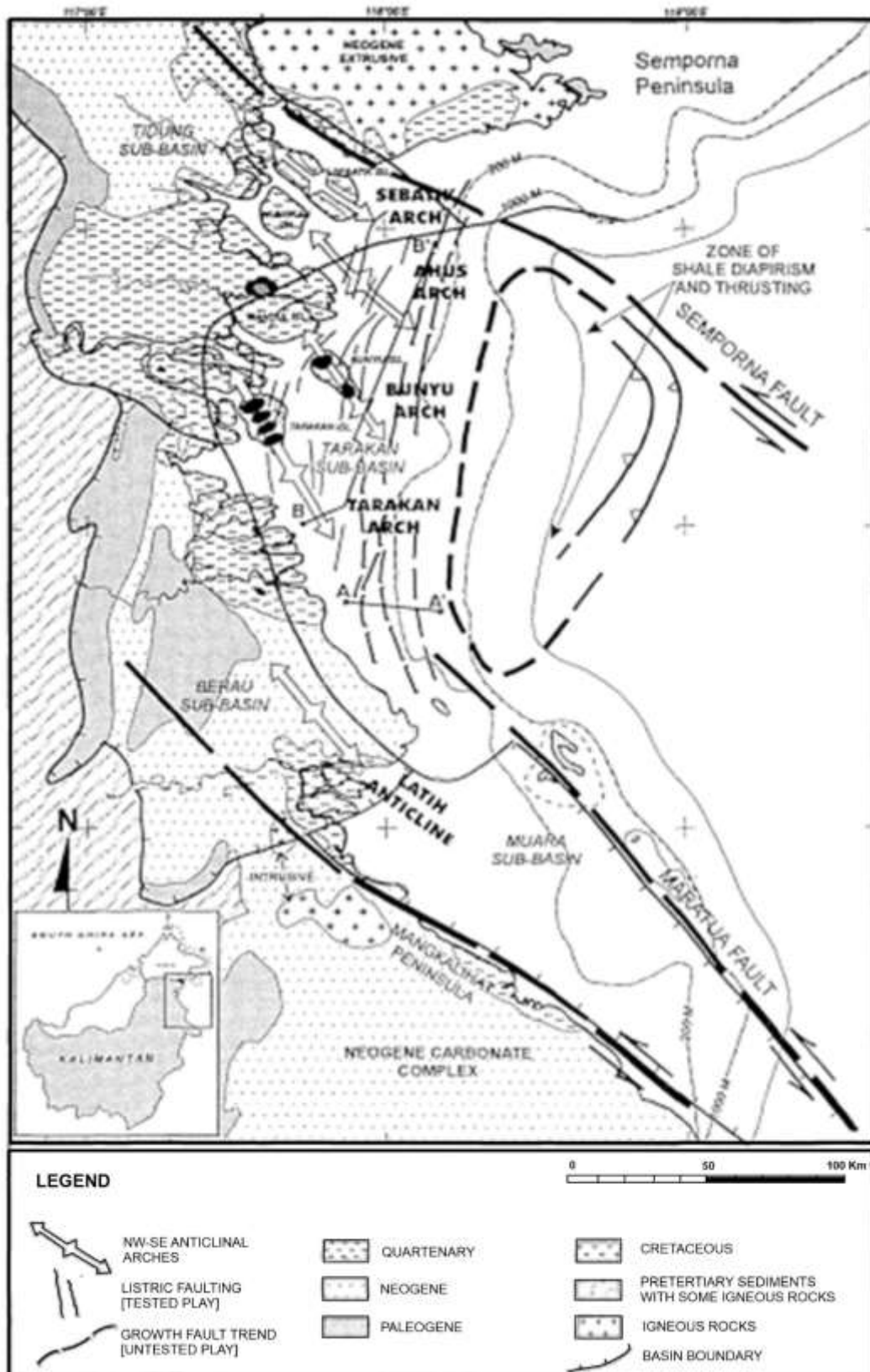


Gambar 3 Peta geologi regional daerah penelitian (Hidayat dkk, 2011)

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 (tegasan) di kedalaman selalu positif karena tegasan 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 tegasan 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).

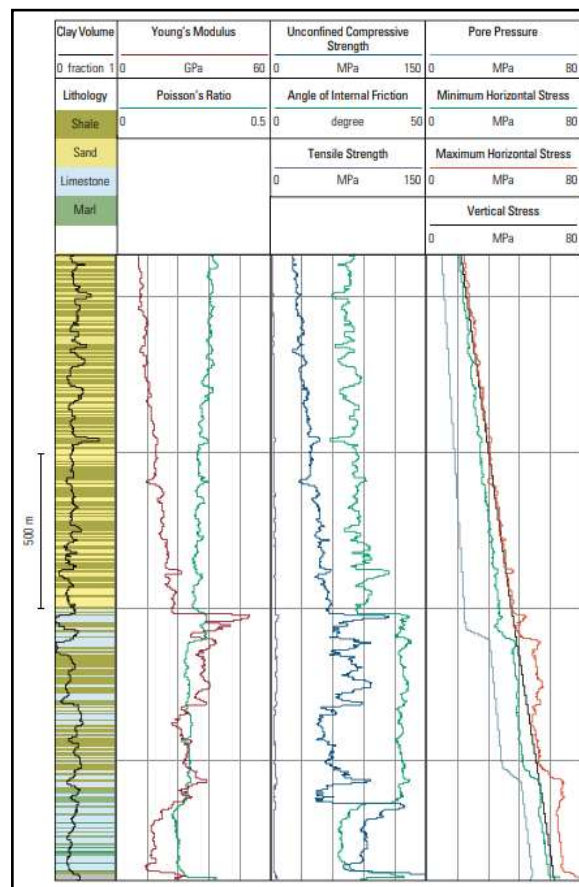
2.3 1D Mechanical Earth Model (1D MEM)

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-Ul-Abidin & 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-Ul-Abidin & 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-Ul-Abidin & 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,

$$Sh_{min} = \text{Tekanan horizontal minimum (MPa)}$$

S_{Hmax} = Tekanan horizontal maksimum (MPa)

ν = Poisson's ratio

S_v = Tekanan vertical (MPa)

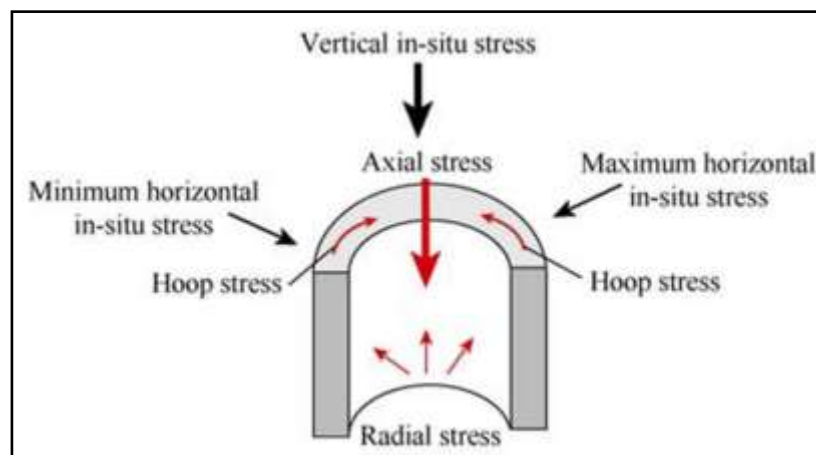
α = Koefisien Biot (1)

P_p = Tekanan Pori (MPa)

E = Modulus Young (GPa)

ϵ_x = Minimum horizontal strain

ϵ_y = Maximum horizontal strain

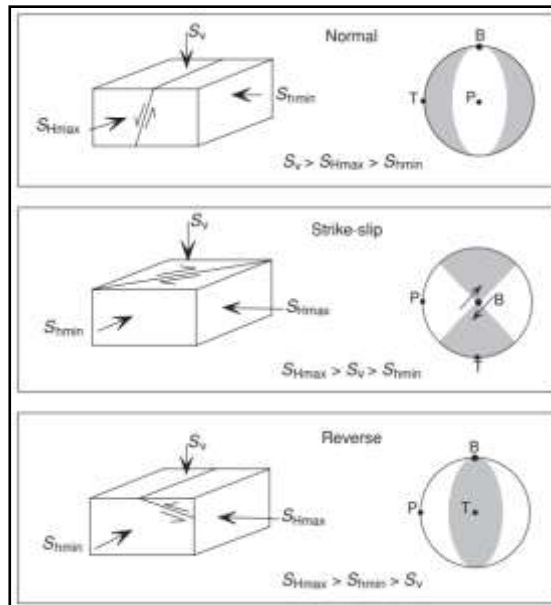


Gambar 6 Distribusi tegangan pada sumur vertikal (Darvishpour et al., 2019)

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:

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

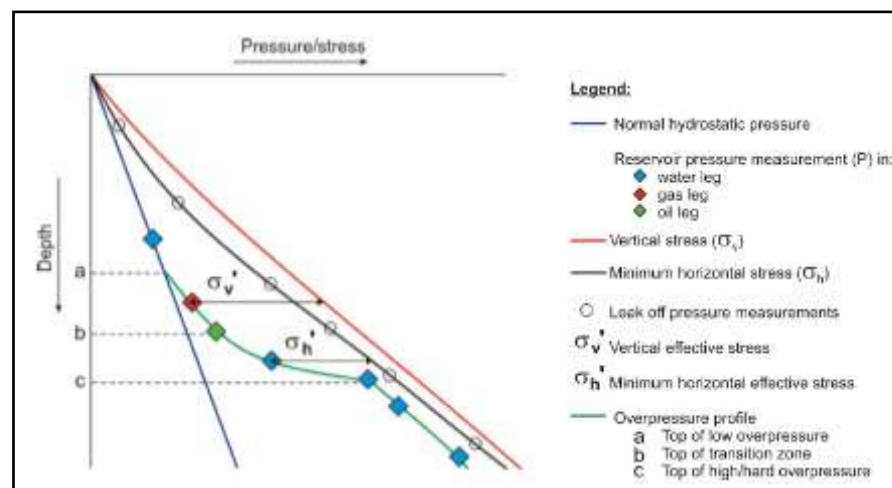
dimana,

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).

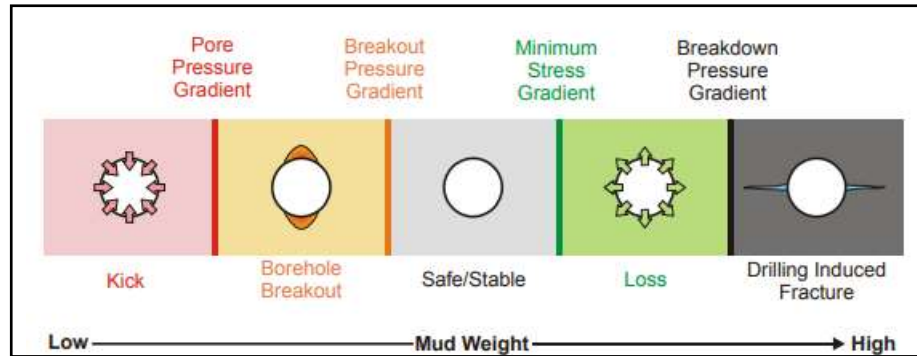
Kestabilan lubang sumur saat dilakukannya pengeboran sangat dipengaruhi berat lumpur. Besar kecilnya berat lumpur harus disesuaikan dengan karakteristik geologinya. Dalam melakukan estimasi berat lumpur, digunakan perhitungan dengan parameter tekanan lumpur minimum yang dibatasi oleh tekanan pori, dan 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

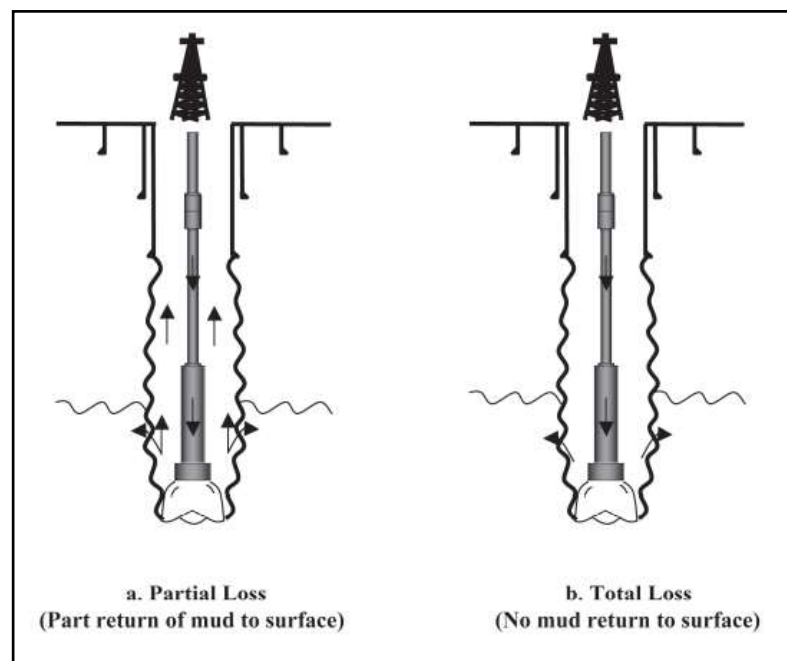
Kestabilan sumur pemboran dapat dilihat dari *safe mud weight window* pada model *wellbore failure* yang memperlihatkan posisi stabil lubang bor.



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

a. *Loss Circulation*

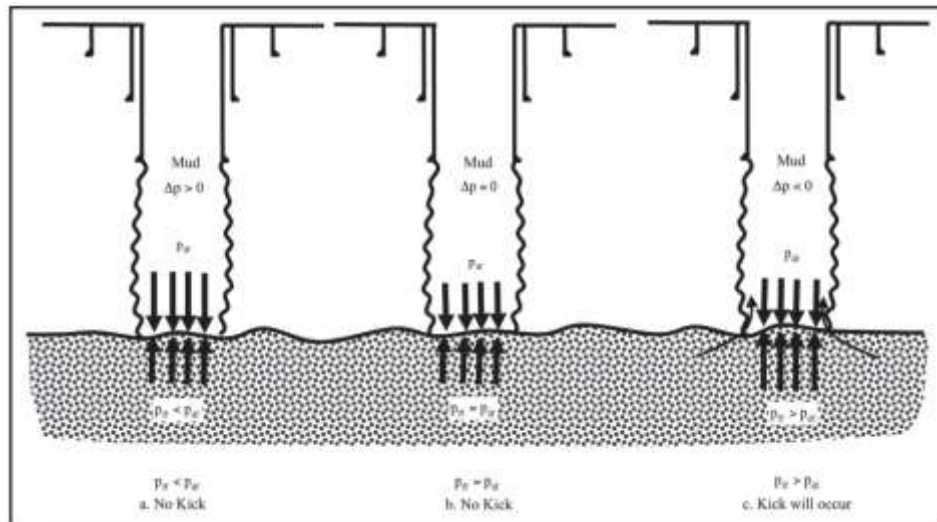
Loss circulation didefinisikan sebagai aliran lumpur utuh yang tidak terkendali ke dalam formasi. Formasi yang secara inheren retak, habis, atau memiliki permeabilitas tinggi, di satu sisi, adalah zona potensial *loss circulation*. Di lain sisi, di bawah kondisi pengeboran tertentu yang tidak tepat, 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

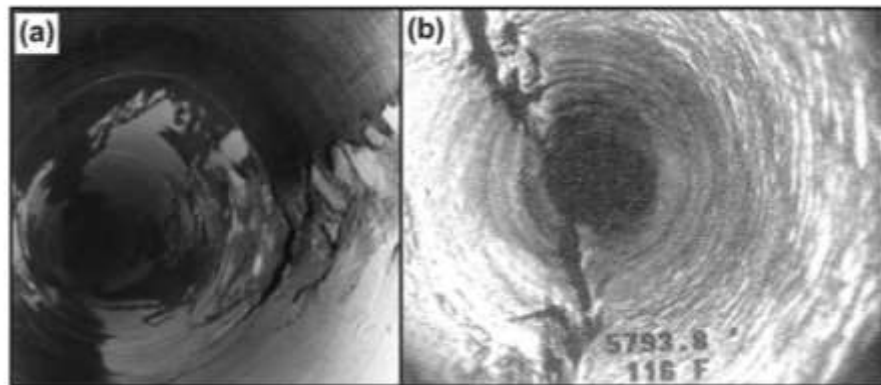
Selama operasi pemboran, intrusi cairan formasi (air, minyak, gas atau kombinasi dari ketiganya) ke dalam sumur disebut *kick*. Saat *kick* terjadi ada potensi terjadinya *blowout*. *Blowout* dapat terjadi selama operasi pengeboran *tripping*, *casing* atau *workover*. Dan dianggap sebagai kecelakaan, 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

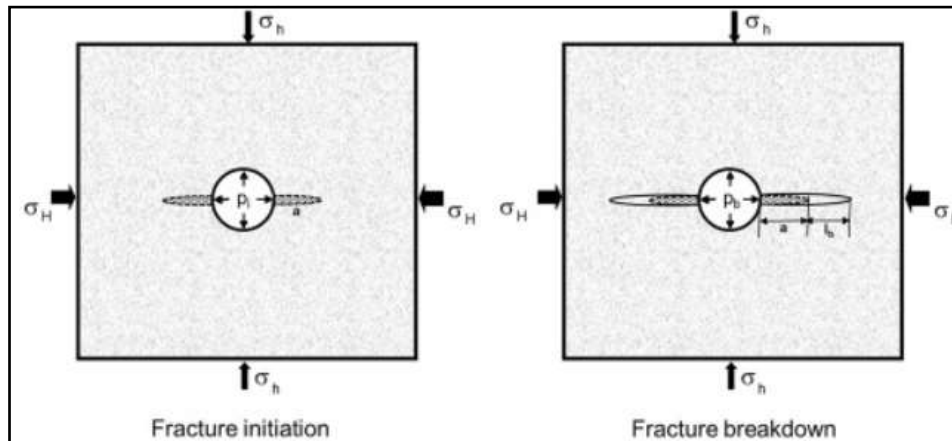
N = *Friction number*

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*