BAB III
METODE PENELITIAN

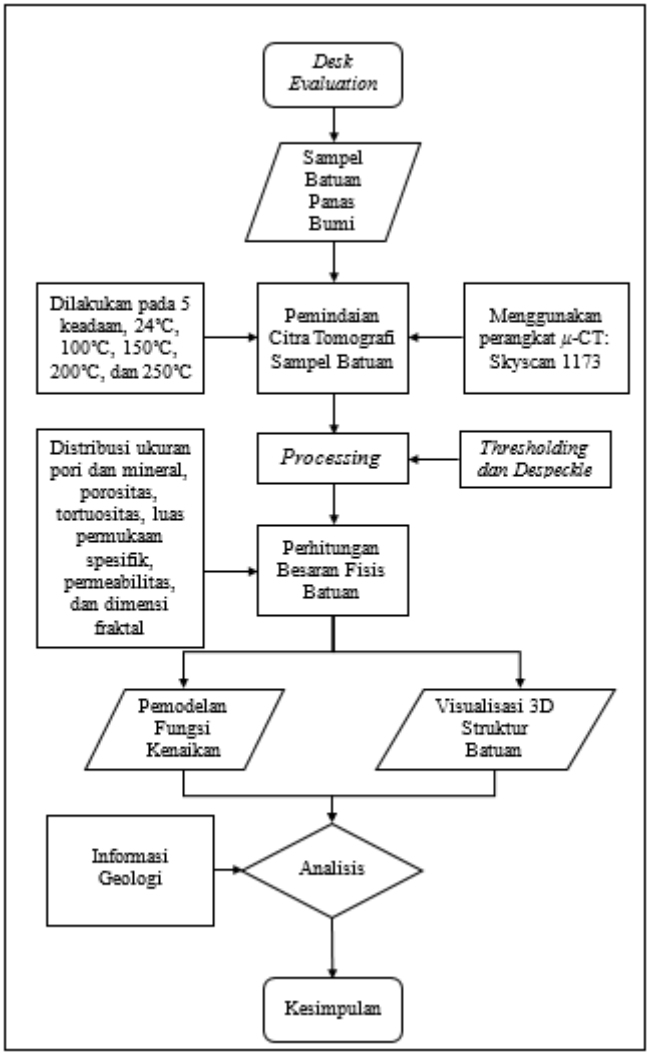
3.1 Lokasi Penelitian Data dan Sampel Penelitian

Dari daerah penelitian yang ditunjukan oleh Gambar 2.1 ditunjukan bahwa wilayah penelitian memiliki luas wilayah sekitar 9,5x12km^2. Sampel batuan jenis andesit biotit yang diambil dari kedalaman 512 meter dari sumur landaian suhu tersebut dikonstruksi dalam bentuk silinder dengan ukuran diameter 4,5 cm dan tinggi 4,3 cm seperti pada Gambar 3.2. Sampel batuan hasil intibor termasuk batuan penudung (*cap rock*) yang berada pada lapisan penudung (*clay cap*).

Gambar 3. 1 Sampel Batuan Panas Bumi

3.2 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis struktur batuan 3D yang diberikan pengaruh suhu yang bervariasi pada sampel batuan. Akuisisi data untuk struktur batuan 3D dilakukan dengan pemindaian citra tomografi batuan. Adapun alur penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

3.3 Tahapan Penelitian

3.3.1 *Desk Evaluation*

Desk evaluation merupakan kegiatan awal sebelum melakukan penelitian. Pada *desk evaluation* ini dilakukan penentuan tujuan penelitian, lokasi penelitian, studi pustaka, dan menentukan metode penelitian yang akan digunakan. Studi pustaka dilakukan dengan mencari informasi sebagai literatur yang akan digunakan selama penelitian berupa data, gambar ataupun informasi pendukung lainnya. Studi pustaka didapatkan dari berbagai sumber yang berasal dari buku, jurnal, peta geologi, dan laporan-laporan penelitian sebelumnya serta sumber lainnya di internet. Kegiatan *desk evaluation* dirasa penting untuk dilakukan, agar disaat penelitian lebih terarah.

3.3.2 Sampel Batuan Panas Bumi

Sampel batuan panas bumi didapatkan dari Laboratorium Conto Batuan Pusat Sumber Daya Mineral Batu Bara dan Panas Bumi. Sampel batuan yang didapatkan berupa sampel yang diambil dari batuan intibor dari sumur berpotensi panas bumi pada kedalaman 512 m, dengan jenis batuan andesit biotit seperti pada Gambar 3.1. Sampel batuan telah dikonstruksi menjadi bentuk silinder.

3.3.3 Pemberian Perlakuan Suhu

Sampel batuan diberikan total lima variasi perlakuan panas, dengan asumsi awal sampel batuan berada pada suhu ruang sebesar 24˚C, selanjutnya diberikan perlakuan suhu sebesar 100˚C, 150˚C, 200˚C, dan 250˚C. Pemberian perlakuan panas dilakukan dengan menggunakan Oven OF-02G di Laboratorium Instrumentasi Fisika FMIPA ITB yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Gambar 3. 3 Oven OF-02G

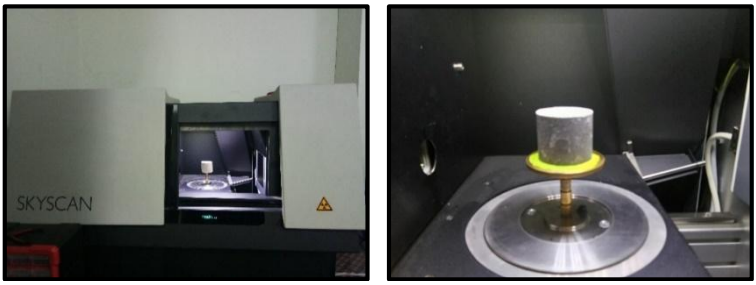
Tahapan pemberian perlakuan panas pada sampel batuan, adalah sebagai berikut:

1. nyalakan oven dan pastikan bahwa oven berada pada suhu ruang sebesar 24˚C,
2. atur suhu pada keadaan perlakuan suhu maksimum yang akan diberikan pada sampel batuan,
3. atur waktu oven saat berada pada suhu maksimum selama 30 menit sebelum suhu diturunkan kembali, hal ini berdasarkan metodologi peneliti sebelumnya (Zhang, dkk., 2001; Uvarova, dkk., 2014; Tobing, 2016),
4. setelah suhu ditahan selama 30 menit, atur kembali oven pada suhu ruang dan diamkan sampel disaat suhu dalam oven mengalami penurunan secara perlahan. Hal ini diharapkan agar tidak terjadinya retakan akibat dari perubahan suhu yang tiba-tiba. Sampel batuan dapat dikeluarkan setelah oven berada pada suhu ruang kembali.

3.3.4 Tahapan Rekonstruksi Data Digital Sampel Batuan

1. Pemindaian Sampel Batuan

Pemindaian citra 3D pada penelitian ini menggunakan instrumen μ-CT: Skyscan 1173 produksi Bruker dapat dilihat pada Gambar 3.4. Skyscan 1173 merupakan pemindai komputer tomografi berskala mikro (*micro computed tomography (*μ-CT *CT scanner*) yang dimana sumber radiasinya berupa sinar-X polikromatik dengan tegangan antara 40-130 kV.



a. Bruker µ-CT: Skyscan 1173 b. Persiapan Pemindaian Sampel

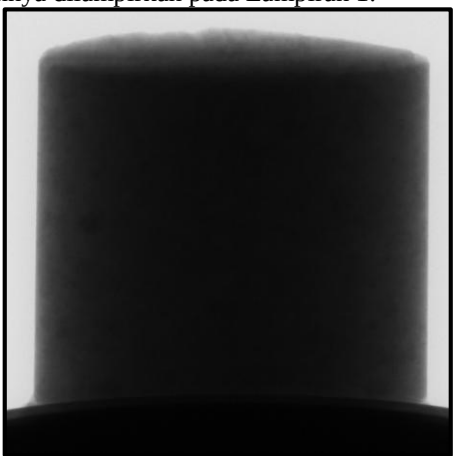
Gambar 3. 4 Proses Pemindaian Sampel

Sebelum melakukan pemindaian, perlu dilakukan pengecekan terhadap *profile line* yang menandakan profil transmisi energi sinar-X selama melewati sampel. Standar umum yang digunakan adalah nilai minimum pada kisaran 10-30% dan maksimum pada nilai 90%. Untuk mendapatkan kualitas citra yang baik, beberapa parameter yang berhubungan dengan *profile line* harus diperhatikan seperti:

a. tegangan (kV), yaitu besaran tegangan yang berkaitan erat dengan energi output sinar-X selama pemindaian. Nilai kV sangat bergantung pada densitas yang dimiliki sampel,
b. arus (μA), yaitu besaran arus yang digunakan selama pemancaran sinar-X,
c. durasi pemaparan (ms), yaitu besaran waktu yang menyatakan durasi penerimaan sinar-X oleh detektor selama proses pemindaian,
d. filter, memiliki peran dalam mengontrol spectrum sinar-X polikromatik yang dipancarkan selama pemindaian. Pada μ-CT: Skyscan 1173 terdapat dua buah jenis filter yaitu Brass 0,25 mm dan Alumunium 1 mm.

Proses pemindaian sampel dengan sinar-X yang dipancarkan oleh sumber akan merambat dalam suatu garis lurus sehingga energi yang berasal dari sinar-X dapat menembus sampel batuan, hal ini mengakibatkan sebagian energi pada sniar-X akan mengalami atenuasi, sehingga intensitas sinar-X yang tereduksi akan direkam oleh detektor

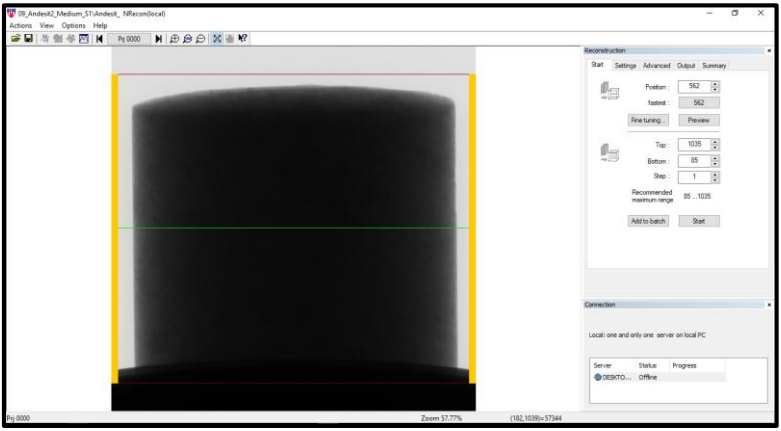
sebagai cahaya tampak yang kemudian diubah menjadi electron dengan bantuan chip semikonduktor CCD. Bentuk eleltron akan diubah oleh *Analog Digital Converter* (ADC) menjadi citra digital bayangan sampel yang ditunjukan pada Gambar 3.5. Pada pemindaian ini menggunakan sumber arus sebesar 60 μA dan 125 kV dengan uraian parameter pemindaian lainnya dilampirkan pada Lampiran 1.



Gambar 3. 5 Data Hasil Dari Pemindaian Sampel

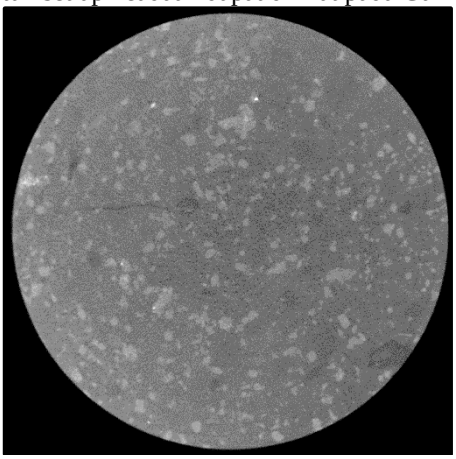
2. Rekonstruksi Data Digital Sampel Batuan

Rekonstruksi merupakan proses merekonstruksi citra proyeksi menjadi citra 3D yang kemudian dilakukan pengirisan *cross-section* menjadi citra sayatan tipis (*thin section image*) per satu piksel yang diiris pada arah sumbu *z*. Proses rekonstruksi ini menggunakan perangkat lunak NRecon. Pengaturan dan parameter rekonstruksi dapat dilihat pada Lampiran 2. Tampilan NRecon dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Tahapan Rekonstruksi Data Digital Pada Sampel Batuan

Banyaknya *thin section* yang dihasilkan pada proses rekonstruksi bergantung pada *Top*, *Bottom* dan *step*-nya. Pada penelitian ini pada setiap perlakuan akan direkonstruksi pada parameter yang sama dan menghasilkan 552 citra *thin section*. Salah satu contoh hasil dari rekonstruksi untuk setiap keadaan dapat dilihat pada Gambar 3.7.

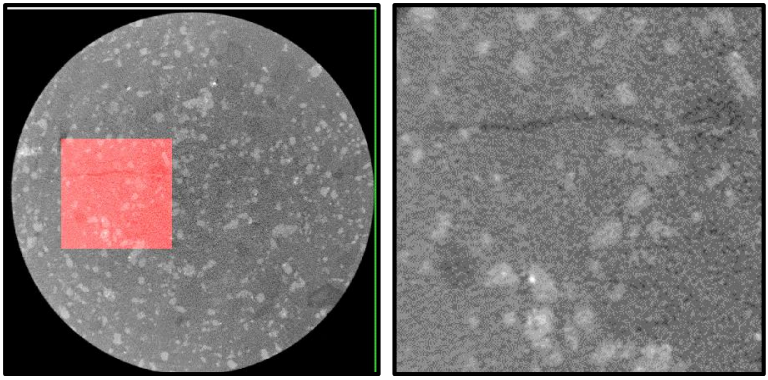


Gambar 3. 7 Citra Thin Section Hasil Rekonstruksi

3. *Region Of Interest* (ROI)

ROI adalah proses pemilihan suatu daerah dari hasil citra digital sampel yang akan dianalisis lebih lanjut, sehingga sampel yang akan

dipindai mengalami pemotongan citra. ROI dilakukan untuk mempermudah menganalisis lebih lanjut dikarenakan sampel batuan tidak utuh silinder dan pada beberapa bagian tidak terlihat perubahan yang signifikan akibat perlakuan panas yang diberikan. Pada penelitian ini, dapat dilihat ROI yang digunakan yaitu pada Gambar 3.8 dengan berbentuk persegi ukuran 300 × 300 piksel yang ditunjukan oleh warna merah.



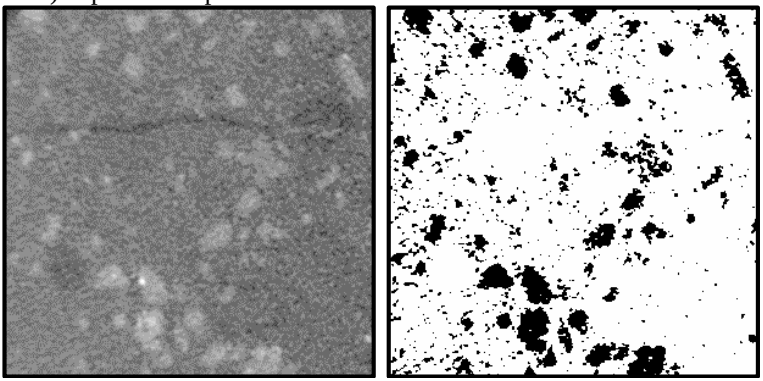
a. Penentuan ROI b. ROI

Gambar 3. 8 Hasil Penentuan ROI pada Sampel

4. Pengubahan Data ke *Binary* (*Thresholding*)

Thresholding merupakan proses merubah citra hasil rekonstruksi menjadi citra biner. Pada proses ini merupakan proses yang penting dikarenakan seluruh data yang akan dianalisis merupakan citra biner. Pada proses *thresholding*, warna hitam (piksel bernilai 0) menandakan batuan sedangkan warna putih (piksel bernilai 1) menandakan pori, rekahan dan mineral batuan. *Thresholding* bekerja dengan mengaplikasikan suatu nilai batas tertentu (*thresholding value*) terhadap seluruh piksel pada suatu citra untuk dibandingkan. Apabila nilai intensitas citra lebih kecil daripada nilai batas, maka nilai piksel tersebut akan diubah menjadi sama dengan 0, sementara piksel yang memiliki nilai lebih besar daripada nilai batas akan diubah menjadi sama dengan 1. Sehingga, citra *greyscale* yang semula memiliki sebaran intensitas nilai piksel 0-255 akan diubah menjadi citra biner yang hanya memiliki intesitas piksel 0 dan 1.

Thresholding dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu manual dan otomatis. Penentuan nilai batas pada suatu piksel dianggap dapat menghasilkan *foreground* dan *background* yang tersegmentasi atau dikatakan terpisahkan dengan baik (Otsu, 1976). Metode Otsu bersifat global yang berarti nilai batas tersebut akan diaplikasikan untuk semua citra yang dianalisis. Pada penelitian ini dilakukan *thresholding* menggunakan perangkat lunak CTAn dengan penentuan nilai batas menggunakan *Automatic Thresholding* metode *Global Thresholding* (Otsu) dapat dilihat pada Gambar 3.9.



a b

Gambar 3. 9 ROI a. Citra Greyscale; b. Citra Biner

Pada penelitian ini penentuan nilai batas piksel menggunakan *automatic thresholding* ditunjukan pada tabel 3.1.

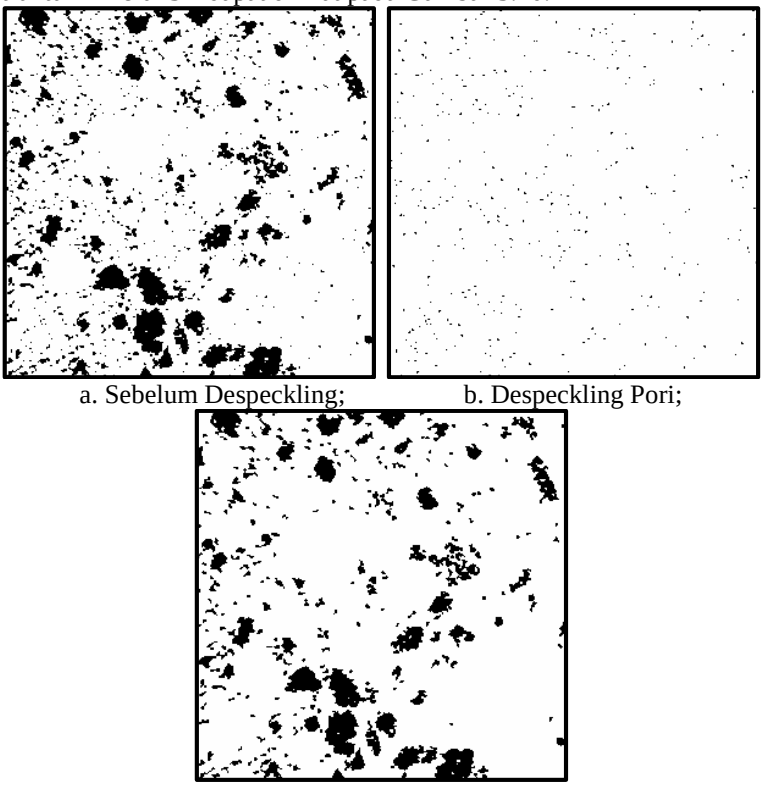
Tabel 3. 1
Penentuan Nilai Batas Piksel

Suhu (˚C)	**Nilai Batas (piksel)**
24	69
100	65
150	63
200	63
250	65

5. Pengisolasian (*Despeckling*)

Hasil citra dari pemindaian dan juga proses *thresholding* masih tersusun oleh matriks, pori, mineral dan rekahan. Sehingga citra biner haruslah dilakukan proses *despeckling* untuk menghindari ambiguitas dalam proses analisis. *Despeckling* merupakan suatu proses dimana citra

biner tertentu akan diisolasi dan yang lainnya dihilangkan. Pada proses ini yang dilakukan adalah penghilangan mineral, untuk menganalisis struktur pori 3D batuan dan penghilangan pori, untuk menganalisis struktur mineral 3D dapat dilihat pada Gambar 3.10.



a. Sebelum Despeckling; b. Despeckling Pori;

c. Despeckling Mineral

Gambar 3. 10 Hasil proses Despeckling pada Sampel Batuan

Hasil Gambar 3.10 merupakan hasil gambar setelah mengalami proses *threshold* dan juga *despeckling* dengan parameter *despeckling* yang digunakan yaitu, untuk mendapatkan hasil pori menggunakan *remove black speckles more than 4 pixels* dan untuk mendapatkan hasil mineral menggunakan *remove black speckles less than 4 pixels*. Nilai 4 piksel menjadi sebuah pertimbangan dalam melakukan *despeckling* pada

sampel, dengan mengikuti literatur mineral pada hasil petrologi batuan sampel dimana ukuran mineral terkecil adalah 0,02 mm yang sama dengan ± 4 piksel.

3.4 Karakterisasi Struktur Batuan 3D

3.4.1 Karakterisasi Struktur Batuan 3D

1. Karakterisasi Struktur Pori 3D

Karakterisasi struktur pori dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi ukuran pori akibat pengaruh suhu pada sub sampel batuan. Hasil perhitungan distribusi pori didapatkan dengan menganalisis citra struktur pori 3D menggunakan perangkat lunak CTAn. Hasil citra pori 3D dianalisis menggunakan *structure separation* yang berfungsi untuk mengetahui distribusi ukuran pori dalam piksel dan akan diperoleh frekuensi pada ukuran pori tersebut. Selain itu dapat diketahui volume pori pada sub sampel batuan yang dianalisis. Hasil dari distribusi ukuran pori dalam piksel dibuat grafik hubungan frekuensi terhadap ukuran pori pada setiap perlakuan suhu. Pada karakterisasi struktur pori, tidak hanya pori saja yang dianalisis. Tetapi dapat juga menganalisis rekahan apabila memungkinkan.

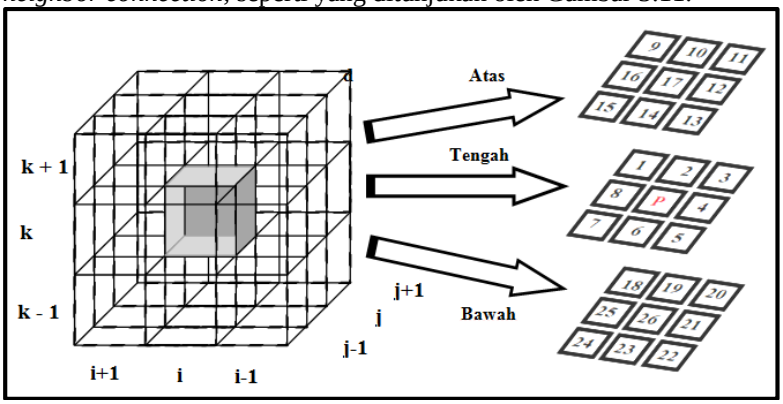
2. Karakterisasi Struktur Mineral 3D

Karakterisasi struktutr mineral dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi ukuran mineral akibat pengaruh suhu pada sub sampel batuan. Sama dengan hasil perhitungan distribusi pori, hasil perhitungan distribusi mineral juga didapatkan dengan menganalisis citra struktur mineral 3D menggunakan perangkat lunak CTAn. Hasil citra mineral 3D dianalisis menggunakan *structure separation* yang berfungsi untuk mengetahui distribusi ukuran mineral dalam piksel dan akan diperoleh frekuensi ukuran mineral tersebut. Hasil tersebut dibuat dalam bentuk grafik hubungan frekuensi dan distribusi ukuran mineral pada setiap perlakuan suhu.

3.4.2 Karakterisasi Besaran Transpor Fluida

Karakterisasi besaran transport fluida adalah porositas (ϕ), tortuositas (τ), luas permukaan spesifik (SsA) dan permeabilitas (k) dengan menggunakan perangkat lunak CTAn dan MATLAB. Pada perangkat lunak CTAn, hasil citra dilakukan proses 3D *analysis* dengan memilih *Structure model index*, *Structure separation* dan *Number of objects*. Untuk porositas menggunakan data hasil *volume open porosity* dan total VOI sampel, untuk luas permukaan spesifik menggunakan data hasil *object surface density* dan untuk permeabilitas digunakan perhitungan Kozeny-Carmann dengan nilai c (faktor geometri) dan tortuositas dianggap sebagai konstanta yang ditetapkan.

Tortousitas (τ) dapat dihitung berdasarkan metode yang diusulkan oleh Fauzi dan Ariwibowo (2006). Tortuositas dihitung dengan terlebih dahulu melakukan pelacakan jalur pori terhubung menggunakan metode CFRW. Sampel batuan direpresentasikan dalam bentuk matriks berukuran ($l \times m \times n$). Jalur pori terhubung dilacak dengan metode *nearest neighbor connection*, seperti yang ditunjukan oleh Gambar 3.11.



Sumber: Feranie, dkk., 2011

Gambar 3. 11 Bilangan Koordinat Matriks Pada Model Batuan 3D

Pada Gambar 3.12 menunjukan adanya huruf *i*, *j*, *k* yang merupakan koordinat satuan pada sumbu *x*, *y*, dan *z* secara berturut-turut. Selanjutnya, makna *i*+1 dan *i*-1; *j*+1 dan *j*-1 Selanjutnya, makna *i*+1 dan *i*-1; *j*+1 dan *j*-1; *k*+1 dan *k*-1 merupakan pertambahan koordinat dan pengurangan koordinat. Kotak abu-abu (*P*) pada Gambar 3.12 adalah titik acuan koordinat. Dalam ruang 3D, titik-titik dalam kubus 3^3 ditandai dengan koordinat matriks yang didistribusikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2
Koordinat Matriks Relatif Terhadap P

	Koordinat matriks
2	A(i, j+1 , k)
3	A(i -1, j+1, k)
1	A(i+1, j+1, k)
4	A(i-1, j, k)
8	A(i+1, j, k)
6	A(i, j-1, k)
5	A(i-1, j-1, k)
7	A(i+1, j-1, k)
17	A(i, j, k+1)
12	A(i-1, j, k+1)
16	A(i+1, j, k+1)
10	A(i, j+1, k+1)
11	A(i-1, j+1, k+1)
9	A(i+1, j+1, k+1)
14	A(i, j-1, k+1)
13	A(i-1, j-1, k+1)
15	A(i+1, j-1, k+1)
26	A(i, j, k-1)
21	A(i-1, j, k-1)
25	A(i+1, j, k-1)
19	A(i, j+1, k-1)
20	A(i-1, j+1,k-1)
18	A(i+1, j+1, k-1)
23	A(i,j-1, k-1)
22	A(i-1, j-1, k-1)
24	A(i+1, j-1, k-1)

Warna merah, hijau, dan biru menunjukkan subkubus di bagian tengah, atas, dan bawah secara berurutan.

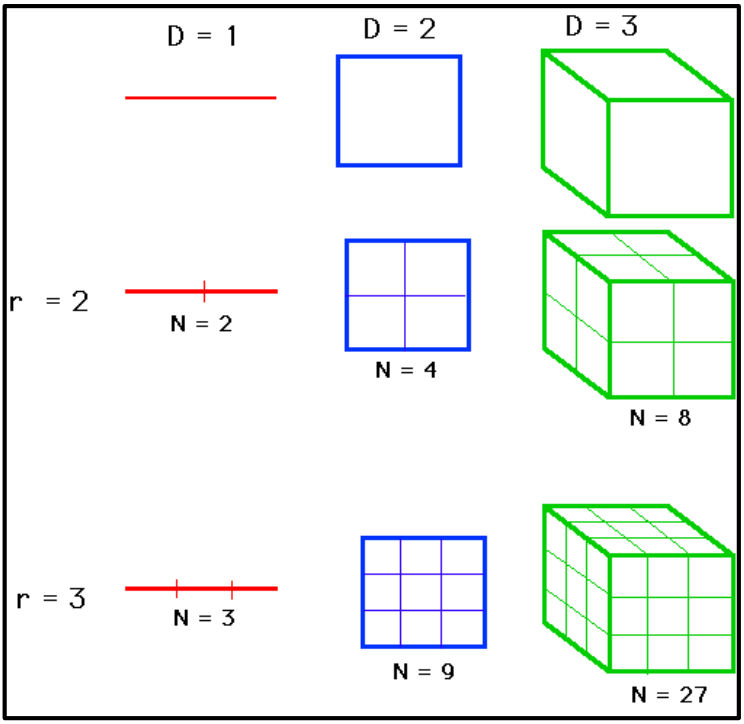
Setelah mengetahui setiap koordinat matriks pada model 3D, maka selanjutnya adalah langkah pengecekan aliran fluida. Fluida akan mengalir melalui pori-pori yang saling terhubung (*connected pore*), sehingga harus dilakukan pengecekan terlebih dahulu disetiap jalur aliran fluida. Metode yang digunakan adalah *random walk method*, dalam

metode ini dilakukan pengecekan setiap elemen pori pada koordinat matriks tetangga terdekat, sehingga terbentuklah suatu aliran. Pelacakan jalur dilakukan berdasarkan prioritas sebagai berikut

2 – 3 – 1 – 4 – 8 – 17 – 12 – 16 – 10 – 11 – 9 – 14 – 13 – 15 – 6 – 5 – 7 – 26 – 21 – 25 – 19 – 20 – 18 – 23 – 22 – 24

Panjang total lintasan dihitung berdasarkan jumlah total jarak antara titik-titik yang terhubung saat dilakukan pelacakan. Jarak 1st *nearest neighbor* yaitu dari *P* ke 2, 4, 6, 8, 17 dan 26 adalah sebesar 1 piksel. Untuk 2nd *nearest neighbor* (diagonal bidang) yaitu dari *P* ke 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14, 16, 19, 21, dan 25 adalah sebesar $\sqrt{2}$ piksel, dan untuk 3rd *nearest neighbor* (diagonal ruang) yaitu dari *P* ke 9, 11, 13, 15, 18, 20, 22, dan 24 yaitu sebesar $\sqrt{3}$ piksel.

3.4.3 Karakterisasi Dimensi Fraktal



Sumber: Khokha, 1996

Gambar 3. 12 Dimensi Fraktal Berdasarkan Konsep Geometri Euclidian

Formula dimensi fraktal telah dijelaskan oleh Khokha (1996) dengan menghitung dimensi menggunakan konsep geometri Euclidian seperti yang dijelaskan pada Gambar 3.12. Perumusan umum pada ilustrasi Gambar 3.12 dijelaskan pada Persamaan 3.1

$$N = r^D \tag{3.1}$$

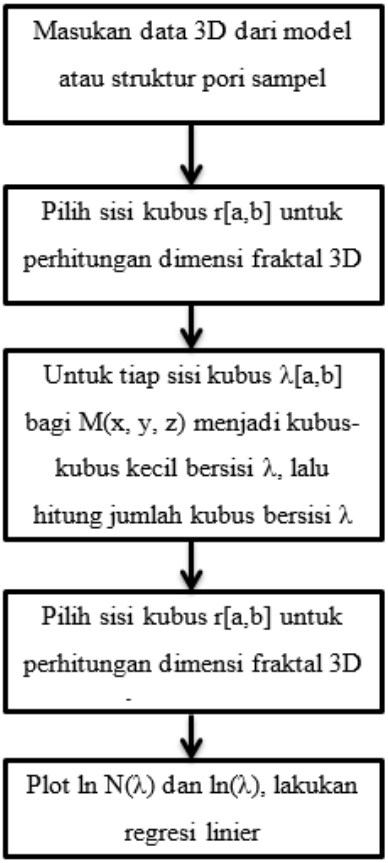
dimana *N* merupakan banyaknya sub sampel, r merupakan faktor pembagi sampel dan *D* merupakan dimensi sampel. Pada Geometrti Euclidian, nilai *D* haruslah dalam bilangan bulat, apabila diaplikasikan ke dalam fraktal nilai *D* dapat bernilai berapapun, maka jika Persamaan 3.1 di kalikan log pada kedua sisinya akan menghasilkan persamaan seperti pada Persamaan 3.2

$$\log(N) = D \log(r) \tag{3.2}$$

Sehingga persamaan dimensi seperti pada Persamaan 3.3

$$D = \frac{\log\ (N)}{\log\ (r)} \tag{3.3}$$

Dalam perhitungan dimensi fraktal yang menggunakan algoritma *box-counting* haruslah citra dalam bentuk biner. Diagram alir pada perhitungan dimensi fraktal 3D dapat dilihat pada Gambar 3.13 (Feranie, dkk., 2011).



Sumber: Feranie, dkk, 2011
Gambar 3. 13 Diagram Alir Algoritma Box-Counting

Perhitungan dimensi fraktal menggunakan metoda *Box-Counting*, yaitu metode untuk menganalisis pola yang komplek dengan melakukan pengumpulan data melalui hasil *scan* citra ke bentuk *box* dalam skala kecil. Penggunaan *box-counting* pada perhitungan dimensi fraktal bersifat *self-similar* terhadap sampel, apabila sampel berbentuk

kubus, maka *box* yang dimaksud adalah kubus kecil, akan tetapi jika sampel berbentuk persegi, maka *box* yang dimaksud adalah persegi kecil.