

ANALYSIS OF CHARACTERISTIC AND DISTRIBUTION OF NATURAL FRACTURE ON BASEMENT OUTCROP AT KEDABANG CAPE, BATAM ISLAND, KEPULAUAN RIAU PROVINCE

YEHEZKIEL FESTIAN PRAKOSO¹, BENYAMIN SAPIIE¹, ALFEND RUDYAWAN¹

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

Sari – Kegiatan eksplorasi pada reservoir rekah alami membutuhkan pemahaman mendalam mengenai karakteristik rekahan alami seperti orientasi umum rekahan, sifat fraktal atribut rekahan, distribusi intensitas dan densitas rekahan pada Zona Hancuran Sesar (FDZ), serta faktor-faktor yang mengontrol distribusinya. Daerah penelitian secara administratif termasuk ke dalam wilayah Kecamatan Nongsa, Kota Batam, Provinsi Kepulauan Riau. Daerah penelitian secara geografis terbentang antara 1°8'21" LU – 1°8'41" LU dan 104°8'47" BT – 104°9'8" BT. Pengukuran data rekahan alami menggunakan metode *linear scanline* dan *window scanline* di daerah Tanjung Kedabang. Pengukuran data rekahan alami dilakukan pada batuan dasar granit dan riolit. Jumlah rekahan adalah 769 rekahan, berupa 587 rekahan terbuka (*joint*), 177 rekahan gerus (*shear fracture*), dan 5 rekahan terisi (*vein*).

Rekahan terbuka berarah utara barat daya-selatan tenggara (NNW-SSE) dan barat-timur (ENE-WSW). Rekahan gerus berarah timur laut-barat daya (NE-SW) dan barat laut-tenggara (ENE-WSW). Rekahan terisi berarah timur laut - barat barat daya (ENE-WSW). Nilai intensitas rekahan alami di Tanjung Kedabang adalah 6-32 rekahan/m, sedangkan nilai densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang adalah 0,09-0,42 cm/cm². Lebar zona hancuran dalam untuk Sesar Tanjung Kedabang adalah 23-90 m, sedangkan untuk sesar di singkapan YFP-A4 adalah 3,8 meter. Lebar zona hancuran sesar menunjukkan hubungan linear dengan panjang dan pergerakan sesar. Intensitas dan densitas rekahan di dalam zona hancuran lebih besar dibandingkan di luar zona hancuran. Faktor kontrol distribusi intensitas dan densitas rekahan alami adalah struktur geologi dan litologi batuan dasar. Analisis sifat fraktal rekahan alami di daerah penelitian menghasilkan kesimpulan bahwa rekahan alami di daerah penelitian bersifat fraktal mengikuti distribusi *power law*. Nilai porositas rekahan batuan dasar di Tanjung Kedabang bervariasi pada rentang 0,01-0,09%. Permeabilitas rekahan berdasarkan Metode *Cubes* berkisar pada rentang 0,53-83,82 darcy, sedangkan berdasarkan Metode *Matchstick* berkisar pada rentang 0,40-62,86 darcy.

Kata kunci: Batam, fraktal, rekahan, zona hancuran, scanline

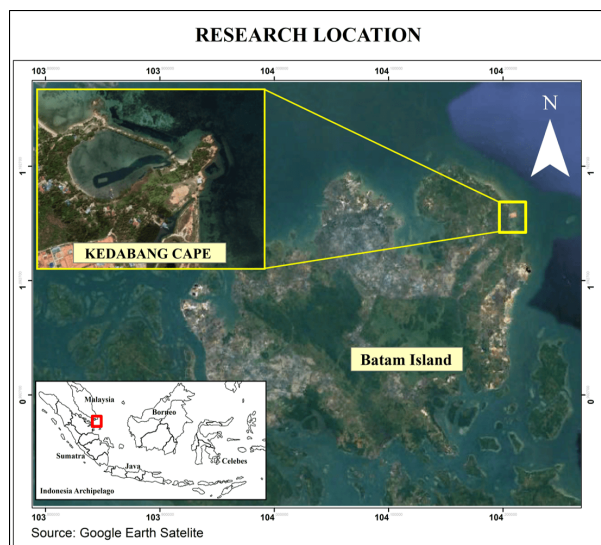
Abstract - Geological exploration in Naturally Fractured Reservoirs (NFR) require in-depth understanding of natural fracture characteristics such as fracture orientation, fractal properties of fracture attributes, fracture intensity and density distribution in the Fault Damage Zone (FDZ), and the factors that control their distribution. The research area is administratively included in the Nongsa District, Batam City, Kepulauan Riau Province. The research area geographically stretches between 1°8'21" - 1°8'41" N and 104°8'47" - 104°9'8" E. Measurement of natural fracture data using the linear scanline and window scanline methods in the Kedabang Cape research area. Measurement of natural fracture data was carried out on granite and rhyolite basement outcrops. The total fracture is 769 fractures, in the form of 587 joints, 177 shear fractures, and 5 veins.

The joint orientation is NNW-SSE and ENE-WSW. The shear fracture orientation is NE-SW and ENE-WSW and the vein orientation is ENE-WSW. The fracture intensity in Kedabang Cape is 6-32 fractures/m, while the fracture density is 0,09-0,42 cm/cm². The width of the Fault Damage Zone (FDZ) in the Kedabang Cape Fault is between 23-90 m, while for the YFP-A4 outcrop-scale fault is 3,8 m. The width of the fault damage zone shows a linear relationship with the length and displacement of the fault plane. The intensity and density of fractures inside the damage zone are greater than background zone. Natural fractures in the research area are fractally distributed, following the power law distribution. The fracture porosity of basement outcrop in Kedabang Cape varied in the range 0,01-0,09%. The fracture permeability based on the Cubes Method varied in the range 0.53-83.82 darcy, while based on the Matchstick Method ranges from 0.40-62.86 darcy.

Key words: Batam, damage zone, fractal, fracture, scanline

1. PENDAHULUAN

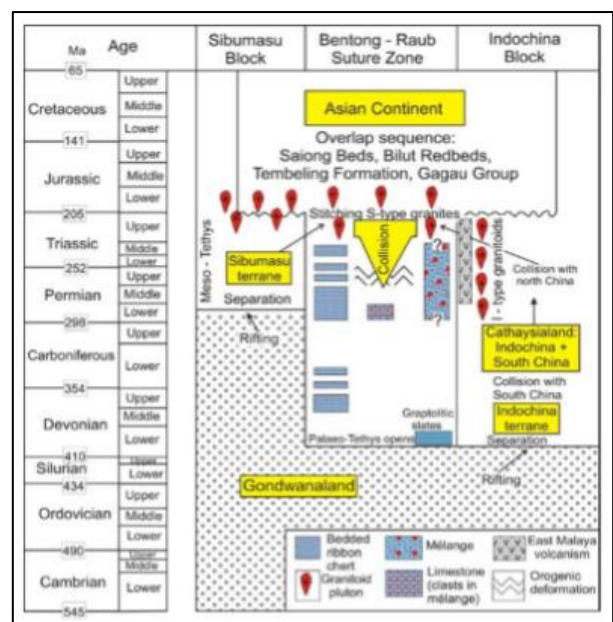
Kebutuhan minyak dan gas bumi di Indonesia dan dunia semakin bertambah sementara produksinya semakin menurun. Kegiatan eksplorasi dan pengembangan pada reservoir rekahan alami di batuan dasar dapat menjadi pilihan strategis dalam menjawab kebutuhan migas di masa mendatang. Kegiatan eksplorasi pada reservoir rekahan alami membutuhkan pemahaman mendalam mengenai karakteristik rekahan alami seperti karakteristik umum rekahan, sifat fraktal atribut rekahan, distribusi intensitas dan densitas rekahan pada zona hancuran sesar (FDZ), serta faktor-faktor yang mengontrol distribusinya. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik dan distribusi rekahan alami pada singkapan batuan dasar di daerah penelitian, sehingga dapat digunakan sebagai model analog permukaan. Daerah penelitian berada di daerah Tanjung Kedabang, Pulau Batam, Provinsi Kepulauan Riau, Indonesia. Daerah penelitian secara administratif termasuk ke dalam wilayah Kecamatan Nongsa, dan secara geografis terbentang antara 1°8'21" LU – 1°8'41" LU dan 104°8'47" BT – 104°9'8" BT (**Gambar 1**).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian. Daerah penelitian berada di sekitar pantai timur laut Pulau Batam.

Tatanan tektonik Pulau Batam berkaitan dengan proses subduksi Kerak Samudera Paleo-tethys ke bawah Blok Malaya Timur dan Indochina pada Devon hingga Permian Akhir,

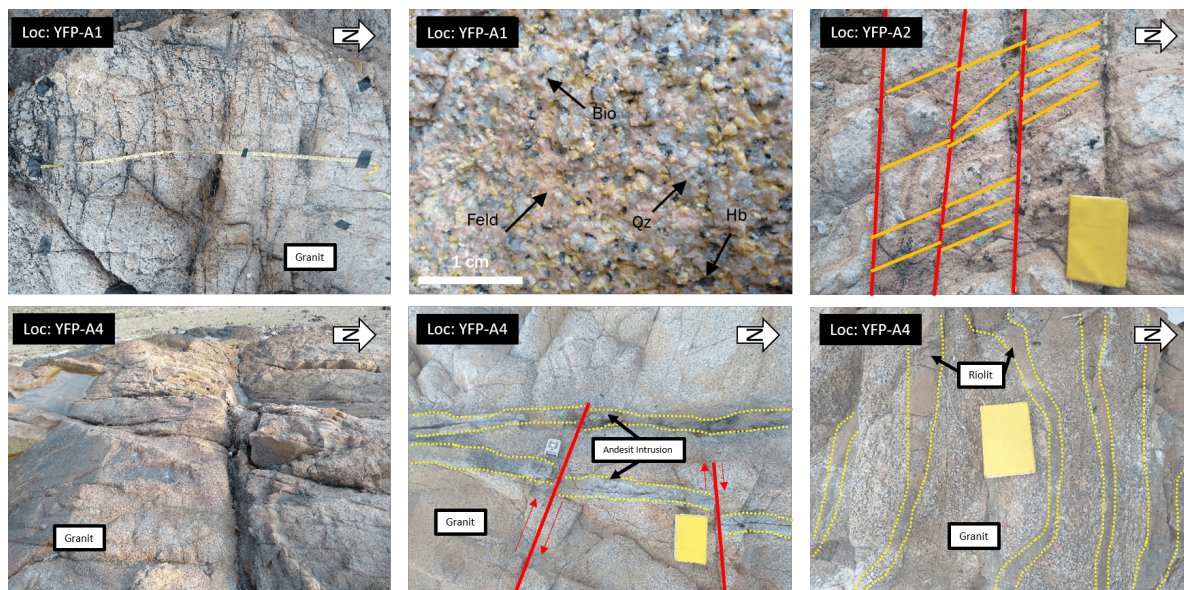
diikuti oleh proses kolisi Blok Sibumasu pada Trias Awal (Metcalf, 2000; Schwartz dkk., 1995; Barber dkk., 2005; Searle dkk., 2012; Hutchison, 2014). Proses subduksi antara Kerak Samudera Paleo-tethys dan Blok Malaya Timur-Indochina pada Paleozoikum Akhir hingga Mesozoikum Awal, mengakibatkan pembentukan zona akresi sepanjang zona subduksi, yang kemudian disebut Zona Sutura Raub-Bentong (Metcalf, 2000; Barber dkk., 2005; Searle dkk., 2012; Hutchison, 2014). Penutupan Kerak Samudera Paleo-tethys akibat subduksi, kemudian dilanjutkan dengan proses kolisi antara Blok Sibumasu dan Blok Malaya Timur-Indochina pada Trias Awal. Proses kolisi antara Blok Sibumasu dan Blok Malaya Timur mengakibatkan terjadinya pengangkatan dan pembentukan pegunungan, yang kemudian disebut sebagai Orogenesa Indosinian (**Gambar 2**). Peristiwa tektonik di Semenanjung Malaka kemudian terus berlanjut dengan proses kolisi Blok Burma Barat pada Trias Akhir hingga Jura Awal, diikuti dengan proses kolisi Lempeng India pada Eosen hingga Pleistosen (Mitchell, 1981; Mitchell, 1988; Hutchison, 1988 dalam Schwartz dkk., 1995).



Gambar 2. Perkembangan tektonik di Semenanjung Malaka (Metcalf, 2000 dimodifikasi oleh Hutchison, 2014).

Pulau Batam merupakan salah satu pulau dalam rangkaian pulau-pulau timah yang membujur dari daratan Thailand, Malaysia, hingga Bangka-Belitung. Jalur timah ini dikenal sebagai “*The Tin Belt of Sumatera*” (Kusnana dkk., 1994). Berdasarkan jenis granit yang tersebar di Pulau Batam dan letak geografisnya, Pulau Batam merupakan bagian dari “*The Eastern Belt Province*”, dicirikan oleh batuan granitoid tipe-I, berumur Permian Akhir hingga Trias, dengan mineralogi berupa plagioklas, K-feldspar, kuarsa, biotit, dan hornblende (Hutchison, 1989; Barber dkk., 2005; Metcalfe, 2000; Searle dkk., 2012). Provinsi Sabuk Granit Bagian Timur terbentuk berkaitan dengan proses subduksi antara Kerak Samudera Paleo-tethys dan Blok Malaya Timur pada saat Permian hingga Trias (Metcalfe, 2000; Barber dkk., 2005; Searle dkk., 2012; Hutchison, 2014).

Objek penelitian merupakan batuan dasar yang terekahkan secara alami di sepanjang pantai timur laut Pulau Batam dan merupakan bagian dari Pluton Granit Nongsa. Pluton Granit Nongsa tersusun oleh litologi berupa granit (Streckeisen, 1976), berwarna abu-abu terang, kemerahan hingga kehijauan, tersusun atas mineral berukuran (0,3-0,5) cm, komposisi mineral berupa kuarsa (40%), alkali-feldspar (40%), plagioklas (10%), biotit (5%), dan hornblende (5%). Batuan granit diintrusi oleh batuan riolit berwarna abu-abu terang kemerahan dan andesit berwarna abu-abu gelap dengan mineral bertekstur halus. Hasil penanggalan radiometrik menunjukkan bahwa Pluton Granit Nongsa berumur sekitar 253-230 juta tahun atau Trias Awal hingga Trias Tengah (Searle dkk., 2012). Kenampakan singkapan granit di Tanjung Kedabang dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Kenampakan hubungan potong-memotong (*cross-cutting*) antara granit, intrusi riolit dan andesit, dan kehadiran struktur rekahan alami di daerah Tanjung Kedabang.

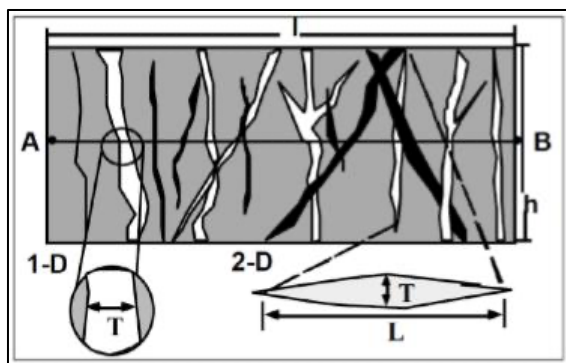
2. DATA DAN METODE

Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data primer yang dikumpulkan melalui kegiatan pemetaan geologi lapangan pada tanggal 29 Februari – 2 April 2020. Data geologi primer yang dikumpulkan adalah data singkapan hasil pemetaan geologi dan data rekahan. Pemetaan geologi meliputi pengamatan litologi, pengamatan hubungan saling potong-memotong antar litologi dan struktur geologi, serta pengukuran data

rekahan alami. Pengukuran data rekahan alami dilakukan pada batuan dasar granit dan riolit. Jumlah rekahan adalah 769 rekahan, berupa 587 rekahan terbuka (*joint*), 177 rekahan gerus (*shear fracture*), dan 5 rekahan terisi (*vein*). Data lapangan kemudian dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui karakteristik dan distribusi rekahan alami pada singkapan batuan dasar di daerah penelitian. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak *Stereonet v9.2.3*, *Agisoft Photoscan Pro 1.4.5*, dan

Microsoft Excel 2013.

Data rekahan yang diambil pada singkapan batuan dasar berupa atribut rekahan, yaitu jenis rekahan, kedudukan rekahan, lebar bukaan rekahan, spasi antar rekahan, dan panjang rekahan. Data rekahan digunakan untuk analisis orientasi umum rekahan dan interpretasi arah tegasan utama, analisis kinematik sesar, analisis distribusi intensitas dan densitas rekahan, analisis lebar zona hancuran sesar, analisis sifat fraktal atribut rekahan, dan analisis porositas dan permeabilitas rekahan di daerah penelitian. Data rekahan diambil dengan menggunakan metode *linear scanline* dan *window scanline* (**Gambar 4**). Metode *linear scanline* meliputi pengukuran koordinat, kedudukan, lebar bukaan, spasi, dan panjang rekahan alami sepanjang garis *linear scanline*. Metode *window scanline* meliputi pengukuran kedudukan, lebar bukaan, spasi, dan panjang rekahan alami di dalam bidang ukur atau *window* dengan luas tertentu.



Gambar 4. Sketsa pencatatan dan observasi rekahan dengan metode *linear scanline* dan *window scanline*. A-B adalah garis *linear scanline*. T adalah lebar bukaan rekahan, L adalah panjang rekahan, h adalah lebar bidang ukur, dan l adalah panjang bidang ukur (Sapiie, 1998).

Perhitungan Nilai Intensitas dan Densitas Rekahan

Intensitas rekahan alami didefinisikan sebagai jumlah rekahan alami tiap satuan panjang ($/L$). Densitas rekahan alami didefinisikan sebagai panjang rekahan alami tiap satuan luas ($/L^2$)

(Zeeb dkk., 2013). Intensitas rekahan alami diperoleh dari hasil pengukuran rekahan sepanjang garis *linear scanline*, sedangkan densitas rekahan alami diperoleh dari hasil pengukuran rekahan di dalam *window scanline* dengan luas tertentu. Nilai intensitas dan densitas rekahan alami diperoleh menggunakan persamaan berikut,

$$\text{Intensitas Rekahan} = \frac{\text{Jumlah Rekahan}}{\text{Panjang Linear Scanline}}$$

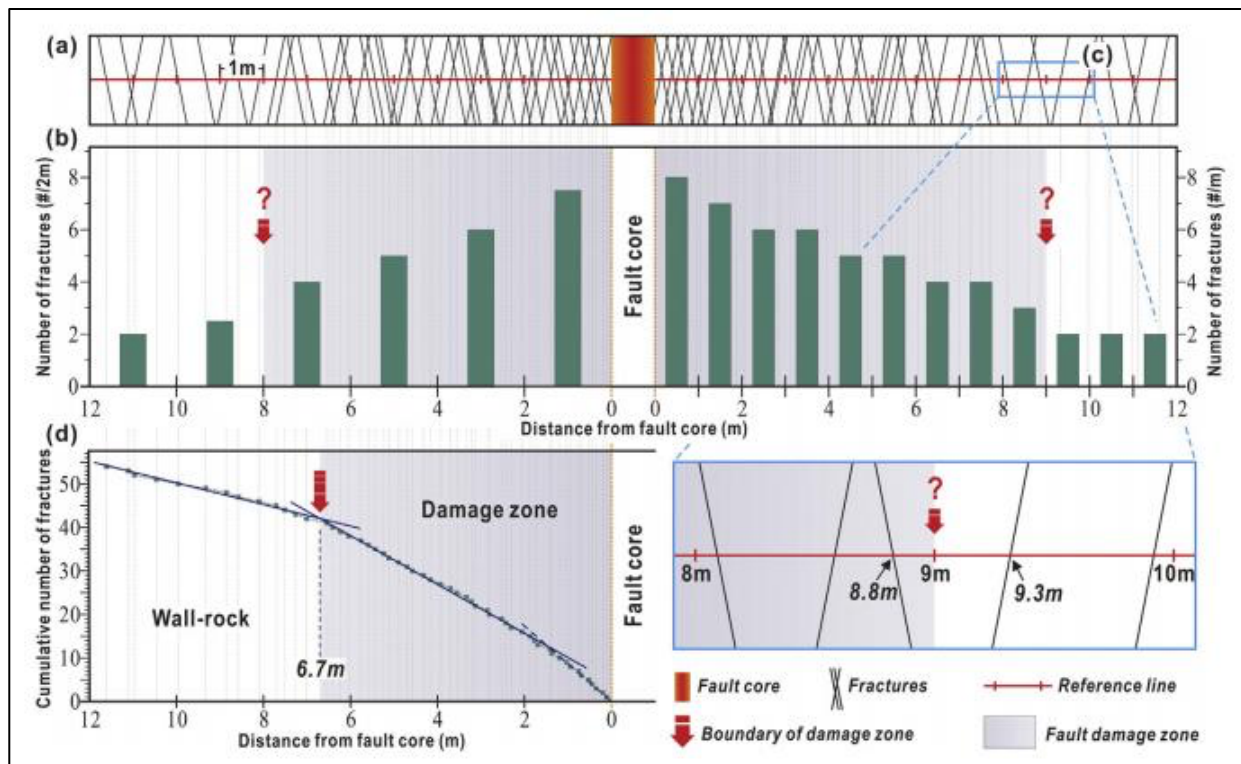
$$\text{Densitas Rekahan} = \frac{\text{Akumulasi Jumlah Panjang Rekahan}}{\text{Luas Window Scanline}}$$

Estimasi Lebar Zona Hancuran Sesar (FDZ)

Zona hancuran sesar merupakan zona yang mengelilingi inti sesar. Zona hancuran sesar mengakomodasi lebih sedikit pergeseran dibandingkan inti sesar, dan dicirikan oleh kehadiran struktur penyerta sesar (Choi dkk., 2016). Estimasi lebar zona hancuran sesar menggunakan metode frekuensi kumulatif dari data rekahan alami (**Gambar 5**). Perubahan densitas rekahan alami yang signifikan pada jarak tertentu dari bidang sesar merupakan batas dari zona hancuran sesar. Choi dkk. (2016) dan Fossen (2010) menyatakan bahwa lebar dari zona hancuran sesar memiliki hubungan yang sebanding dengan besar pergeseran dari sesar.

Distribusi Fraktal Rekahan Alami

Turcotte (1997) menyatakan bahwa fraktal adalah suatu geometri atau distribusi yang serupa dalam skala yang berbeda. Dimensi fraktal adalah suatu rasio yang memberikan indeks statistik kompleksitas yang menggambarkan bagaimana suatu pola berubah mengikuti skala pengukuran (Kenneth, 2003). Penelitian ini menggunakan regresi *power law* untuk menggambarkan pola distribusi atribut rekahan, sehingga tidak memiliki batasan skala (Bonnet dkk., 2001). Persamaan umum untuk distribusi *power law* adalah $y(x) = k(x)^{-c}$, dengan x adalah atribut rekahan (panjang rekahan, spasi antar rekahan, bukaan rekahan, dll.), $y(x)$ adalah distribusi rekahan, k adalah konstanta, dan c adalah dimensi fraktal. Tingkat kompleksitas rekahan alami tercermin dari nilai dimensi fraktal.



Gambar 5. Diagram skematik yang menunjukkan estimasi lebar zona hancuran sesar dengan metode frekuensi kumulatif. (a) Distribusi rekahan alami tegak lurus terhadap bidang sesar. (b) Diagram batang yang menunjukkan frekuensi rekahan pada setiap interval jarak. (d) Grafik antara frekuensi kumulatif rekahan dan jarak terhadap sesar, zona berwarna abu-abu merupakan zona hancuran sesar (Choi dkk., 2016).

Estimasi Nilai Porositas dan Permeabilitas Rekahan

Porositas adalah perbandingan volume rongga dengan volume total batuan, sedangkan permeabilitas didefinisikan sebagai kapasitas atau kemampuan suatu medium untuk mentransmisikan fluida (Aguilera, 1995). Porositas dan permeabilitas batuan dasar terekahkan diasumsikan diakomodasi seluruhnya oleh rekahan. Batuan kristalin pada umumnya memiliki porositas matriks yang sangat rendah, sehingga diasumsikan dapat diabaikan. Perhitungan nilai porositas batuan dasar di daerah penelitian menggunakan Metode Lucia (1983).

Evaluasi nilai permeabilitas menggunakan Hukum Darcy dengan menggunakan beberapa asumsi kondisi, yaitu aliran fluida pada kondisi stabil (*steady state*), horizontal dan linier, laminar, isothermal, viskositas konstan, dan seluruh pori batuan adalah jenuh fluida. Perhitungan nilai permeabilitas batuan dasar di daerah penelitian menggunakan Metode Cubes

dan Metode Matchstick oleh Reiss (1980). Metode Cubes dan Matchstick dipilih karena menggunakan model aliran fluida yang sesuai untuk batuan dasar yang memiliki lebih dari dua set rekahan (**Gambar 6**). Estimasi nilai porositas dan permeabilitas rekahan menggunakan perhitungan numerik sebagai berikut:

Porositas Rekahan (Lucia, 1983)

$$\phi_f = \frac{W}{Z} \times 100$$

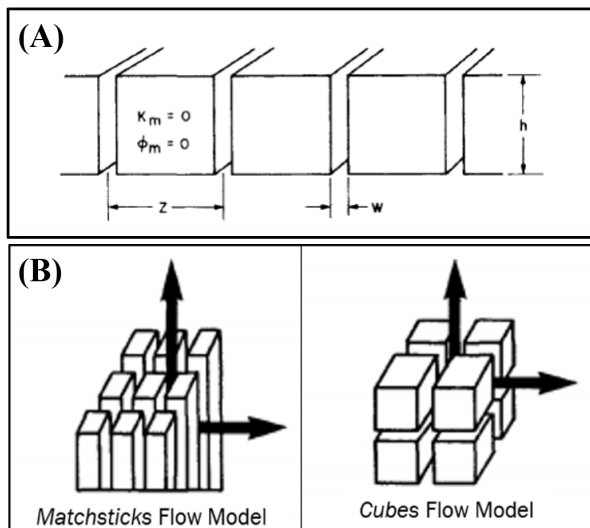
Permeabilitas Rekahan (Metode Cubes)

$$K_c = \frac{2}{3} \{ (8,35 \times 10^6 \times W^2) \times \frac{W^2}{Z} \}$$

Permeabilitas Rekahan (Metode Matchstick)

$$K_m = \frac{1}{2} \{ (8,35 \times 10^6 \times W^2) \times \frac{W^2}{Z} \}$$

dengan W adalah rata-rata lebar bukaan rekahan, Z adalah rata-rata spasi antar rekahan.



Gambar 6. (A) Model yang digunakan Lucia (1983) dalam estimasi porositas. Porositas matriks (ϕ_m) dan permeabilitas matriks (K_m) diasumsikan bernilai nol (Lucia, 1983). (B) Model yang digunakan Reiss (1980) dalam estimasi permeabilitas (Henzel, 1989).

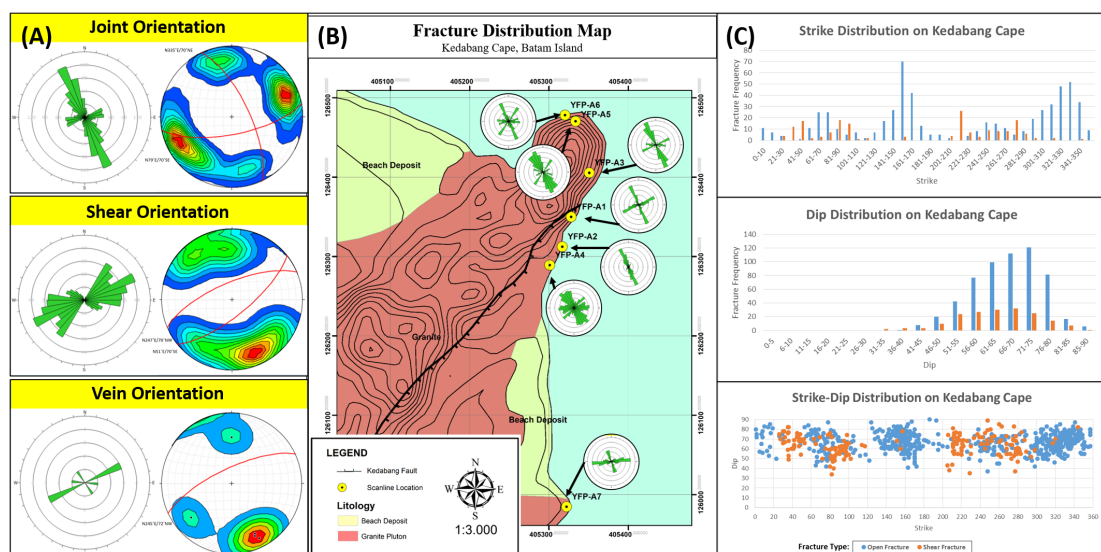
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Orientasi Rekahan Alami

Rekahan terbuka di Tanjung Kedababang memiliki dua arah umum rekahan yaitu utara barat laut-selatan tenggara (NNW-SSE) dan timur timur laut-barat barat daya (ENE-WSW) (**Gambar 7**). Kedua arah umum rekahan terbuka di Tanjung Kedabang membentuk

sudut yang relatif tegak lurus satu dengan yang lain. Berdasarkan Diagram Mawar, rekahan terbuka berarah utara barat laut-selatan tenggara (NNW-SSE) memiliki intensitas yang lebih besar dibandingkan rekahan terbuka berarah timur timur laut-barat barat daya (ENE-WSW). Narr dkk., 2006 menyatakan bahwa rekahan alami yang terbentuk terakhir (berumur paling muda) memiliki intensitas rekahan yang paling besar. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa rekahan terbuka berarah timur timur laut-barat barat daya (ENE-WSW) berumur lebih tua dibandingkan rekahan terbuka berarah utara barat laut-selatan tenggara (NNW-SSE).

Rekahan gerus di Tanjung Kedabang memiliki dua arah umum rekahan yaitu timur laut-barat daya (NE-SW) dan timur timur laut-barat barat daya (ENE-WSW). Rekahan terisi di Tanjung Kedabang seluruhnya merupakan rekahan terbuka yang terisi rongganya oleh mineral kuarsa. Rekahan terisi di Tanjung Kedabang memiliki arah umum rekahan yaitu timur laut timur-barat daya barat (ENE-WSW), searah dengan sudut lancip yang dibentuk oleh kedua arah umum rekahan gerus. Berdasarkan data, diinterpretasikan bahwa rekahan gerus dan rekahan terisi di Tanjung Kedabang merupakan struktur penyerta sesar yang terbentuk dalam satu periode deformasi selama pembentukan Sesar Tanjung Kedabang



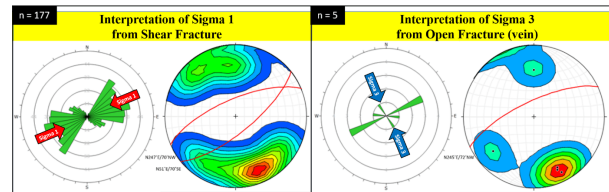
Gambar 7. (A) Orientasi umum tiap jenis rekahan alami di daerah penelitian. (B) Distribusi spasial rekahan alami di daerah penelitian. (C) Kedudukan rekahan alami di daerah penelitian.

Distribusi kemiringan rekahan alami di Tanjung Kedabang menunjukkan bahwa rekahan memiliki kemiringan yang bervariasi (31° - 90°). Distribusi kemiringan rekahan terbuka di Tanjung Kedabang menunjukkan kemiringan dominan yang relatif tegak, yaitu 66° - 75° . Rekahan terbuka yang memiliki kemiringan relatif tegak, diinterpretasikan terbentuk akibat proses burial, pengangkatan, dan penurunan cekungan. Rekahan terbuka yang memiliki kemiringan relatif landai, diinterpretasikan terbentuk akibat proses rotasi dari rekahan tegak, penghilangan beban, pembekuan magma, temperatur permukaan, erosi, dan pelapukan. Rekahan gerus di Tanjung Kedabang menunjukkan kemiringan yang terdistribusi cukup merata, yaitu antara 56° - 75° . Rekahan gerus diinterpretasikan terbentuk berasosiasi dengan pembentukan dan pergerakan sesar.

Interpretasi arah tegasan utama di daerah penelitian dilakukan berdasarkan arah umum rekahan gerus (*shear fracture*) dan rekahan terisi (*vein*). Fossen (2010) menyatakan bahwa rekahan gerus membentuk sudut lancip terhadap tegasan utama maksimum (σ_1) dan membentuk sudut tumpul terhadap arah tegasan utama minimum (σ_3). Orientasi rekahan terisi tegak lurus dengan arah tegasan minimum (σ_3). Daerah penelitian mengalami proses rotasi berlawanan arah jarum jam sebesar 10 - 15° pada Zaman Tersier akibat proses kolisi Blok Australia dengan Timor pada Eosen-Oligosen (Hutchison, 2014). Oleh karena itu, dalam analisis arah tegasan utama dilakukan proses re-rotasi, dengan cara merotasi arah umum rekahan gerus dan rekahan terisi sebesar 10° searah jarum jam.

Interpretasi arah tegasan utama menghasilkan arah tegasan utama maksimum (σ_1) di daerah penelitian adalah timur timur laut-barat daya (ENE-WSW, $N75^{\circ}E$), sedangkan arah tegasan utama minimum (σ_3) di daerah penelitian adalah utara barat laut-selatan tenggara (NNW-SSE, $N165^{\circ}E$) (**Gambar 8**). Arah tegasan utama tersebut sesuai dengan arah tegasan utama regional Pulau Batam dan sekitarnya pada Zaman Tersier hingga Kuartar, didukung pula dengan bukti kenampakan

lapangan berupa bidang lipatan (antiklin-sinklin) yang berarah barat laut-tenggara (NW-SE).



Gambar 8. Interpretasi arah tegasan utama berdasarkan orientasi *shear fracture* dan *vein*. Arah tegasan utama maksimum (σ_1) di daerah penelitian adalah ENE-WSW ($N75^{\circ}E$), sedangkan arah tegasan utama minimum (σ_3) adalah NNW-SSE ($N165^{\circ}E$).

Distribusi Intensitas dan Densitas Rekahan

Nilai intensitas rekahan alami di Tanjung Kedabang bervariasi pada rentang 6-32 rekahan/m. Nilai densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang bervariasi pada rentang 0,09-0,42 cm/cm². Distribusi intensitas dan densitas rekahan alami secara spasial menunjukkan hubungan antara distribusi rekahan alami dengan faktor-faktor geologi. Berdasarkan hasil analisis data dan pengamatan di lapangan, setidaknya ada dua faktor geologi yang mengontrol distribusi nilai intensitas dan densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang, yaitu struktur geologi dan litologi batuan dasar. Kontrol struktur geologi yang berpengaruh terhadap distribusi intensitas dan densitas rekahan alami adalah jarak dari bidang sesar, yaitu Sesar Tanjung Kedabang. Kontrol litologi batuan dasar yang berpengaruh terhadap distribusi intensitas dan densitas rekahan alami di daerah penelitian adalah perbedaan tekstur antara granit dan riolit.

Kontrol Struktur Geologi

Distribusi intensitas dan densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang menunjukkan hubungan spasial yang sangat baik terhadap Sesar Tanjung Kedabang. Semakin menjauhi bidang sesar maka intensitas dan densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang berkurang mengikuti persamaan *power law* (**Gambar 9**). Choi dkk. (2016) dan Fossen (2010) berpendapat bahwa rekahan alami akan

terakumulasi di zona di sekitar bidang sesar yang memiliki pergeseran lebih besar.

Kontrol Litologi Batuan Dasar

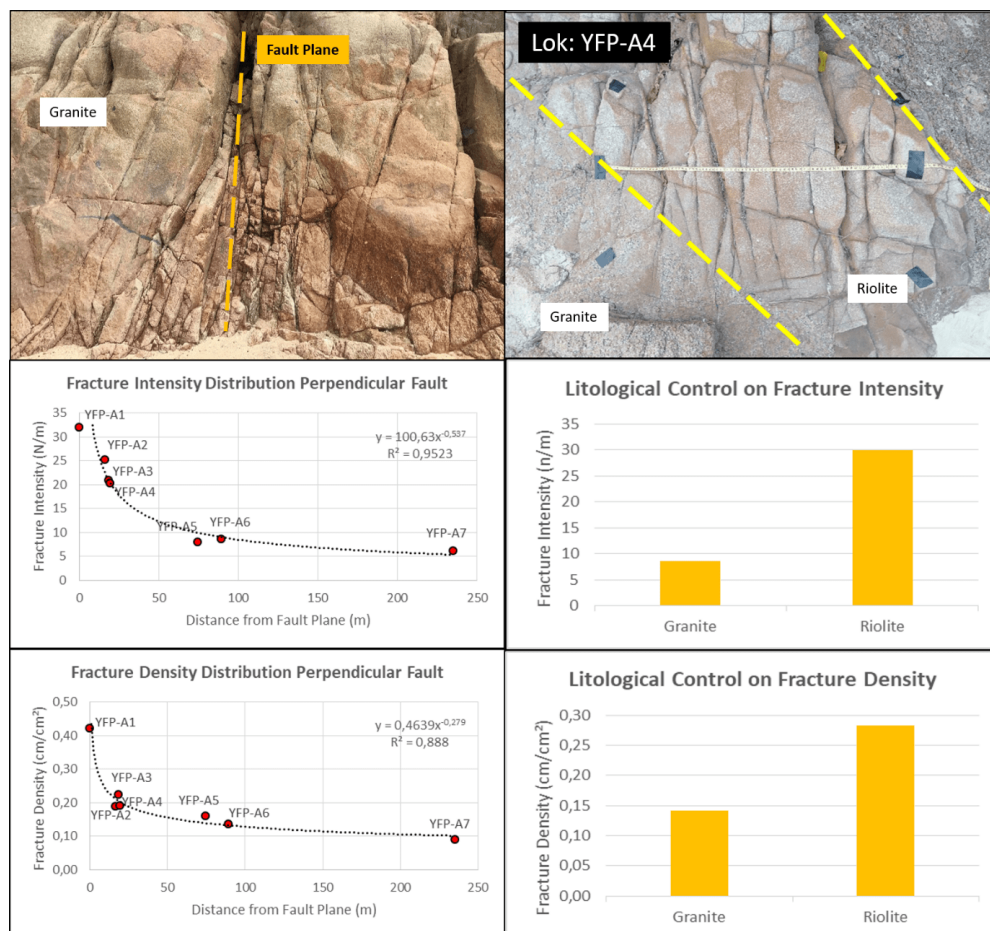
Pada lokasi YFP-A4, nilai intensitas dan densitas rekahan alami pada batuan dasar granit adalah 9 rekahan/m dan 0,14 cm/cm². Pada lokasi yang sama, nilai intensitas dan densitas rekahan alami pada batuan dasar riolit adalah 30 rekahan/m dan 0,28 cm/cm² (**Gambar 9**). Dapat disimpulkan bahwa nilai intensitas dan densitas rekahan alami pada batuan dasar riolit lebih besar dibandingkan pada batuan dasar granit.

Rekahan pada umumnya terbentuk pada material yang getas. Aguilera (1995) menyatakan bahwa derajat kegetasan batuan sangat berpengaruh terhadap pembentukan rekahan. Semakin tinggi derajat kegetasan batuan maka rekahan akan semakin mudah

terbentuk, karena batuan cenderung akan lebih mudah mengalami *failure*. Banyak variabel yang mempengaruhi derajat kegetasan batuan, diantaranya adalah mineralogi dan ukuran butir. Lambert (1979) menyatakan bahwa batuan yang memiliki mineralogi feldspar dan kuarsa yang tinggi akan cenderung memiliki rekahan yang lebih intensif. Stearns (1967) menyatakan bahwa batuan yang memiliki ukuran butir mineral yang halus akan cenderung memiliki rekahan yang lebih intensif.

Analisis Zona Hancuran Sesar (FDZ)

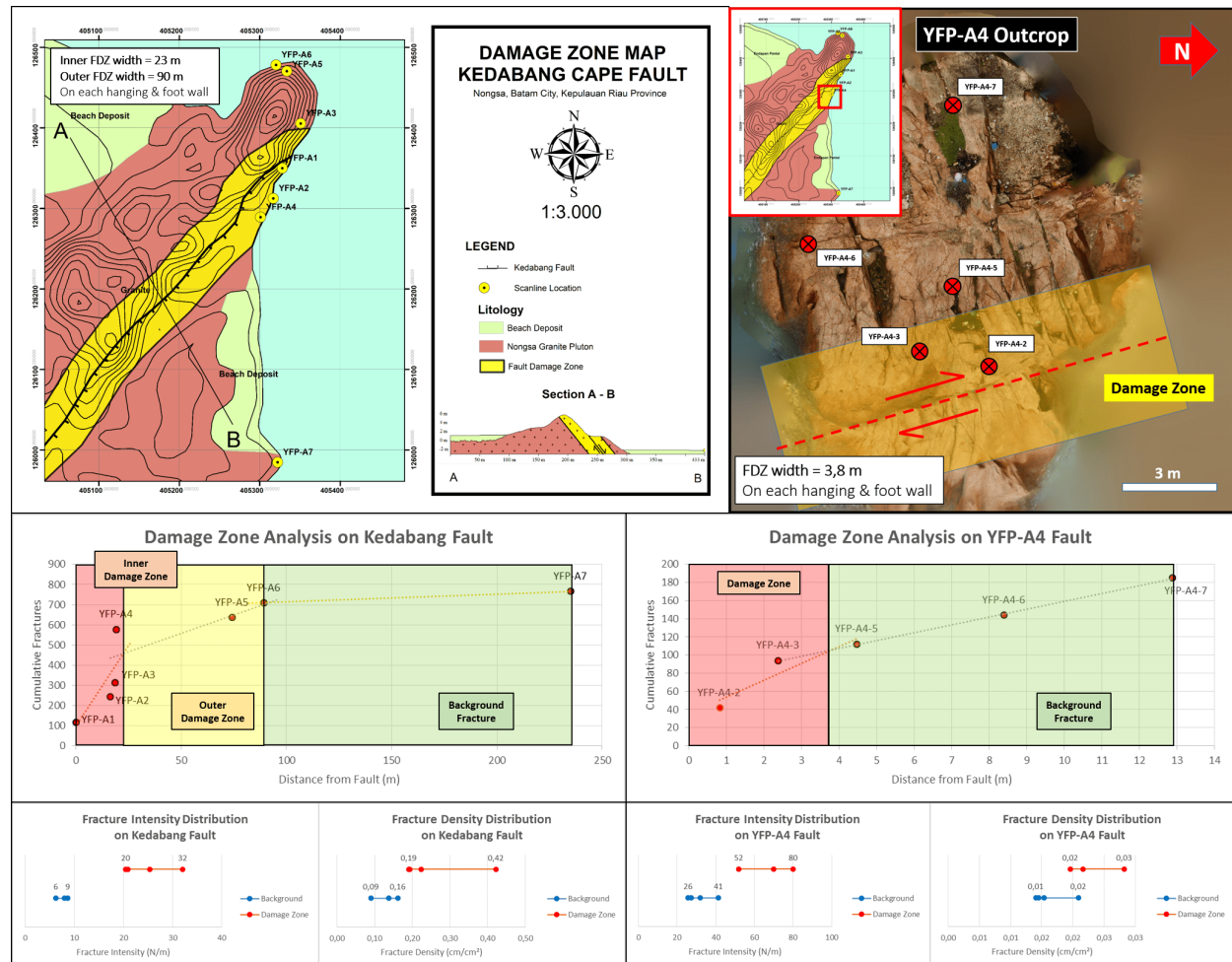
Sesar Tanjung Kedabang merupakan salah satu sesar dengan skala regional di Daerah Nongsa, Batam. Sesar Tanjung Kedabang merupakan sesar turun-menganan, kedudukan bidang sesar adalah N260°E/63°NW, dengan panjang sesar sekitar 1.100 m dan panjang displacement sekitar 21 m. Dari hasil analisis zona hancuran,



Gambar 9. Analisis faktor geologi yang mengontrol distribusi nilai intensitas dan densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang, yaitu struktur geologi dan litologi batuan dasar.

diperoleh bahwa lebar zona hancuran dalam untuk Sesar Tanjung Kedabang adalah 23 m, sedangkan zona hancuran luar adalah 90 m. Di salah satu singkapan di Tanjung Kedabang, terdapat juga sesar minor dengan skala singkapan, yaitu Sesar YFP-A4. Sesar YFP-A4 merupakan sesar mengangan, kedudukan bidang sesar adalah N158°E/76°SW, dengan panjang sesar sekitar 11 m dan panjang displacement sekitar 1,9 m. Dari hasil analisis zona hancuran,

diperoleh bahwa lebar zona hancuran untuk Sesar Minor Tanjung Kedabang adalah 3,8 meter. Berdasarkan grafik distribusi intensitas dan densitas rekahan, dapat disimpulkan bahwa nilai intensitas dan densitas rekahan alami semakin berkurang nilainya semakin jauh dari bidang sesar. Analisis zona hancuran sesar di daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Analisis lebar zona hancuran sesar (FDZ) di daerah Tanjung Kedabang. Nilai intensitas dan densitas rata-rata rekahan alami di dalam zona hancuran sesar lebih besar dibandingkan di luar zona hancuran.

Nilai intensitas dan densitas rata-rata rekahan alami di dalam zona hancuran sesar lebih besar dibandingkan di luar zona hancuran. Intensitas rekahan alami di dalam zona hancuran bervariasi pada rentang 20-80 rekahan/m, sedangkan intensitas rata-rata rekahan alami di luar zona hancuran bervariasi pada rentang 6 - 41 rekahan/m. Densitas rata-rata rekahan alami di dalam zona hancuran bervariasi pada rentang 0,02-0,42 cm/cm², sedangkan densitas

rata-rata rekahan alami di luar zona hancuran bervariasi pada rentang 0,01-0,16 cm/cm².

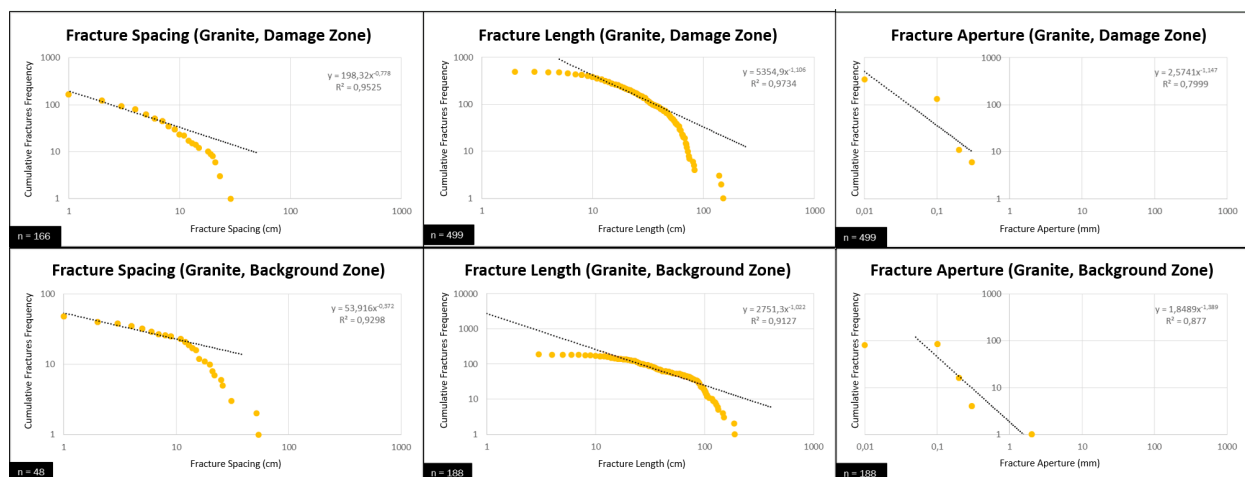
Analisis Sifat Fraktal

Spasi rekahan alami untuk batuan dasar granit di dalam FDZ Tanjung Kedabang mengikuti persamaan $y=198,32x^{-0,778}$. Panjang rekahan alami mengikuti persamaan $y=5354,9x^{-1,106}$, sedangkan bukaan rekahan alami untuk batuan dasar granit di dalam FDZ Tanjung Kedabang mengikuti persamaan $y=2,5741x^{-1,147}$. Spasi

rekahan alami untuk batuan dasar granit di luar FDZ Tanjung Kedabang mengikuti persamaan $y=53,916x^{-0,372}$. Panjang rekahan alami mengikuti persamaan $y=2751,3x^{-1,022}$, sedangkan bukaan rekahan alami untuk batuan dasar granit di luar FDZ Tanjung Kedabang mengikuti persamaan $y=1,8489x^{-1,389}$ (**Gambar 11**).

Analisis sifat fraktal rekahan alami di daerah penelitian menghasilkan kesimpulan bahwa rekahan alami di daerah penelitian bersifat fraktal mengikuti distribusi *power law*. Nilai dimensi fraktal (D) untuk spasi rekahan di daerah Tanjung Kedabang berada pada rentang 0,372-0,778, untuk panjang rekahan berada

pada rentang 1,022-1,106, sedangkan untuk bukaan rekahan berada pada rentang 1,147-1,389. Nilai dimensi fraktal untuk atribut spasi rekahan sesuai dengan referensi Turcotte (1997) untuk analisis 1D, yaitu pada rentang 0 hingga 1, sedangkan nilai dimensi fraktal untuk atribut panjang dan lebar bukaan rekahan sesuai dengan referensi untuk analisis 2D, yaitu pada rentang 1 hingga 2. Semakin besar nilai dimensi fraktal maka semakin kompleks pola distribusi dari atribut rekahan alami (Kenneth, 2003), sehingga dapat disimpulkan bahwa pola distribusi panjang dan bukaan rekahan alami lebih kompleks dibandingkan pola distribusi spasi rekahan alami.



Gambar 11. Analisis distribusi fraktal untuk setiap atribut rekahan alami di dalam dan luar zona hancuran sesar (FDZ) Tanjung Kedabang.

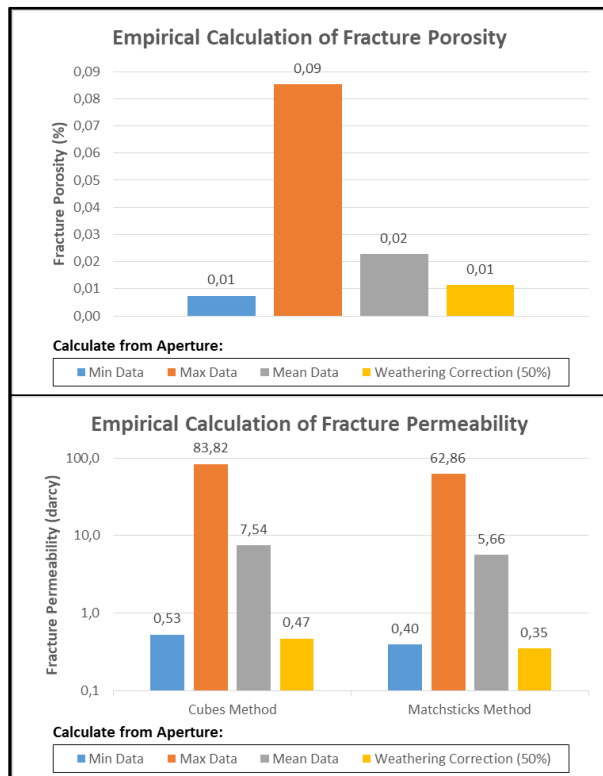
Estimasi Porositas dan Permeabilitas Rekahan

Estimasi nilai porositas dan permeabilitas dilakukan untuk batuan dasar di daerah Tanjung Kedabang dengan tiga kondisi, yaitu kondisi optimal, kondisi *overestimate*, dan kondisi *underestimate*. Kondisi optimal dihitung berdasarkan nilai rata-rata (*mean*) atribut rekahan, kondisi *overestimate* menggunakan nilai maksimal (*max*) atribut rekahan, sedangkan nilai *underestimate* menggunakan nilai minimal (*min*) atribut rekahan dan koreksi pengaruh pelapukan (*weathering*) sebesar 50%. Porositas rekahan di Tanjung Kedabang berkisar pada rentang 0,01-0,09%. Permeabilitas rekahan berdasarkan Metode Cubes berkisar pada rentang 0,53-83,82 darcy, sedangkan

berdasarkan Metode Matchstick berkisar pada rentang 0,40-62,86 darcy (**Gambar 12**). Berdasarkan hasil analisis data dan pengamatan di lapangan, setidaknya ada tiga faktor geologi yang mengontrol distribusi nilai porositas dan permeabilitas batuan dasar di Tanjung Kedabang, yaitu struktur geologi, atribut rekahan, dan intensitas-densitas rekahan.

Estimasi nilai porositas rekahan berdasarkan Metode Lucia (1983) menghasilkan nilai porositas yang mirip dengan lapangan minyak dan gas bumi pada reservoir yang terekahkan. Bergosh dan Lord (1987) memperoleh nilai porositas rekahan pada sampel inti bor adalah 1,81-9,64%, Weber dan Bakker (1981) memperoleh nilai porositas rekahan pada

batuan rijang di California adalah 5-8%, sedangkan Cuong dan Warren (2009) memperoleh nilai porositas pada batuan dasar terekahkan di Bach Ho adalah 10%. Estimasi nilai permeabilitas rekahan berdasarkan Metode Cubes dan Matchstick (Reiss, 1980) berada pada rentang nilai yang sesuai dengan estimasi nilai permeabilitas batuan kristalin terekahkan oleh Wang dan Narasimhan (1986), yaitu pada rentang 10^{-4} - 10^2 darcy.



Gambar 12. Hasil estimasi nilai porositas dan permeabilitas rekahan di daerah Tanjung Kedabang. Estimasi dilakukan dengan tiga kondisi, yaitu kondisi optimal, kondisi *overestimate*, dan kondisi *underestimate*.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil analisis data adalah sebagai berikut:

1. Rekahan alami yang ada di daerah penelitian terdiri atas rekahan terbuka (*joint*), rekahan gerus (*shear fracture*), dan rekahan terisi (*vein*). Rekahan terbuka (*joint*) berarah utara barat daya-selatan tenggara (NNW-SSE) dan barat-timur (W-E). Rekahan gerus (*shear fracture*) berarah timur laut-barat daya (NE-SW) dan barat

laut-tenggara (NW-SE). Rekahan terisi (*vein*) berarah timur timur laut-barat barat daya (ENE-WSW).

2. Nilai intensitas rekahan alami di Tanjung Kedabang adalah 6-32 rekahan/m, sedangkan nilai densitas rekahan alami di Tanjung Kedabang adalah 0,09-0,42 cm/cm². Faktor kontrol distribusi intensitas dan densitas rekahan alami adalah struktur geologi dan litologi batuan dasar.
3. Lebar zona hancuran dalam untuk Sesar Tanjung Kedabang adalah 23 m, sedangkan zona hancuran luar adalah 90 m. Lebar zona hancuran untuk sesar di singkapan YFP-A4 adalah 3,8 meter. Berdasarkan grafik, dapat disimpulkan bahwa nilai intensitas dan densitas rata-rata rekahan alami di dalam zona hancuran sesar lebih besar dibandingkan di luar zona hancuran.
4. Analisis sifat fraktal rekahan alami di daerah penelitian menghasilkan kesimpulan bahwa rekahan alami di daerah penelitian bersifat fraktal mengikuti distribusi *power law*. Nilai dimensi fraktal (D) untuk spasi rekahan di daerah Tanjung Kedabang berada pada rentang 0,372-0,778, untuk panjang rekahan berada pada rentang 1,022-1,106, sedangkan untuk bukaan rekahan berada pada rentang 1,147-1,389.
5. Porositas rekahan di Tanjung Kedabang berkisar pada rentang 0,01-0,09%. Permeabilitas rekahan berdasarkan Metode Cubes berkisar pada rentang 0,53-83,82 darcy, sedangkan berdasarkan Metode Matchstick berkisar pada rentang 0,40-62,86 darcy.
6. Estimasi nilai porositas rekahan menghasilkan nilai porositas yang mirip dengan reservoir rekah alami. Sedangkan estimasi nilai permeabilitas rekahan berada pada rentang nilai yang sesuai dengan estimasi nilai permeabilitas batuan kristalin terekahkan. Dapat disimpulkan bahwa hasil analisis karakteristik singkapan batuan dasar di daerah penelitian cocok digunakan dalam studi analog reservoir rekah alami.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ir. Benyamin Sapiie, Ph.D dan Alfend

Rudyawan, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D yang telah memberikan banyak ilmu, sumber daya, dan bimbingan selama penelitian. Terima kasih juga kepada masyarakat di Pulau Batam yang telah mengizinkan dan banyak membantu proses pengambilan data di lapangan.

REFERENSI

- Aguilera, R. (1995): *Naturally fractured reservoir; second edition*, Pennwell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milsom, J. S. (2005): *Sumatra; geology, resources, and tectonic evolution*, Geological Society, London.
- Bergosh, J. L. dan Lord, G. D. (1987): New developments in the analysis of cores from naturally fractured reservoirs, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- Bonnet, E., Bour, O., Odling, N. E., Davy, P., Main, I., Cowie, P., Berkowitz, B. (2001): Scaling of fracture systems in geological media, *Reviews of Geophysics*, **39**, 347-383.
- Choi, J. H., Edwards, P., Ko, K., Kim, Y. S. (2016): Definition and classification of fault damage zones; a review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, **152**, 70-87.
- Cuong, T. X. dan Warren, J. K. (2009): Bach Ho Field; A fractured granitic basement reservoir, Cuu Long Basin, offshore SE Vietnam, *Journal of Petroleum Geology*, **32**, 129-156.
- Darman, H. dan Sidi, F. H. (2000): *An outline of the geology of Indonesia*, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Jakarta.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., Kluth, C. F. (2012): *Structural geology of rocks and regions; 3rd edition*. Wiley.
- Dennis, J. G. (1967): *International tectonic dictionary*, American Association of Petroleum Geologists Memoir.
- Fossen, H. (2010): *Structural geology*, Cambridge University Press, UK.
- Hall, R., Clements, B., dan Smyth, H. R. (2009): Sundaland; Basement character, structure, and plate tectonic development, *Indonesian Petroleum Association Proceedings*.
- Harbury, N. A., Jones, M. E., Audley-Charles, M. G., Metcalfe, I., dan Mohamed, K.R. (1990): Structural evolution of Mesozoic Peninsular Malaysia, *Journal of the Geological Society*, **147**, 11-26.
- Hensel Jr., W. M. (1989): A perspective look at fracture porosity, *Society of Petroleum Geology*.
- Hutchison, C. S. (2014): Tectonic evolution of Southeast Asia, *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, **60**, 1-18.
- Kenneth, F. (2003): *Fractal geometry; mathematical foundation and applications*, John Wiley and Sons, 366.
- Kusnama, Sutisna, K., Amin, T. C., Koesoemadinata, S., Sukardi, Hermanto, B. (1994): *Peta geologi lembar Tanjungpinang, Sumatera, skala 1:250.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Lambert, P. (1979): Fractures induced by shock in quartz and feldspar, *Stainlesssteel*, **304**, 0-10.
- Landes, K. K., Amoruso, J. J., Charlesworth Jr, L. J., Heany, F., Lesperance, P. J. (1960): Petroleum resources in basement rocks. *AAPG Bulletin*, **44**, 1682-1691.
- Laubach, S. E. (2003): Practical approaches to identifying sealed and open fractures, *AAPG Bulletin*, **87**, 561-579.
- Laubach, S. E. and Ward, M. E. (2006): Diagenesis in porosity evolution of opening mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico, *Tecmercerontonophysics*, **419**, 75-97.
- Lucia, F. J. (1983): Petrophysical parameters estimated from visual descriptions of carbonate rocks; a field classification of carbonate pore space, *Journal of Petroleum Technology*, **35**, 629-637.
- Metcalfe, I. (2000): The Bentong-Raub suture zone, *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**, 691-712.
- Narr, W., Schechter, D. S., dan Thompson, L. B. (2006): *Naturally fractured reservoir characterization*, Society of Petroleum Engineers, USA.
- Nelson, R. (2001): *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*, Gulf

- Professional Publishing.
- Ortega, O. J., Marrett, R. A., Laubach, S. E. (2006): A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement, *AAPG Bulletin*, **90**, 193-208.
- Peacock, D. C. P. dan Mann, A. (2005): Evaluation of the controls on fracturing in reservoir rocks, *Journal of Petroleum Geology*, **28**, 385-396.
- Petford, N. dan McCaffrey, K. (2003): *Hydrocarbons in crystalline rocks: an introduction*, Geological Society Special Publications, London, 1-5.
- Reiss, L. H. (1980): *The reservoir engineering aspects of fractured formations*, Gulf Publishing Co., Houston.
- Santos, R. F., Miranda, T. S., Barbosa, J. A., Gomes, I. F., Matos, G. C., Gale, J. F., Virginio, H. L. M., Neumann, L. J. (2015): Characterization of natural fracture systems; analysis of uncertainty effects in linear scanline results, *AAPG Bulletin*, **99**, 2203-2219.
- Sapiie, B. (1998): Strike-slip faulting, breccia formation and porphyry Cu-Au mineralization in the Gunung Bijih (Ertsberg) Mining District. Irian Jaya, Indonesia, *Tesis Program Ph. D.*, Austin, University of Texas.
- Schwartz, M.O., Rajah, S. S., Askury, A. K., Putthapiban, P., dan Djaswadi, S. (1995): The southeas asian tin belt, *Earth Science Reviews*, **38**, 95-293.
- Searle, M.P., Whitehouse, M. J., Robb, L. J., Ghani, A. A., Hutchison, C. S., Sone, M., Ng, S.W.P., Roselee, M. H., Chung, S.L., dan Oliver, G. J. H. (2012): Tectonic evolution of the Sibumasu-Indochina terrane collision zone in Thailand and Malaysia; constraints from new U-Pb zircon chronology of SE asian tin granitoids, *Journal of Geological Society*, **169**, 489-500.
- Setiady, D. dan Faturachman, A. (2004): Tipe granit sepanjang pantai timur Pulau Batam dan pantai barat Pulau Bintan, perairan Selat Batam Bintan, *Jurnal Geologi Kelautan*, **2**, 9-14.
- Sircar, A. (2004): Hydrocarbon production from fractured basement formations, *Current Science*, **87**, 147-151.
- Stearns, D. W. (1967): Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks, *NSF Advanced Science Seminar in Rock Mechanics*, Bedford, Massachusetts, 97-118.
- Streckeisen, A. (1976): Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks, *Geologische Rundschau*, **63**, 773-786.
- Tjia, H. D. (2014): Wrench-slip reversals and structural inversions; Cenozoic slide-rule tectonics in Sundaland, *Indonesian Journal on Geoscience*, **1**, 35-52.
- Turcotte, D. L. (1997): *Fractal distributions in geology, scale invariance, and deterministic chaos; fractals in the earth sciences*, Springer US, 1-40.
- Van Bemmelen, R. W. (1949): *The geology of Indonesia, vol. 1*, Government Printing Office, The Hauge, Amsterdam.
- Velde, B., Dubois, J., Touchard, G., Badri, A. (1990): Fractal analysis of fractures in rocks; the Cantor's Dust Method, *Tectonophysics*, **179**, 345-352.
- Wang, J. S. Y. dan Narasimhan, T. N. (1986): *Hydrologic mechanisms governing partially saturated fluid flow in fractured welded units and porous nonwelded units of Yucca Mountain*, Sandia Nat'l, Albuquerque, New Mexico, 74.
- Weber, K. J. dan Bakker, M. (1981): Fracture and vuggy porosity, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P. D., dan Blum, P. (2013): Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops, *AAPG Bulletin*, **97**, 1546-1566.

Sumber dari web site:

Citra satelit Pulau Batam dan sekitarnya, data diperoleh melalui situs internet: <https://www.google.com/intl/id/earth>. Diunduh pada tanggal 20 Juli 2020 pukul 10.00 WIB.