

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi Pengambilan Data dan Sampel Penelitian

Data batuan penelitian diambil dari daerah Kamojang, Jawa Barat yang secara geografis terletak pada $107^{\circ} 44' 30'' - 107^{\circ} 47' 30''$ BT dan $7^{\circ} 10' 30'' - 7^{\circ} 8' 30''$ LS dan kurang lebih 17 km Baratlaut dari Kabupaten Garut dengan ketinggian 1300–1882 mdpl.



Gambar III.1 Peta lokasi pengambilan data sampel (sumber: PT. Pertamina Geothermal Energy, 2008)

Sampel rekahan 2D di ambil dari lapisan tipis yang berukuran 3×5 cm dari lapisan tipis batuan reservoir, yang dapat dilihat pada Gambar III.2 di bawah ini.



Gambar III.2 Sampel batuan rekahan 2D

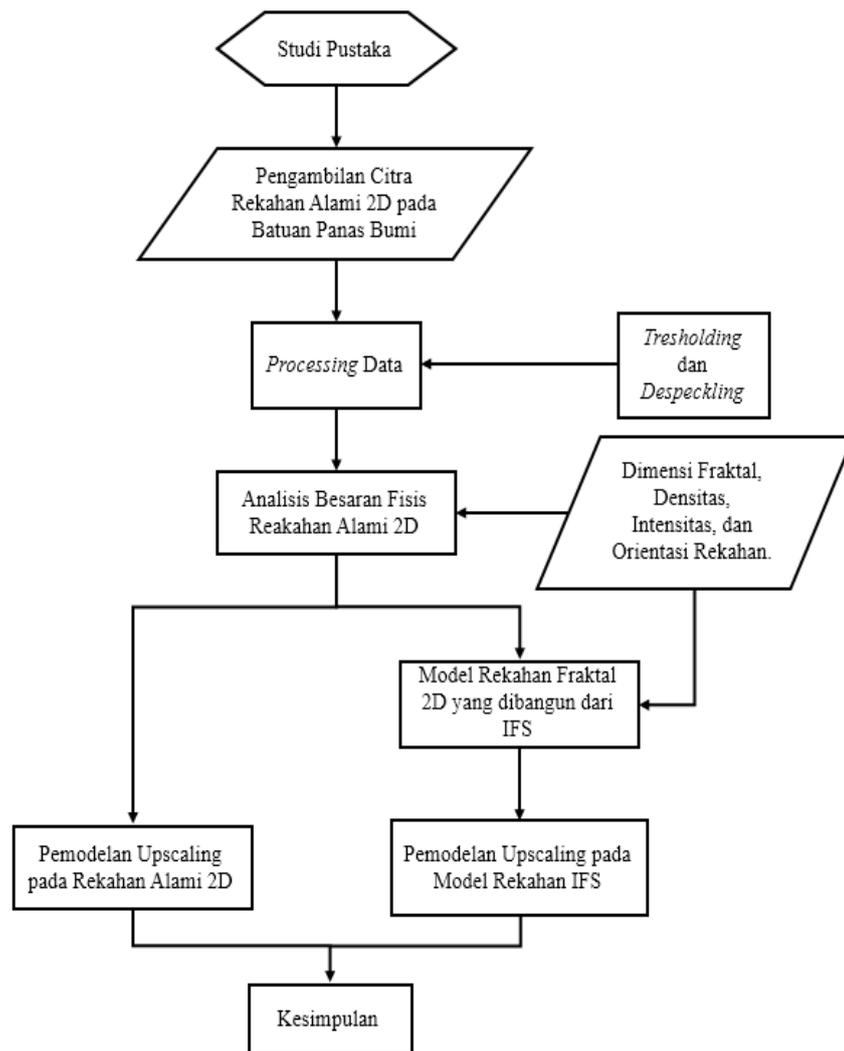
Sampel rekahan 3D diambil dari batuan pada sumur produksi panas bumi di Area Geothermal Kamojang Garut Jawa Barat. Batuan sampel diambil pada kedalaman 500 m dari 838.8 m kedalaman total sumur. Sampel dikonstruksi menjadi sebuah kubus kecil dengan sisi 3.5 cm.



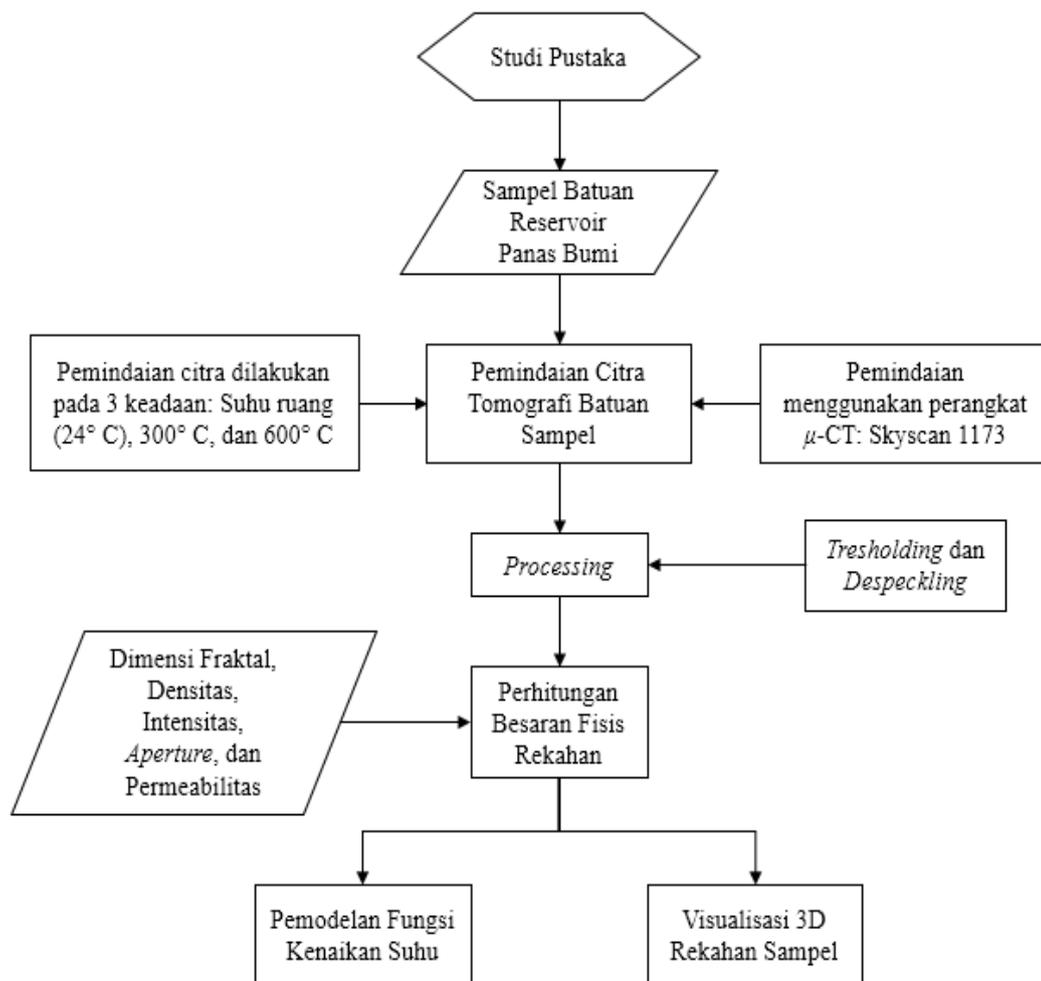
Gambar III.3 Sampel batuan reservoir panas bumi KMJ-11 pada kedalaman 500 m

B. Alur Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu penelitian rekahan alami 2D dan rekahan buatan 3D. Akuisisi data untuk rekahan 2D hanya berupa citra rekahan pada batuan panas bumi, sedangkan rekahan 3D akuisisi data dilakukan pemindaian citra tomografi batuan pada tiga keadaan yang berbeda antara lain keadaan suhu ruang (24°C), 300°C , dan 600°C . Adapun alur penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada diagram alir Gambar III.4 dan Gambar III.5.



Gambar III.4 Diagram alir studi karakterisasi dan pemodelan pada rekahan alami 2D batuan panas bumi



Gambar III.5 Diagram alir studi pembentukan rekahan 3D dan pemodelannya batuan panas bumi

Dari alur penelitian di atas, terdapat dua keadaan pemberian perlakuan panas yang diberikan pada sampel batuan antara lain suhu 300° C dan 600° C. Nilai tersebut berdasarkan suhu reservoir pada batuan sampel yang diambil. Sampel diambil di kedalaman 500 m memiliki suhu reservoir sekitar 300° C, oleh karena itu pemilihan 600° C merupakan faktor kelipatannya. Pemberian perlakuan panas ini menggunakan tungku Cress MFG C1228/935 Ser. 0412. Dalam tahap pemanasan ini digunakan arus dan tegangan sebesar 13.5 A dan 225 V.



Gambar III.6 Tungku pemanasan Cress MFG C1228/935 Ser. 0412

Adapun tahapan pemberian perlakuan panas pada sampel batuan adalah sebagai berikut:

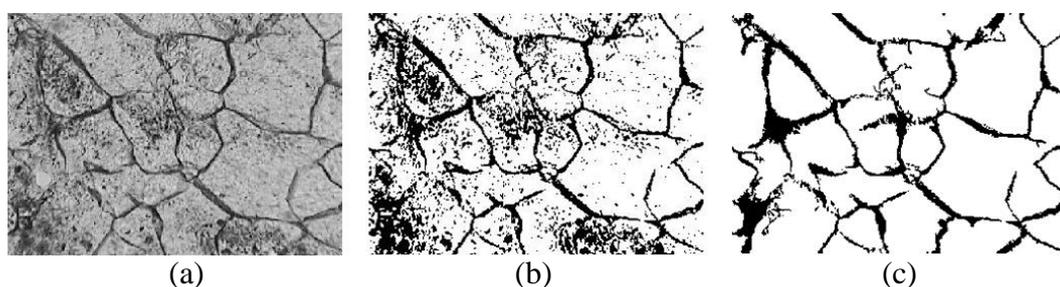
1. Atur suhu pada keadaan perlakuan suhu maksimum pada sampel batuan.
2. Atur arus sehingga berada pada keadaan 13.5 A, hal ini diharapkan perlakuan panas yang diterima oleh sampel batuan meningkat secara perlahan-lahan.
3. Saat suhu didalam tungku berada pada suhu maksimum dari perlakuan yang diberikan, suhu di tahan selama 30 menit sebelum suhu turun kembali, hal ini berdasarkan metodologi penelitian beberapa peneliti rekahan sebelumnya. (Zhang, dkk, 2001; dan Uvarova, dkk, 2014).
4. Setelah suhu ditahan selama 30 menit, atur arus pada 0 A dan pengaturan suhu pada suhu ruang (24° C) kembali. Suhu di dalam tungku akan mengalami penurunan secara perlahan-lahan dengan rata-rata penurunan sekitar 0.5° C/menit. Hal ini diharapkan agar tidak terjadinya retakan akibat dari penurunan suhu secara tiba-tiba.

Jika keadaan tungku sudah berada pada suhu ruang, sampel batuan dapat dikeluarkan dari tungku pemanasan.

C. *Processing* dan Pengolahan Data Citra Rekahan Alami 2D

1. *Processing* Rekahan Alami 2D

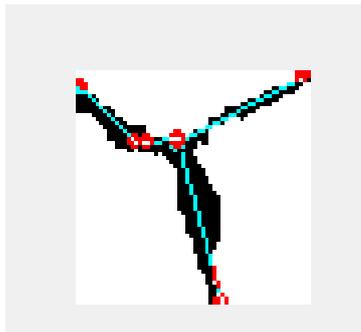
Sampel rekahan alami 2D memiliki dimensi 3×5 cm. Secara umum tahap *processing* pada rekahan alami 2D adalah *thresholding* dan *despeckling*. *Thresholding* adalah merubah citra dari kamera menjadi citra biner atau hitam putih. Sedangkan tahap *despeckling* merupakan tahap menghilangkan pori-pori batuan sehingga diharapkan hanya rekahan saja yang terdapat pada citra. Tahapan ini dapat dilihat pada Gambar III.7.



Gambar III.7 Tahap *processing* pada rekahan alami 2D; (a) citra hasil dari pemindaian; (b) citra hasil dari tahap *thresholding*; (c) citra hasil dari tahap *despeckling*

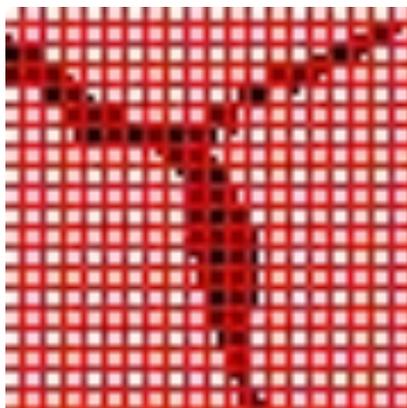
2. Pengolahan Data Rekahan Alami 2D

Terdapat 3 besaran fisis yang akan diolah pada rekahan alami 2D, yaitu densitas, intensitas, dan dimensi fraktal rekahan. Ketiga besaran ini diolah berdasarkan Persamaan (2.1), (2.3), dan (2.13) menggunakan metoda analisis citra digital. Pada Persamaan (2.1), citra yang telah diubah ke biner akan berbentuk matriks saat pengolahan citra. Oleh karena itu, perhitungan luasan rekahan akan sangat mudah dihitung menggunakan perangkat lunak MATLAB. Intensitas rekahan yaitu panjang rekahan per luasan citra, hal ini menunjukkan banyaknya rekahan dalam tiap satuan panjang tertentu dalam suatu citra. Pencarian panjang rekahan ini di ilustrasikan seperti pada Gambar III.8 di bawah ini.



Gambar III.8 Ilustrasi perhitungan panjang rekahan 2D

Sedangkan untuk pencarian dimensi fraktal, menggunakan metode *square-counting* dikarenakan bentuk citra yang digunakan adalah persegi 2D, seperti yang telah dilakukan oleh Park, dkk (2010). Pada perhitungan *square-counting* citra akan dibagi beberapa sub persegi. Matriks sub persegi yang terdapat nilai 0 (hitam) yang berarti rekahan akan dihitung sebagai sub persegi rekahan, sedangkan matriks sub persegi yang hanya memiliki nilai 1 (putih) yang berarti padatan dan tidak terdapat nilai 0 sama sekali maka akan dihitung sebagai sub persegi padatan. Pembuatan sub persegi ini diilustrasikan pada Gambar III.9 di bawah ini.



Gambar III.9 Ilustrasi perhitungan dimensi fraktal rekahan 2D

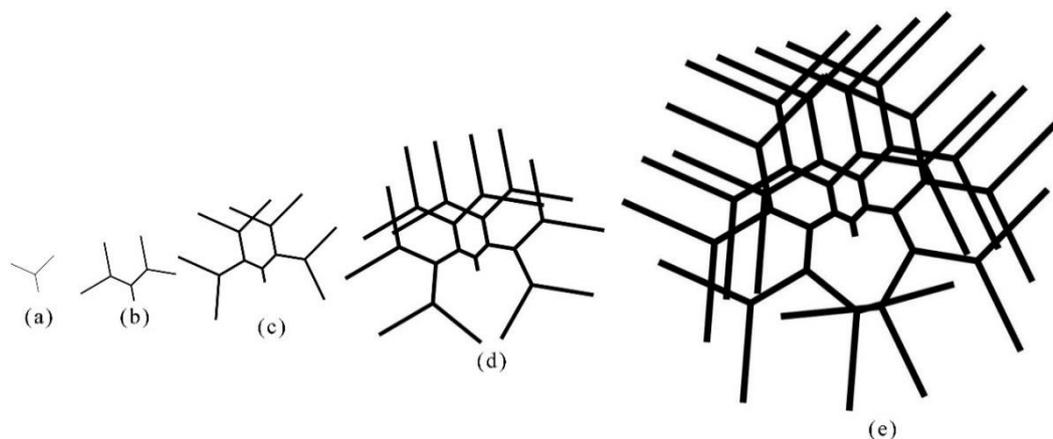
Pada perhitungan dimensi fraktal rekahan 2D haruslah dihitung berdasarkan dengan variasi sisi sub persegi menggunakan nilai kelipatan persekutuan terkecil (KPK). Kemiringan dari log jumlah sub persegi rekahan dan log dari total sub persegi yang terbentuk merupakan dimensi fraktal rekahan 2D yang berdasarkan persamaan (2.13), *script* perhitungan dimensi fraktal 2D dapat di lihat pada Lampiran 1.

D. Pemodelan Rekahan Alami 2D yang dibangun dari IFS

Model rekahan 2D pada batuan reservoir dijelaskan oleh Long, dkk (1992) dengan memodelkan rekahan yang heterogenitas menggunakan *Iterated Function System* (IFS). Metode ini bekerja dengan cara memberi input garis lurus yang kemudian dioperasikan translasi, rotasi, dan penambahan skala, artinya model rekahan 2D dibangun dengan cara mengiterasikan operasi translasi, rotasi, dan penambahan skala berdasarkan input sebelumnya. Transformasi pembuatan model rekahan 2D menggunakan IFS ini dikenal dengan transformasi affine dengan persamaan sebagai berikut (Feranie, dkk, 2011).

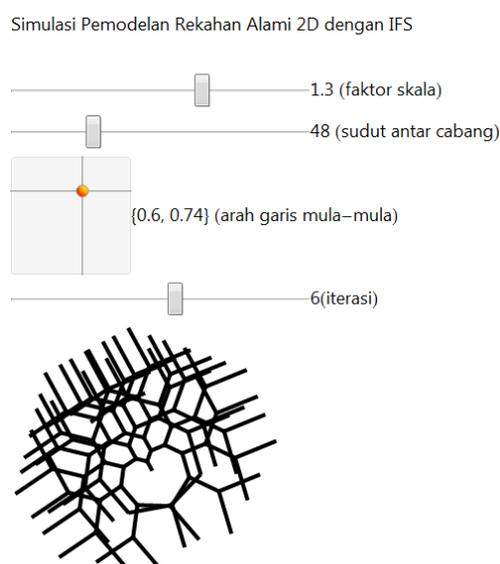
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x \cos \theta & -s_y \sin \theta \\ s_x \sin \theta & s_y \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

dimana s merupakan faktor skala, θ adalah sudut rotasi dari garis horizontal, dan t merupakan perpindahan. Persamaan di atas digunakan untuk dapat menghasilkan dua cabang dengan rotasi yang berbeda yaitu θ dan $-\theta$ yang bertambah sebesar s terhadap input sebelumnya kemudian ditranslasikan di ujung input sebelumnya. Pemodelan rekahan menggunakan model IFS sudah dilakukan oleh beberapa peneliti, seperti Perfect, dkk (2006) mereka membuat model mono-fraktal dan multi-fraktal dari model Sierpinski Carpets menggunakan IFS, Mistakidis (1997) yang memodelkan rekahan menggunakan IFS untuk menganalisis sifat mekanisnya, dan peneliti lainnya (He, dkk, 1999; dan Cen, 1997). Sebagai contoh Gambar III.10 merupakan bentuk model rekahan yang dibangun dari IFS dengan input faktor skala 1.5, sudut antar cabang 55° , arah garis mula-mula (0.818,0.900).



Gambar III.10 Contoh model rekahan yang dibangun dari IFS dari iterasi 1 (a) sampai iterasi 5 (e)

Pembuatan model berdasarkan IFS ini menggunakan visualisasi dari perangkat lunak Wolfram Mathematica yang dibangun dari Persamaan (3.1). Data yang dijadikan input dalam pembuatan model rekahan ini antara lain faktor skala, sudut antar cabang, arah garis mula-mula, dan iterasi. Nilai dari parameter input tersebut berdasarkan bentuk dari rekahan alami sampel batuan. Gambar III.11 menunjukkan tampilan (*interface*) dari pemrograman visualisasi rekahan 2D. *Script* yang menghasilkan pemodelan rekahan alami 2D ini dapat dilihat pada Lampiran 2.



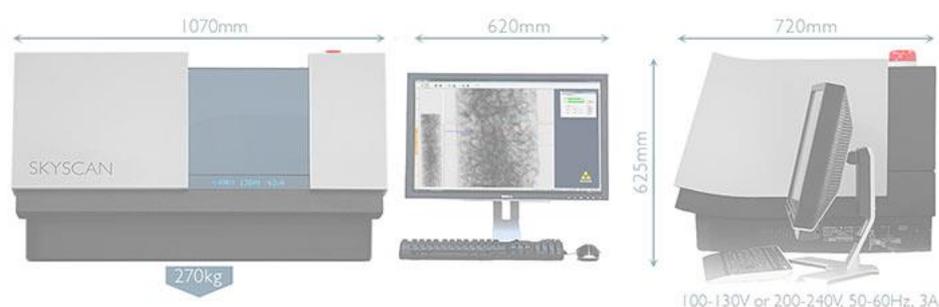
Gambar III.11 Tampilan pembuatan model rekahan 2D dengan IFS

E. Rekonstruksi dan Karakterisasi Rekahan 3D

1. Rekonstruksi Rekahan 3D

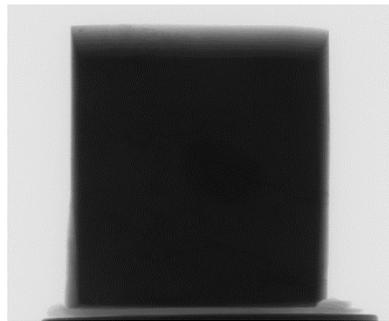
a. Pemindaian Citra 3D Sampel Batuan

Pemindaian citra 3D sampel batuan menggunakan alat bantu μ -CT: Skyscan 1173. Skyscan 1173 merupakan pemindai komputer tomografi berskala mikro (*mikro computer tomography (CT) scanner*), model alat ini dapat dilihat pada Gambar III.12 di bawah ini.



Gambar III.12 μ -CT: Skyscan 1173 (sumber: <http://bruker-microct.com>)

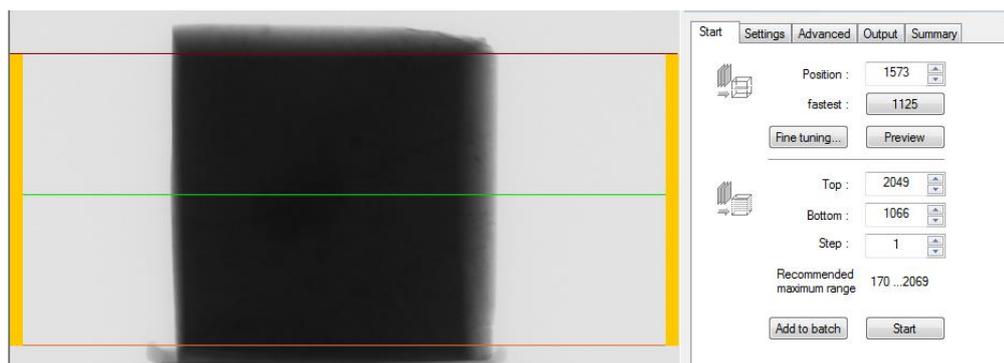
Proses pemindaian sampel dapat dijelaskan sebagai berikut, sinar-X yang dipancarkan oleh sumber akan merambat dalam garis lurus sehingga energi dari sinar-X tersebut dapat menembus batuan sampel, hal ini mengakibatkan sebagian energi pada sinar-X akan mengalami atenuasi, sehingga intensitas sinar-X yang tereduksi akan direkam oleh detektor sebagai cahaya tampak yang kemudian diubah menjadi elektron dengan bantuan chip semikonduktor CCD. Bentuk elektron tersebut diubah oleh *Analog to Digital Converter* (ADC) ke dalam bentuk citra digital bayangan sampel yang dapat dilihat pada Gambar III.13. Pemindaian ini menggunakan sumber arus dan tegangan sebesar $61 \mu\text{A}$ dan 130 kV (uraian parameter pemindaian dapat dilihat pada Lampiran 3).



Gambar III.13 Data hasil (*output*) dari proses pemindaian sampel

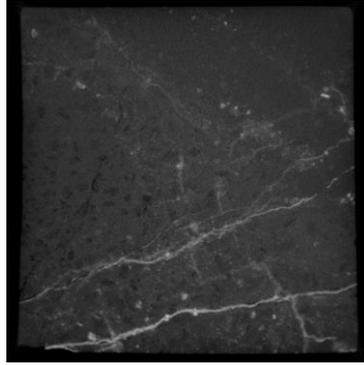
b. Rekonstruksi Data Digital Sampel Batuan

Rekonstruksi adalah proses pengirisan *cross-section* bayangan hasil pemindaian menjadi citra film tipis (*thin section image*) per 1 piksel yang diiris pada arah z . Proses ini menggunakan perangkat lunak NRecon. Pengaturan dan parameter rekonstruksi dapat dilihat pada Lampiran 4. Tampilan NRecon dapat dilihat pada Gambar III.14 di bawah ini.



Gambar III.14 Tampilan perangkat NRecon

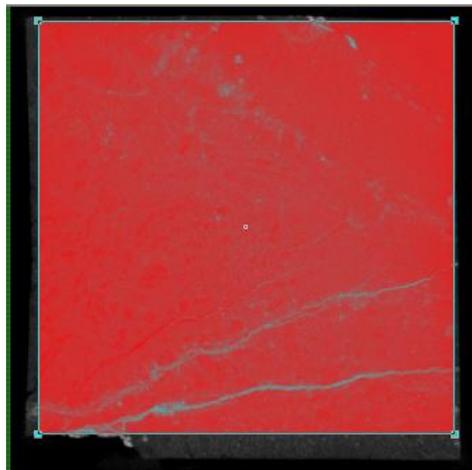
Banyaknya *thin section* yang dihasilkan pada proses rekonstruksi ini bergantung pada *Top*, *Bottom* dan *step*-nya. Pada penelitian ini setiap perlakuan akan direkonstruksi pada parameter yang sama dan menghasilkan 984 citra *thin section*. Salah satu contoh hasil dari rekontruksi untuk setiap keadaan dapat dilihat pada Gambar III.15 di bawah ini, sedangkan visualisasi dalam bentuk 3D menggunakan perangkat lunak CTVox dengan input semua *thin section* hasil rekonstruksi.



Gambar III.15 Citra *thin section* hasil rekonstruksi

c. Region of Interest (ROI)

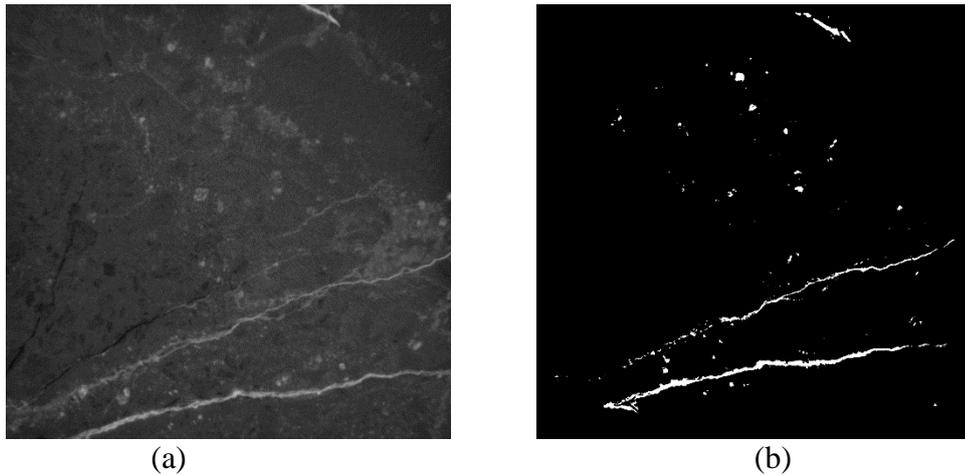
ROI adalah pemilihan suatu daerah dari sampel yang akan dianalisis lebih lanjut, sehingga sampel yang dipindai akan mengalami pemotongan citra. ROI dilakukan karena sampel batuan tidak utuh kubus dan beberapa dari bagian sampel menjadi pecahan akibat perlakuan panas yang diberikan. ROI yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar kotak berwarna merah di bawah ini



Gambar III.16 Penentuan ROI pada sampel batuan

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

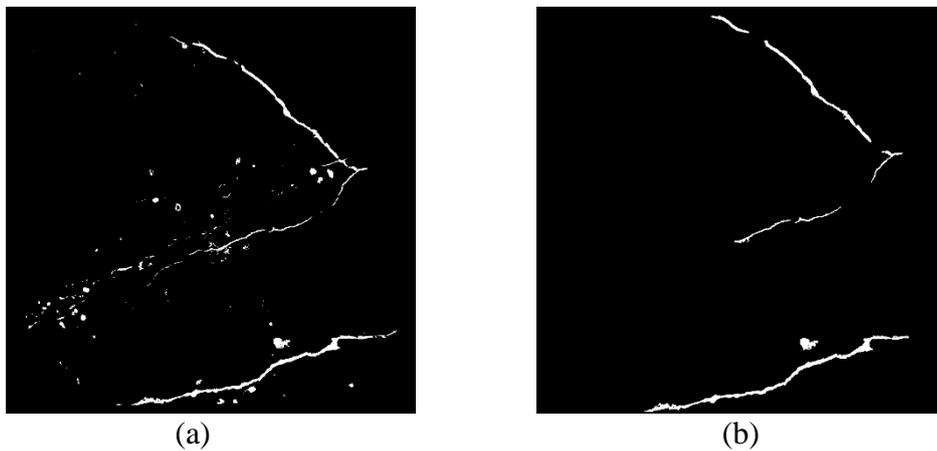
Thresholding merupakan tahapan merubah citra hasil rekonstruksi menjadi citra biner (Gambar III.15). Tahapan ini merupakan tahapan penting karena semua data yang akan dianalisis meruapakan citra biner. Pada *thresholding* ini, warna hitam (ber-piksel 0) menandakan matriks batuan sedangkan warna putih (ber-piksel 1) menandakan pori dan rekahan batuan.



Gambar III.17 Pengkonversian citra ke biner. (a) *thin section* sampel batuan berwarna *grayscale* dan (b) citra biner hasil konversi *thresholding*

e. Pengisolasian Rekahan (*Despeckling*)

Citra hasil dari pemindaian berupa matriks, pori, dan rekahan. *Despeckling* merupakan tahapan pengisolasian rekahan yang berarti penghilangan pori-pori (*speckles* putih). Tahapan ini dilakukan karena pada penelitian ini yang akan dianalisis adalah rekahan 3D batuan.

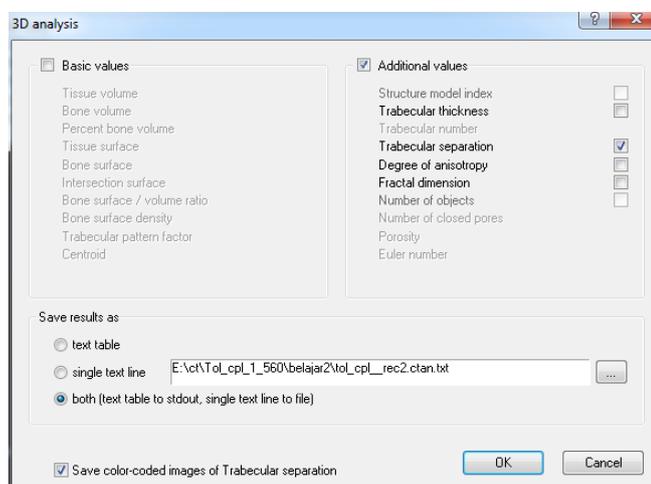


Gambar III.18 proses *despeckling* (a) citra sampel sebelum *desepeckling* (b) citra sampel setelah *desepeckling*

2. Karakterisasi Rekahan 3D

a. Analisis Parameter Utama Rekahan

Karakterisasi rekahan sampel batuan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CTAn, ImageJ, dan MATLAB. Analisis menggunakan perangkat lunak CTAn dalam estimasi *aperture* (e) rekahan. Setelah melakukan semua tahapan pengolahan citra di atas, analisis CTAn yang mewakili besaran *aperture* adalah *trabecular separation*. Pada tab *Internal* dalam CTAn, terdapat pilihan “3D Analysis” yaitu pilihan untuk analisis 3D hasil rekonstruksi. Di dalam “3D Analysis”, terdapat pilihan analisis *trabecular separation*, yang dapat dilihat pada Gambar III.19 di bawah ini.



Gambar III.19 Tampilan 3D kolom *Analysis* pada CTAn

ImageJ membantu dalam proses perhitungan panjang rekahan menggunakan perhitungan skeletonisasi, perhitungan panjang ini akan sulit dihitung secara manual karena terdapat rekahan yang diskontinuitas, nilai dari panjang ini akan dibagi dengan volume sampel yang bernilai intensitas rekahan. Pada tab *Plugin* terdapat pilihan *Skeletonize* dan *Skeleton Analysis*. Perlu di pastikan terlebih dahulu bahwa sebelum di skeletonisasi citra harus dalam bentuk biner. Setelah pengubahan skeletonisasi baru dapat di analisis, yang menghasilkan data panjang rekahan baik itu rekahan yang kontinyu maupun rekahan yang diskontinuitas.

MATLAB membantu dalam perhitungan densitas rekahan. Dalam hal ini densitas berarti bahwa total volume rekahan terhadap total volume sampel

seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.2). Hal ini sama halnya dengan pengertian dari porositas. Gambar III.20 merupakan Persamaan (2.2) jika dikonversikan ke dalam bahasa MATLAB yang dikonstruksi dalam arah z.

```

%% perhitungan parameter densitas

dim=300;
model=zeros(dim,dim,dim);

for ns=1:dim;
    e=strcat('kmj',num2str(ns,'%0.4i'),'.bmp');
    w=imread(e);
    model(:,:,ns)=im2bw(w);
end

densitas=sum(sum(sum(model)))/(dim*dim*dim)

```

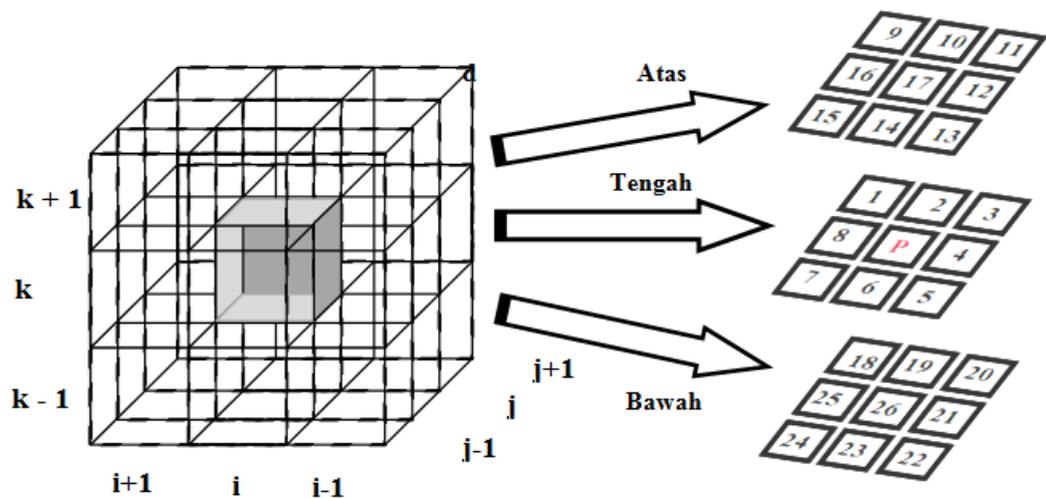
Gambar III.20 Script pencarian densitas rekahan

b. Perhitungan Dimensi Fraktal

Dimensi fraktal dihitung dengan menggunakan metoda *box-counting* seperti yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya (Li dan Huang, 2015; Miao, dkk, 2015; Feranie, dkk, 2011). Metode perhitungan dimensi fraktal 3D menggunakan *box-counting* sama halnya dengan perhitungan dimensi fraktal pada rekahan 2D. *Script* perhitungan dimensi fraktal rekahan 3D dapat dilihat pada Lampiran 5.

c. Perhitungan Besaran Transpor Fluida

Besaran transpor yang akan dikarakterisasi adalah porositas, tortuositas, dan luas permukaan spesifik dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. *Script* MATLAB dalam pencarian besaran transpor dapat dilihat pada Lampiran 6. Sampel KMJ-11 yang akan dikarakterisasi akan dikonstruksi ke dalam bentuk matriks $(l m n)$. Bentuk perhitungan tersebut berdasarkan model 3D pada Gambar III.19 di bawah ini (Feranie, dkk, 2011).



Gambar III.21 Bilangan koordinat matriks pada model batuan 3D

Huruf i , j dan k merupakan koordinat satuan pada sumbu x , y , dan z secara berturut-turut. 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 di atas adalah titik acuan koordinat. Sehingga koordinat matriks relatif terhadap kotak P dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel III.1 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, biru, dan hijau menunjukkan subkubus di bagian tengah, atas, dan bawah secara berurutan.

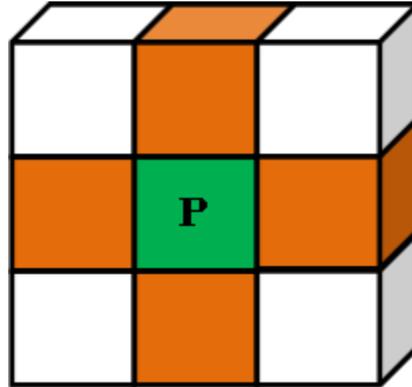
Setelah mengetahui koordinat setiap koordinat matriks pada model 3D, maka selanjutnya adalah langkah pengecekan aliran fluida. Sejauh yang diketahui fluida dapat mengalir melalui pori-pori yang saling terhubung (*connected pore*), sehingga terlebih dahulu harus dilakukan pengecekan terhadap jalur alirannya.

Metode yang digunakan adalah *random walk method*, dalam metode ini dilakukan pengecekan setiap elemen pori pada koordinat matriks tetangga terdekat, sehingga terbentuklah suatu aliran. Algoritma pengecekan koordinat yang digunakan adalah 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

Algoritma di atas dapat merupakan algoritma prioritas aliran fluida. Misalkan aliran fluida terlihat seperti Gambar III.22. Jika saat *pointer* berada di P kubus, nilai panjang aliran adalah nol [$L' = 0$] ini merupakan titik awal aliran, maka saat *pointer* aliran bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye nilai panjang aliran menjadi [$L' = L' + 1$]. Contoh perpindahan koordinat yang bergerak lurus berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut berikut (Fauzi, U., dan Ariwibowo, T., 2006).

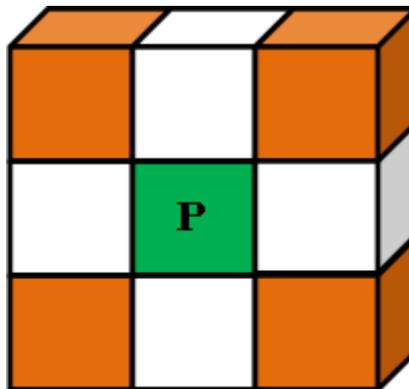
$P \rightarrow 2, P \rightarrow 4, P \rightarrow 6, P \rightarrow 8, P \rightarrow 17, \text{ dan } P \rightarrow 26 .$



Gambar III.22 Perpindahan aliran fluida P pada jalur lurus

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar III.18. Jika saat *pointer* aliran berada di P nilai panjang aliran [$L' = 0$] sebagai titik awal aliran, maka saat aliran fluida bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye nilai panjang aliran menjadi [$L' = L' + \sqrt{2}$]. Contoh perpindahan pointer yang bergerak pada jalur diagonal bidang berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut:

$P \rightarrow 1, P \rightarrow 3, P \rightarrow 5, P \rightarrow 7, P \rightarrow 10, P \rightarrow 12, P \rightarrow 14, P \rightarrow 16, P \rightarrow 19, P \rightarrow 12, P \rightarrow 21, P \rightarrow 23, \text{ dan } P \rightarrow 25$

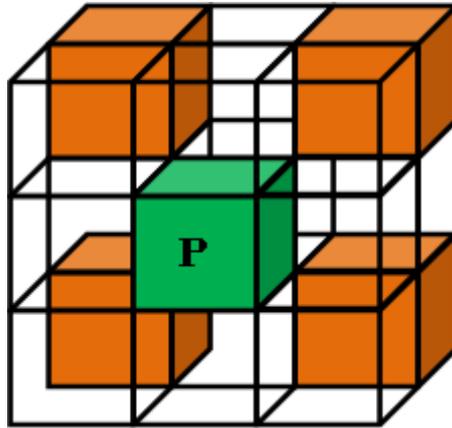


Gambar III.23 Perpindahan aliran fluida P pada jalur diagonal bidang

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar III.23. Jika saat *pointer* aliran berada di P nilai panjang aliran [$L' = 0$] sebagai titik awal aliran, maka saat aliran bergerak menuju salah satu kubus berwarna oranye yang berada pada diagonal ruang, maka nilai panjang aliran menjadi [$L' = L' + \sqrt{3}$]. Contoh perpindahan

pointer yang bergerak pada jalur diagonal ruang berdasarkan koordinat matriks adalah sebagai berikut:

$P \rightarrow 9, P \rightarrow 11, P \rightarrow 13, P \rightarrow 15, P \rightarrow 18, P \rightarrow 20, P \rightarrow 22, \text{ dan } P \rightarrow 24$



Gambar III.24 Perpidahan aliran fluida P pada jalur diagonal ruang