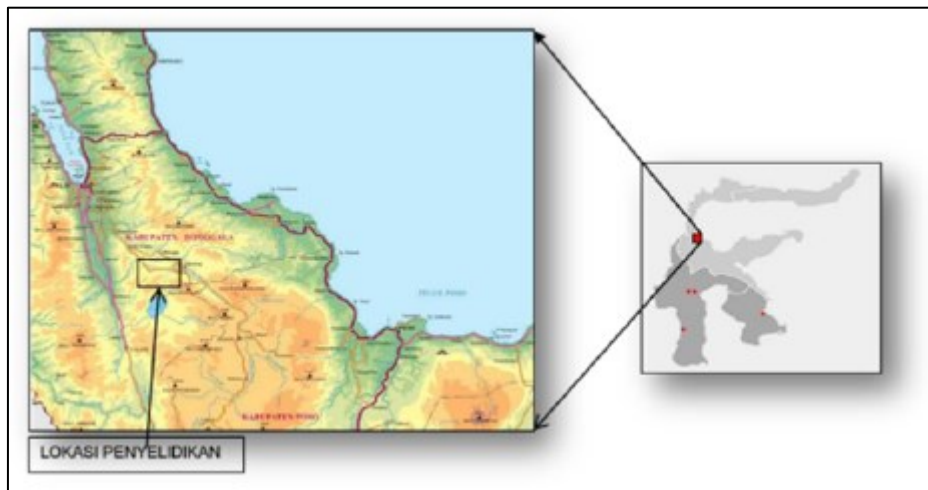


BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian dan Sampel Penelitian

Sampel batuan diperoleh dari sumur pemboran landaian suhu (*thermal gradient*) KDD-01 pada daerah panas bumi Kadidia yang secara administratif berada di desa Kadidia, kecamatan Nokilalaki, kabupaten Sigi, provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis, sumur KDD-01 berada pada $1^{\circ}11'15$ LS - $120^{\circ}7'24$ BT dengan ketinggian 661 mdpl.



Gambar 3. 1 Peta indeks lokasi penelitian (Tim Survei Terpadu, 2012)

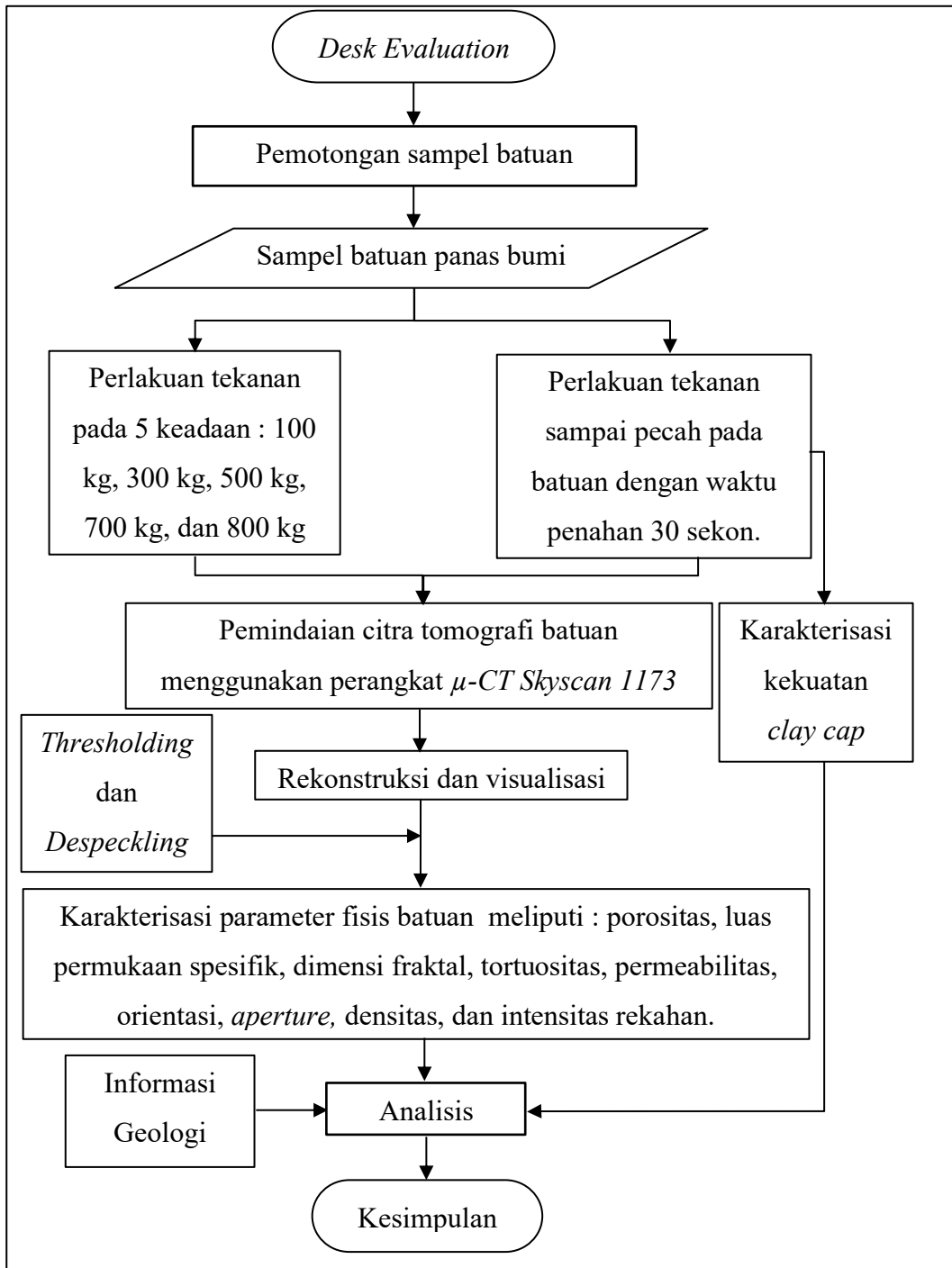
Sampel batuan diperoleh dari kedalaman 697 m dari total kedalaman sumur 703,85 m. Sampel dikonstruksi menjadi sebuah silinder yang berdiameter 4,5 cm dan panjang 4,5 cm dapat dilihat pada Gambar 3.2. Jenis batuan berupa breksi terubah dan termasuk ke dalam lapisan penudung (*clay cap*).



Gambar 3. 2 Sampel batuan KDD-01 pada kedalaman 697 m

3.2 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis struktur batuan 3D yang terbentuk akibat pengaruh tekanan *uniaxial* serta keamanan *clay cap* daerah panas bumi Kadidia. Gambar 3.3 menunjukkan alur penelitian yang dilakukan.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

3.3 Tahapan Penelitian

3.3.1 Desk Evaluation

Penentuan tujuan penelitian, lokasi penelitian, studi pustaka, serta metode penelitian yang akan digunakan ialah yang dilakukan pada *desk evaluation* ini. Hal ini dilakukan sebelum penelitian dilakukan. Tujuan penelitian dilakukan dengan mengembangkan penelitian sebelumnya serta lokasi penelitian dipilih dengan ketersediaan sampel batuan. Studi pustaka dilakukan dengan mencari literatur yang akan digunakan selama penelitian baik berupa peta, gambar, maupun informasi lainnya yang diperoleh dari buku, jurnal, makalah, peta geologi, dan laporan penelitian.

3.3.2 Pemotongan Sampel Batuan

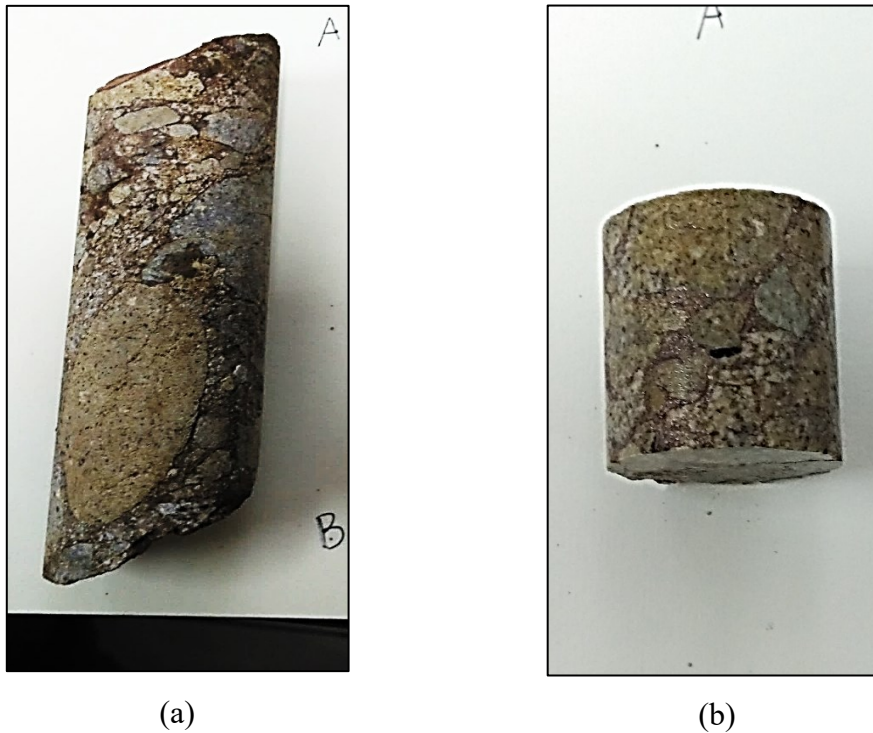
Pemotongan sampel batuan dilaksanakan pada bulan Januari dan bertempat di Laboratorium Batuan Pusat Sumber Daya Mineral, Batu Bara, dan Panas Bumi yang berlokasi di Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung. Pemotongan sampel batuan bertujuan untuk memperoleh dimensi yang sesuai dengan kebutuhan, dalam hal ini berdiameter 4,5 cm dan tinggi 4,5 cm. Pemotongan sampel batuan dilakukan dengan bantuan mesin potong batuan *EXTEC* yang dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3. 4 Mesin potong batuan EXTEC

Langkah-langkah pemotongan batuan ialah sebagai berikut.

1. Menghubungkan instrumen mesin dengan catu daya dan menekan tombol *ON* utama pada mesin.
2. Membuka kap penutup alat kemudian menyalakan alat dengan menekan tombol *power* di bagian belakan mesin dan menyalakan lampu dengan memutar tombol *light* ke arah *ON*.
3. Meletakkan sampel batuan pada dudukan pemotong dan mengaturnya sesuai yang dibutuhkan.
4. Mengunci sampel batuan dengan pengunci sehingga sampel batuan tidak bergerak ketika dipotong. Selain itu, memosisikan selang air mengarah ke sampel batuan yang akan dipotong.
5. Menutup kap penutup mesin.
6. Menekan tombol *ON* pada *COOLANT* untuk mengalirkan air dan menekan tombol *ON* pada *CUTTING HEAD* sehingga gergaji akan berputar.
7. Mengawali pemotongan dengan menarik tuas untuk mengarahkan gergaji pada sampel batuan yang akan dipotong.
8. Setelah pemotongan selesai tekan tombol *OFF* PADA *CUTTING HEAD*, sehingga gergaji dan aliran air akan berhenti. Kemudian, membuka kap penutup mesin dan mengambil sampel batuan yang telah dipotong.
9. Membuka kap penutup mesin dan mengambil sampel batuan yang telah dipotong.
10. Mematikan mesin pada tombol utama dan membersihkan mesin setelah selesai digunakan.



Gambar 3. 5 Sampel batuan (a)sebelum dipotong dan (b)setelah dipotong

3.3.3 Sampel Batuan Panas Bumi

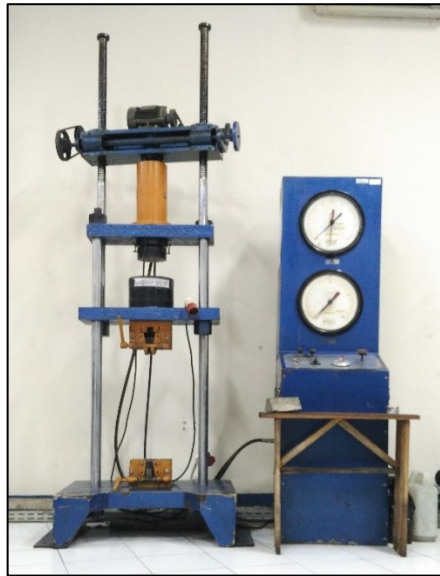
Sampel batuan panas bumi diperoleh dari Laboratorium Sampel Batuan Pusat Sumber Daya Mineral, Batu Bara, dan Panas Bumi yang berlokasi di Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung. Sampel batuan yang didapatkan berupa sampel yang diambil dari batuan intibor dari sumur landaian suhu pada kedalaman 697 m dengan jenis batuan breksi berubah seperti pada Gambar 3.2.

3.3.4 Tahapan Pemberian Perlakuan Tekanan

Tahapan pemberian perlakuan tekanan dilaksanakan pada Januari-Maret 2019 dan bertempat di Laboratorium Mekanika Batuan Jurusan Teknik Pertambangan Universitas Islam Bandung.

Sampel batuan panas bumi ini memiliki tekanan alami senilai 69,7 kg. Hal tersebut diketahui karena sampel batuan diperoleh dari sumur berkedalaman 697 m. Pemberian perlakuan tekanan pada sampel batuan dilakukan pada 5 kali pemberian tekanan yang berbeda dan dilakukan pada batuan hingga pecah. Pemberian perlakuan tekanan pada sampel batuan pada 5 keadaan berbeda dilakukan pada tekanan 100 kg, 300 kg, 500 kg, 700 kg, dan 800 kg. Pemberian

perlakuan tekanan dilakukan menggunakan alat pengujian kuat tekan *uniaxial* yang dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3. 6 Alat pengujian kuat tekan *uniaxial*

Tahapan pemberian perlakuan tekanan menggunakan alat pengujian kuat tekan *uniaxial* adalah sebagai berikut.

1. Mengukur dimensi sampel batuan menggunakan jangka sorong.
2. Meletakkan sampel batuan diantara plat baja dan mengatur agar tepat dengan *platform* penekan alat.
3. Menyalakan mesin kuat tekan *uniaxial* sehingga sampel batuan berada diantara plat baja dan memastikan bahwa kedua permukaan sampel batuan telah menyentuh plat baja tersebut.
4. Menekan skala pengukuran batuan agar berada pada kondisi netral (nol).
5. Memasang *dial gauge* pada sisi kanan, sisi kiri, dan depan pada bagian tengah sampel batuan untuk mengukur deformasi lateral.
6. Mencatat nilai deformasi lateral yang ditunjukkan *dial gauge* selama pemberian perlakuan tekanan secara periodik. Pencatatan dilakukan setiap penambahan tekanan senilai 50 kg dengan waktu penahan beban selama 30 sekon.

3.3.5 Tahapan Rekonstruksi Data Digital Sampel Batuan

Tahapan rekonstruksi data digital sampel batuan terdiri dari beberapa tahapan, diantaranya :

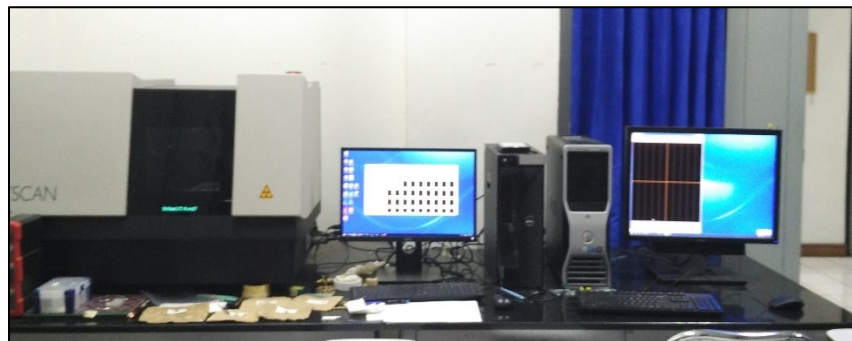
Annisa Nadhira, 2019

PENGARUH TEKANAN MEKANIK UNIAXIAL DAN FAKTOR KEAMANAN TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR PORI PADA BATUAN PENUDUNG DAERAH POTENSI PANAS BUMI DI DAERAH KADIDIA-SIGI, SULAWESI TENGAH

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

1. Pemindaian Sampel Batuan

Tahapan pemindaian sampel dilaksanakan pada Januari-Maret 2019 dan bertempat di Laboratorium *Basic Science A* lantai *basement*, Institut Teknologi Bandung. Tahapan pemindaian ini dibantu dengan menggunakan instrumen μ -CT *Skyscann* tipe 1173 produksi Bruker seperti pada Gambar 3.7. Sumber radiasi berupa sinar-X polikromatik dengan nilai rentang tegangan antara 40-130 kV. Hasil yang diperoleh dari tahapan pemindaian merupakan sekumpulan citra digital 2D skala keabuan yang dikenal sebagai *raw image* dengan tingkat keabuan yang merepresentasikan tingkat atenuasi pada citra. Selanjutnya, *raw image* tersebut direkonstruksi agar mendapatkan citra sayatan tipis secara horizontal. Setelah tahapan rekonstruksi selesai kemudian citra sayatan tipis tersebut dianalisis menggunakan metode *digital image processing and analysis*.



Gambar 3. 7 Seperangkat instrumen μ -CT *Skyscann* 1173

Sebelum tahapan pemindaian sampel seperti pada Gambar 3.8, perlu dilakukan beberapa persiapan seperti pengecekan terhadap *profil line* yang menandakan profil transmisi energi sinar-X selama melewati sampel. Standar yang digunakan ialah nilai minimum antara 10-30% dan nilai maksimum sekitar 90%. Berikut merupakan parameter yang berhubungan dengan *profil line* adalah sebagai berikut :

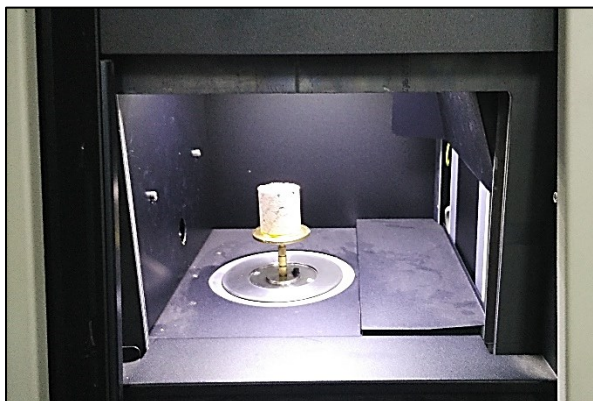
1. Arus (μ A) merupakan besaran arus yang digunakan selama tahapan pemindaian sampel.
2. Tegangan (kV) merupakan besaran tegangan yang berkaitan dengan energi keluaran sinar-X selama proses pemindaian berlangsung. Penentuan nilai tegangan ini tergantung pada densitas sampel yang akan dipindai.
3. Durasi pemaparan (ms) merupakan besaran waktu yang menyatakan lamanya penerimaan sinar-X oleh *detector* selama proses pemindaian berlangsung.

Annisa Nadhira, 2019

PENGARUH TEKANAN MEKANIK UNIAXIAL DAN FAKTOR KEAMANAN TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR PORI PADA BATUAN PENUDUNG DAERAH POTENSI PANAS BUMI DI DAERAH KADIDIA-SIGI, SULAWESI TENGAH

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

4. Filter merupakan penyaring yang digunakan untuk mengontrol spektrum sinar-X polikromatik yang dipancarkan selama pemindaian berlangsung. Filter ini terdiri dari dua macam yakni, aluminium (Al) setebal 1 mm dan Brass setebal 0.25 mm.



Gambar 3. 8 Tahapan persiapan pemindaian sampel

Tahapan pemindaian sampel terjadi ketika sinar-X dipancarkan oleh *source* kemudian merambat dalam garis lurus sehingga energi dari sinar-X dapat melewati medium sampel batuan. Hal inilah yang mengakibatkan sebagian energi pada sinar-X akan mengalami atenuasi sehingga intensitas sinar-X yang tereduksi akan direkam oleh *detector* sebagai cahaya tampak lalu diubah menjadi elektron dengan bantuan *chip* semikonduktor CCD kemudian, bentuk elektron diubah menjadi bentuk citra digital oleh *analog to digital converter* sebagai bayangan sampel seperti pada Gambar 3.7. Proses pemindaian ini dilakukan dengan menggunakan sumber arus senilai $60 \mu\text{A}$ dan sumber tegangan senilai 125 kV dengan waktu pencahayaan selama 450 ms menggunakan filter brass 1 mm dengan resolusi kamera 1120×1120 piksel yang sesuai dengan kamera *binning* 2x2. Posisi sampel batuan terhadap *source* sebesar 182.000 mm dan jarak sampel batuan ke kamera sebesar 364.000 mm. Proses pemindaian sampel batuan berlangsung selama 1 jam 49 menit 51 detik (uraian parameter pemindaian sampel dapat dilihat pada Lampiran 3). Hasil pemindaian sampel menghasilkan 1199 citra skala keabuan (*greyscale*) digital 2D yang dikenal dengan *raw image* berekstensi .TIFF (16 bit) yang memiliki rentang warna antara 0-65.536 dengan 0 menunjukkan warna gelap dan 65.536 menunjukkan warna terang.



Gambar 3. 9 Data *output* pemindaian sampel (*raw image*)

Hal terpenting dari proses tomografi ialah proyeksi balik (*back projection*) dimana akan diperoleh profil densitas dari struktur objek yang dipindai tersebut.

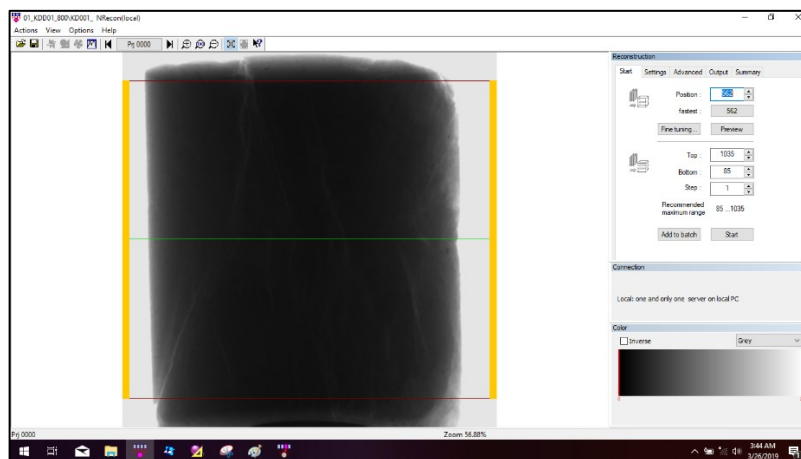
2. Rekonstruksi Sinogram Sampel Batuan

Rekonstruksi data digital ialah proses pengirisan *cross-section* bayangan hasil pemindaian menjadi citra sayatan tipis (*thin section*) per 1 piksel yang diiris searah sumbu z. Tahapan rekonstruksi juga disebut sebagai tahapan proyeksi balik yang dalam formulanya dikenal sebagai *invers problem* yang menggunakan persamaan transformasi Radon seperti pada Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2) berikut.

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta\theta_i g_i(x \cos\theta_i + y \sin\theta_i) \quad (3.1)$$

$$g_\theta(t) = p_\theta(t) + k(t) \quad (3.2)$$

Dengan $\Delta\theta$ ialah jarak sudut antara proyeksi dan $k(t)$ ialah radon kernel dengan respon frekuensi $|\omega|$. proyeksi balik berasal dari fakta bahwa, proyeksi 1D perlu di-*filter* oleh radon kernel 1D untuk memperoleh sinyal 2D. Tahapan ini menggunakan perangkat lunak NRecon. Tampilan tahapan rekonstruksi ditunjukkan pada Gambar 3.10 berikut.



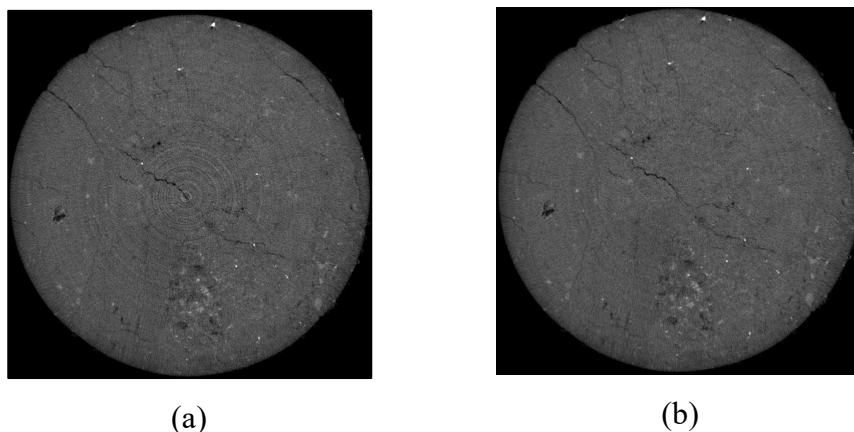
Gambar 3. 10 Tahapan rekonstruksi sinogram sampel batuan pada perangkat NRecon

Jumlah citra *thin section* (2D) yang dihasilkan pada proses rekonstruksi bergantung pada *Top*, *Bottom*, dan *Step* yang dipilih. Pada penelitian ini, setiap perlakuan akan direkonstruksi pada parameter yang sama dan menghasilkan 950 citra *thin section*.

Tahapan rekonstruksi/*back projection* untuk sampel batuan adalah sebagai berikut:

1. *Ring Artific Reduction*

Ring Artific merupakan lingkaran-lingkaran yang terdapat pada citra hasil pemindaian yang disebabkan karena gerakan perputaran instrument *CT-Scann* ketika menembakan sinar-X pada sampel selama pemindaian berlangsung. Penampakan *ring artific* pada hasil pemindaian dapat dilihat pada Gambar 3.9a. *Ring artific* dalam sampel apabila tidak dihilangkan maka akan menjadi *noise* terhadap data yang diperlukan. Oleh karena itu, *ring artific* dapat dikurangi dengan mengaplikasikan filter pada sinogram sehingga keberadaan *noise* dapat diminimalisir. Proses pengurangan *noise* berupa *ring artific* biasa dikenal dengan istilah *ring artific reduction*.



Gambar 3. 11 Citra *greyscale* (a) Sebelum dan (b) Sesudah tahapan *ring artifact reduction*

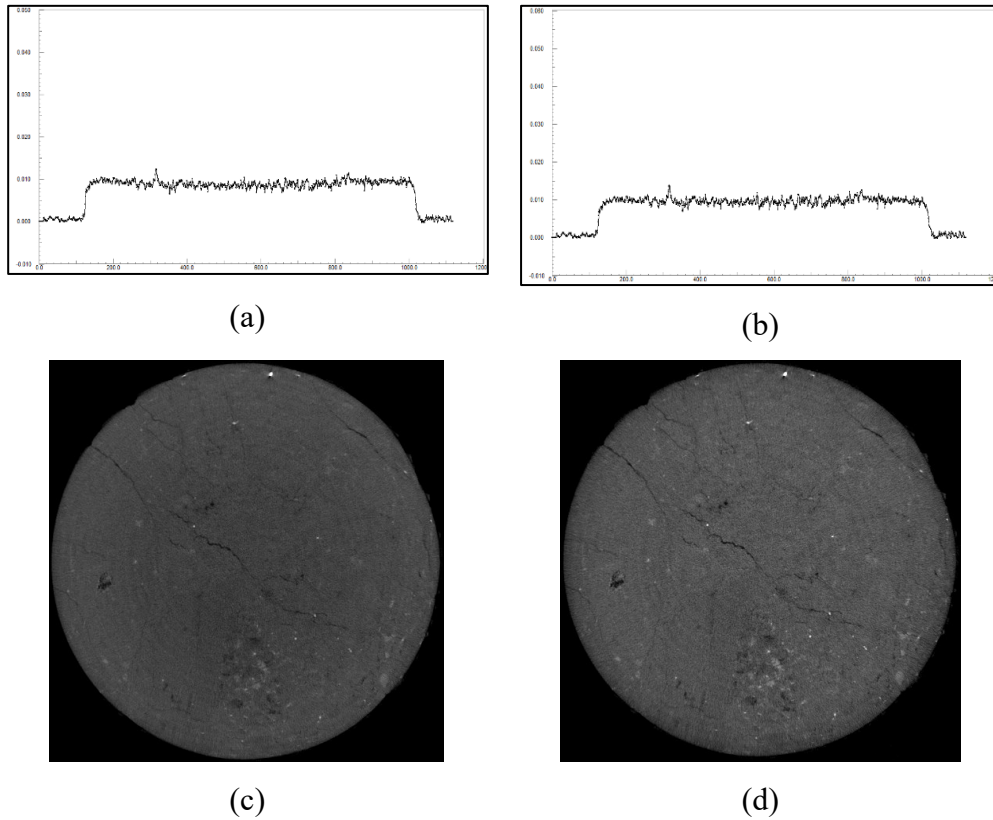
2. *Beam Hardening Correction*

Beam Hardening merupakan peristiwa yang terjadi karena terserapnya sebagian energi sinar-X setelah menembus sampel. Sinar-X yang dipakai pada instrument *CT-Scann* bersifat polikromatik sehingga mempunyai rentang spektrum energi. Rentang spektrum energi pada instrument *CT-Scann* terbagi menjadi dua jenis yaitu, energi tinggi (*Compton energy*) dan energi rendah (*photoelectric effect*). Sifat polikromatik yang terdapat pada sinar-X tersebut dapat menyebabkan artefak citra dan degradasi citra secara keseluruhan melalui efek pengerasan (*hardening*). *Beam hardening* sendiri terjadi karena penyerapan sinar-X pada material yang diberikan tergantung pada energi sementara, pengumpulan data pada sistem *CT-Scann* tidak selektif terhadap energi.

Ketika proses pemindaian, sinar-X yang berenergi rendah akan mengalami atenuasi lebih cepat sehingga mencapai bagian tengah dari sampel kemudian sinar-X mengalami efek pengerasan (*hardening*) karena menyisihkan energi tinggi. Sinar-X mengalami atenuasi ketika ditembakkan pada sampel dirumuskan pada Persamaan (3.3) atau yang dikenal sebagai Hukum Beer (Segal, dkk., 1978).

$$I(x) = \int_{E_0}^{E_i} S(E) e^{-\mu L(E)x} dE \quad (3.3)$$

Dengan, $S(E)$ merupakan spektrum energi dari sumber polikromatik dan $\mu L(E)$ merupakan total koefisien atenuasi (mencakup koefisien energi dari energi rendah maupun energi tinggi) yang merupakan fungsi dari energi. Sementara x merupakan jarak yang ditempuh partikel sinar-X terhadap sampel.



Gambar 3. 12 (a) Kurva intensitas sepanjang *profil line* sampel sebelum *beam hardening correction*; (b) Kurva intensitas sepanjang *profil line* sampel setelah *beam hardening correction*; (c) Citra *greyscale* sebelum *beam hardening correction*; dan (d) Citra *greyscale* setelah *beam hardening correction*.

Sumber sinar-X yang bersifat polikromatik dapat diwakili oleh sinar-X yang bersifat monokromatik maka dapat disubstitusikan koefisien atenuasi linear efektif total $\mu_L(\text{eff})^{(x)}$ yang dirumuskan pada Persamaan (3.4) berikut.

$$I(x) = \int_{E_0}^{E_i} S(E) e^{-\mu L(E)x} dE = I_0 e^{-\mu L(\text{eff})^{(x)}x} \quad (3.4)$$

Dengan $I_0 = \int S(E) dE$.

Beam Hardening perlu dikoreksi untuk memperbaiki dan mengoreksi bagian citra akibat intensitas energi sinar-X yang melalui sampel tidak merata sehingga mempengaruhi profil densitas batuan.

Tahapan rekonstruksi menghasilkan citra *greyscale* berekstensi .bmp yang memiliki rentang intensitas warna 0-225. Parameter *ring artifact reduction* dan *beam hardening correction* dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Annisa Nadhira, 2019

PENGARUH TEKANAN MEKANIK UNIAXIAL DAN FAKTOR KEAMANAN TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR PORI PADA BATUAN PENUDUNG DAERAH POTENSI PANAS BUMI DI DAERAH KADIDIA-SIGI, SULAWESI TENGAH

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

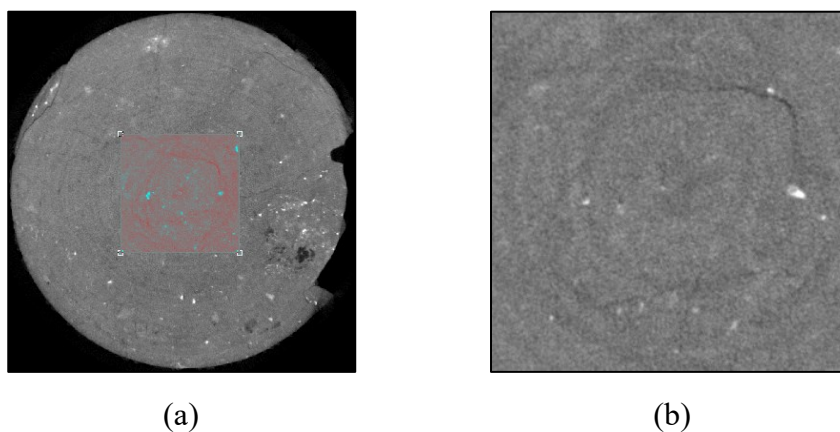
Tabel 3. 1 Parameter *ring artifact reduction* dan *beam hardening correction* untuk setiap perlakuan tekanan pada sampel

Tekanan (kg)	<i>ring artifact reduction</i>	<i>beam hardening correction (%)</i>
69,7	6	4
100	6	4
300	6	5
500	5	6
700	6	5
800	6	5

3. Pemilihan *Region of Interest* (ROI)

ROI merupakan pemilihan suatu area dari citra sampel hasil rekonstruksi yang akan dianalisis lebih lanjut, sehingga sampel yang telah dipindai akan mengalami pemotongan. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisis lebih lanjut dikarenakan sampel batuan tidak utuh berbentuk silinder dan pada beberapa bagian tidak terlihat perubahan yang signifikan akibat perlakuan tekanan yang diberikan.

ROI yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.13 dengan bentuk persegi dengan ukuran 300×300 piksel menggunakan perangkat lunak CTan.



Gambar 3. 13 Pemilihan *Region of Interest* (a) Penentuan ROI pada sampel; (b) ROI pada sampel batuan

4. Pengkonversian Citra *Greyscale* ke Data Biner (*Binary Image*)

Pengkonversian citra *greyscale* ke data biner dikenal dengan istilah *thresholding*. Tahapan ini merupakan proses penting karena data yang akan dianalisis harus dalam data biner. Pada data biner, warna hitam bernilai 0 yang

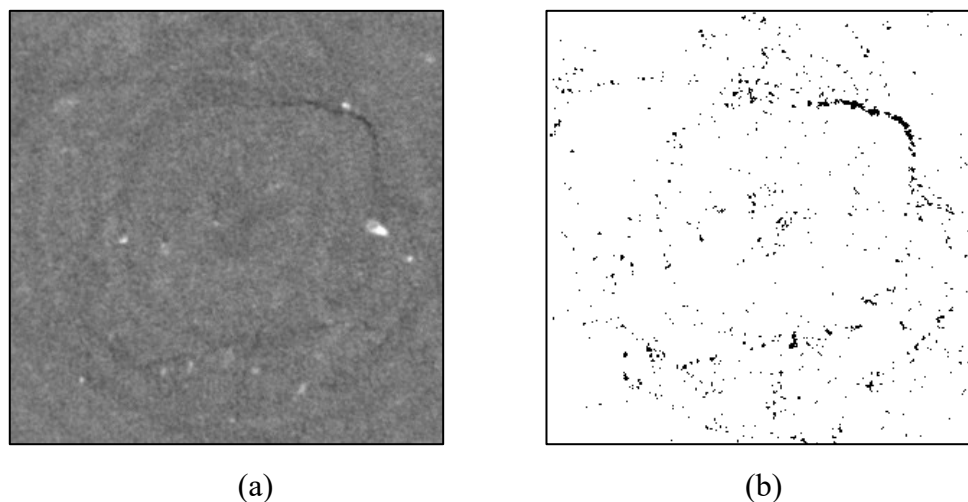
menandakan pori sedangkan warna putih bernilai 1 yang menandakan matriks batuan. *Thresholding* sendiri bekerja dengan mengaplikasikan nilai batas tertentu (*thresholding value*) terhadap seluruh piksel pada citra *greyscale* untuk dibandingkan. Apabila nilai intensitas citra *greyscale* lebih kecil daripada nilai batas, maka nilai piksel tersebut akan diubah menjadi sama dengan 0, sementara jika nilai intensitas citra *greyscale* lebih besar daripada nilai batas, maka nilai piksel tersebut akan diubah menjadi sama dengan 1. Sehingga, citra *greyscale* yang awalnya memiliki sebaran intensitas nilai piksel 0-225 akan diubah menjadi citra biner yang hanya memiliki intensitas piksel 0 dan 1.

Thresholding dapat dilakukan dengan dua cara yakni, secara manual dan otomatis. Pada penelitian ini, peneliti menggunakan cara *thresholding* otomatis dengan metode *Global Thresholding* (Metode *Otsu*). Metode *Otsu* dalam kerjanya memanfaatkan konsep *clustering statistic Variance* dengan tujuan untuk dapat memisahkan antara *foreground* dan *background* yang bernilai piksel 1 dan 0 secara berurutan. Perhitungan dilakukan dengan mencari nilai *Within Class Variance* (σ_w) dari setiap piksel terhadap piksel-piksel lainnya yang dijadikan *foreground* (piksel bernilai 1 yang ditandai warna putih) dan *background* (piksel bernilai 0 yang ditandai warna hitam). Kemudian, nilai batas ditentukan berdasarkan piksel yang memiliki nilai σ_w yang paling kecil berdasarkan Persamaan (3.5) berikut (Otsu, 1979).

$$\sigma_w^2 = W_b \sigma_b^2 + W_f \sigma_f^2 \quad (3.5)$$

Dengan σ merupakan *Variance* dari piksel-piksel *foreground* dan *background* yang disimulasikan untuk setiap piksel yang terdapat pada citra dan W merupakan fraksi jumlah piksel.

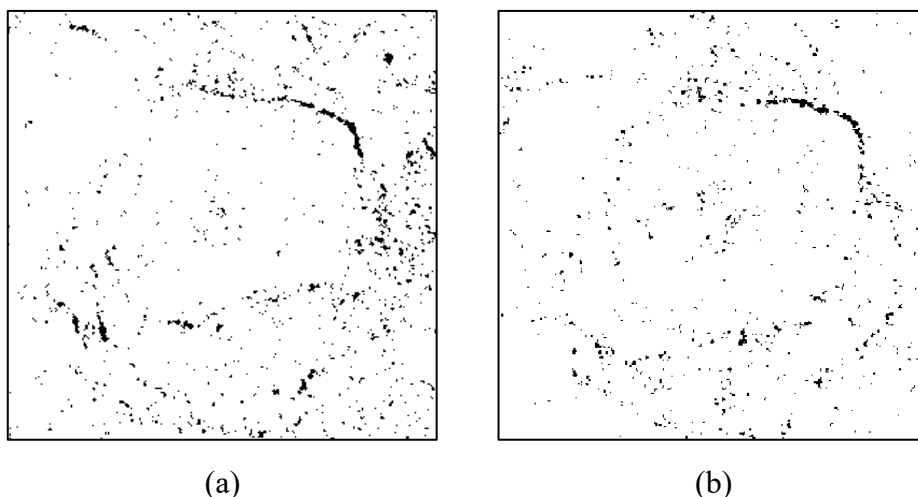
Metode *Otsu* sangat bergantung terhadap bentuk histogram (kurva piksel penyusun citra terhadap kuantitas setiap piksel pada citra tersebut) citra *greyscale*. Pada penelitian ini, *thresholding* dilakukan menggunakan perangkat lunak CTan.



Gambar 3. 14 (a) Citra *greyscale*; (b) Citra biner

5. Pengisolasian (*Dispecking*)

Dispecking merupakan tahapan ketika citra biner tertentu akan diisolasi dan yang lainnya akan dihilangkan. Tahapan ini penting dilakukan untuk menghindari ambiguitas dalam proses analisis.



Gambar 3. 15 (a) Citra biner sebelum *dispeckling* dan (b) Citra biner setelah *dispeckling*

3.3.6 Metode Karakterisasi Struktur Pori Batuan 3D

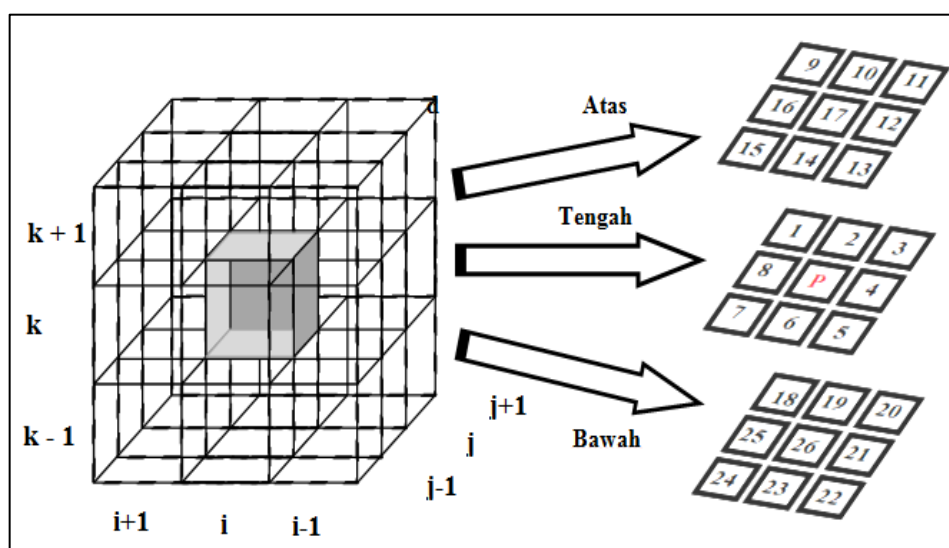
Karakterisasi parameter fisis struktur pori batuan 3D terbagi menjadi dua bagian, yakni karakterisasi struktur *void* dan karakterisasi struktur rekahan.

1. Karakterisasi Struktur *Void*

Karakterisasi struktur *void* meliputi parameter porositas, luas permukaan spesifik, dimensi fraktal, tortuositas, dan permeabilitas.

a. Metode Perhitungan Parameter Porositas, Tortuositas, dan Luas Permukaan Spesifik

Dalam perhitungan parameter porositas, tortuositas, dan luas permukaan spesifik penulis menggunakan perangkat lunak MATLAB. *Script* MATLAB untuk perhitungan parameter tersebut terdapat pada Lampiran 5. Sampel KDD-01 yang akan dikarakterisasi akan dikonstruksi ke dalam bentuk matriks ($l \ m \ n$). Bentuk perhitungan tersebut berdasarkan model 3D pada Gambar 3.14 berikut (Feranie, dkk., 2011).



Gambar 3. 16 Bilangan koordinat matriks pada model batuan 3D (Feranie, dkk., 2011).

Huruf i , j dan k ialah koordinat satuan pada sumbu x , y , dan z secara berturut-turut. Selanjutnya, $i+1$ 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 3.2 berikut.

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

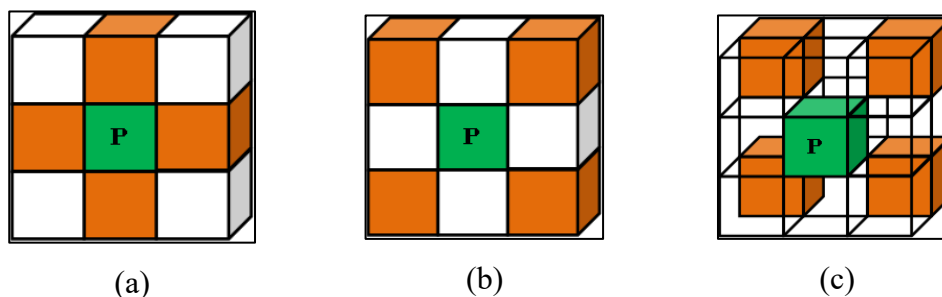
Setelah mengetahui koordinat setiap koordinat matriks pada model 3D, maka selanjutnya adalah langkah pengecekan aliran fluida. Sejauh yang diketahui fluida dapat mengalir melalui pori-pori yang saling terhubung (*connected pore*), sehingga terlebih dahulu harus dilakukan pengecekan terhadap jalur alirannya.

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 3.17a . 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, dkk., 2006).

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



Gambar 3. 17 (a) Perpindahan aliran fluida P pada jalur lurus; (b) Perpindahan aliran fluida P pada jalur diagonal bidang; dan (c) Perpindahan aliran fluida P pada jalur diagonal ruang (Fauzi, dkk., 2006).

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar 3.17b. 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:

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

Untuk perpindahan *pointer* aliran yang bergerak pada jalur diagonal bidang, diilustrasikan pada Gambar 3.17c. 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.

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

b. Metode Perhitungan Dimensi Fraktal

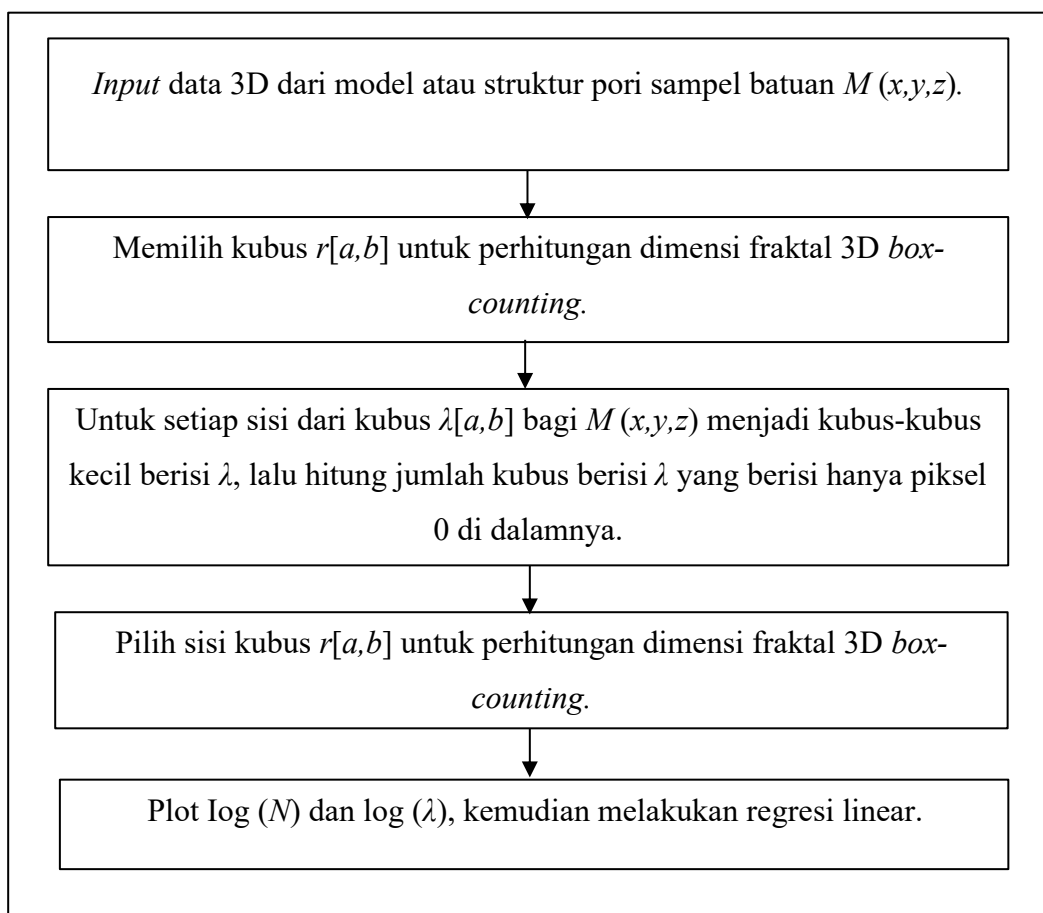
Dalam perhitungan dimensi fraktal, penulis menggunakan metode *box-counting* seperti yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Li, dkk., 2015; Miao, dkk., 2015; dan Feranie, dkk., 2011).

Box-counting merupakan metode untuk menganalisis pola yang kompleks dengan pengumpulan data melalui *scan* citra ke bentuk *box* dalam skala kecil-kecil. Penggunaan *box-counting* pada perhitungan dimensi fraktal harus bersifat *self-similar* terhadap sampel, jika sampel berupa kubus, maka *box* yang dimaksud ialah kubus-kubus kecil, namun apabila sampel berupa persegi, maka *box* yang dimaksud adalah persegi-persegi kecil.

Pada perhitungan dimensi fraktal menggunakan algoritma *box-counting* harus diubah ke dalam citra biner yaitu, citra hitam-putih yang berpiksel 0 atau 1. Dimensi fraktal *box-counting* dihitung dari gradien regresi linear dari fungsi logaritma jumlah sub-objek *self-similarity* terhadap logaritma banyaknya *box* yang terbentuk, seperti pada Persamaan (2.5). Berikut merupakan diagram alir pada perhitungan dimensi fraktal 3D (Feranie, dkk., 2011).

Dimensi fraktal sendiri dihitung menggunakan *software* MATLAB R2014a dengan *script* seperti pada Lampiran 4. **Pertama**, membuka file *source script* dimensi fraktal dengan menggunakan *software* MATLAB R2014a. **Kedua**, mengubah nama *file* yang terdapat pada *source script* pada setiap kali akan melakukan *run program*, dan **ketiga**, melakukan *run program*, kemudian akan

diperoleh hasil berupa nilai dimensi fraktal pori dan dimensi fraktal medium dari citra 3D setiap kenaikan tekanan.



Gambar 3. 18 Diagram Alir Algoritma *Box-counting* (sumber : Feranie, dkk. 2011)

c. Metode Perhitungan Permeabilitas

Dalam perhitungan permeabilitas, penulis menggunakan dua metode *Digital Rock Physics* yaitu metode *Lattice Boltzmann* (LBM) dan metode Cozeny-Carman.

LBM ialah metode yang digunakan untuk memodelkan dan mensimulasikan aliran fluida dalam media berpori (Bernsdorf, dkk.,2000). Dalam penelitian ini penulis menggunakan *Palabos, a Parallel Lattice Boltzmann Solver* (palabos.org) untuk memodelkan dan mensimulasikan permeabilitas (Degruyter, dkk., 2010). Palabos sendiri menggunakan skema D3Q19 dimana merepresentasikan gerakan aliran dalam ruang 3D dan 19 vektor kecepatan yang berasosiasi namun didiskritkan model kisi kubik yang ditunjukkan pada Gambar 3.19. Metode ini merepresentasikan aliran fluida sebagai tumbukan partikel imajiner yang

Annisa Nadhira, 2019

PENGARUH TEKANAN MEKANIK UNIAXIAL DAN FAKTOR KEAMANAN TERHADAP PERUBAHAN STRUKTUR PORI PADA BATUAN PENUDUNG DAERAH POTENSI PANAS BUMI DI DAERAH KADIDIA-SIGI, SULAWESI TENGAH

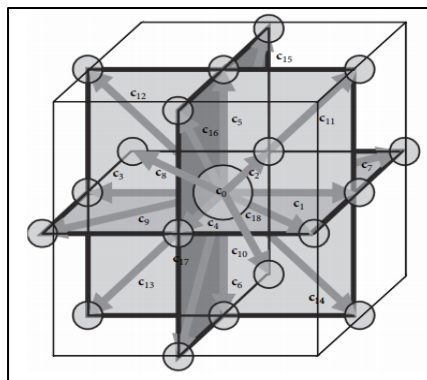
Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

ukurannya jauh lebih besar daripada ukuran molekul fluida. Tumbukan yang digunakan ialah tumbukan lenting sempurna sehingga berlaku hukum kekekalan massa dan momentum yang diaplikasikan dalam model ruangan berpori (Dvorkin, dkk., 2003).

Konsep perhitungan permeabilitas pada metode ini menggunakan hukum Darcy yang membahas mengenai aliran fluida dalam media berpori. Persamaan yang digunakan ialah Persamaan (2.11) dan dimodifikasi sehingga memenuhi perhitungan pada *Palabos* seperti pada Persamaan (3.6) berikut :

$$k = \frac{\langle v \rangle \eta}{\frac{\partial P}{\partial x}} \quad (3.6)$$

Dengan $\langle v \rangle$ merupakan rata-rata magnitudo dari kecepatan dalam seluruh sistem bervolume. Dalam mengestimasi permeabilitas menggunakan LBM ialah bergantung pada arah (*direction dependent*).



Gambar 3. 19 Model 19 vektor kecepatan pada skema D3Q19 (Biscarini, dkk., 2013)

Salah satu asumsi Darcy menyebutkan bahwa, aliran fluida yang mengalir bersifat laminar karena jika tidak laminar maka perhitungan permeabilitas dan aliran fluida akan berbeda jauh. Langkah awal dalam perhitungan permeabilitas menggunakan LBM ini ialah mendistribusikan fluida di dalam media berpori hingga jenuh (semua lubang pori terisi oleh fluida). Fluida tersebut mengalir karena diberi tekanan berbeda antara *inlet* dan *outlet*. Oleh karena itu, gradien tekanan di-set sekecil mungkin agar fluida yang mengalir bersifat laminar. Dalam perhitungan ini nilai gradien tekanannya ialah 0,00005.

Sedangkan dalam perhitungan permeabilitas menggunakan metode Cozeny-Carman ialah dengan menggunakan MATLAB. *Script* MATLAB yang digunakan ialah sama halnya dengan *script* perhitungan porositas, tortuositas, dan luas permukaan spesifik pada poin 3.5 sebelumnya. Dalam perhitungan permeabilitas menggunakan pendekatan Cozeny-Carman ialah dengan menurunkan persamaan permeabilitas yang telah dipaparkan oleh Darcy pada Persamaan (2.10) menjadi Persamaan (3.7) berikut (Kaviany, 1995).

$$k = \frac{\phi^3}{cSsA^2\tau^2} \quad (3.7)$$

Dengan c ialah faktor geometri butiran yaitu 2.

Kedua metode ini menghasilkan nilai permeabilitas dengan satuan lu^2 (*lattice unit*). Pengkonversian dari lu^2 ke mD ialah dengan menggunakan Persamaan (3.8) berikut (Latief, 2014).

$$k(\text{mD}) = \frac{k(lu^2) \times (\text{resolusi 1 piksel dalam } \mu\text{m})^2 \times 1000}{0,9869233} \quad (3.8)$$

Resolusi yang dilakukan pada penelitian ini ialah 1 piksel = 34 μm .

2. Karakterisasi Struktur Rekahan

Karakterisasi struktur rekahan meliputi perhitungan parameter orientasi, *aperture*, densitas, dan intensitas rekahan.

a. Orientasi Rekahan (θ)

Orientasi rekahan merupakan arah rekahan yang dianalisis menggunakan perangkat lunak CTan dengan *input* berupa citra 3D sedangkan, fungsi yang mewakili parameter ini ialah *total orientation*. Hasil yang diperoleh dari parameter ini ialah grafik hubungan orientasi rekahan terhadap tekanan dan persamaan matematis orientasi rekahan fungsi tekanan.

b. *Aperture* Rekahan (e)

Aperture rekahan ialah parameter yang menjelaskan mengenai lebarnya sebuah rekahan. Parameter ini dihitung dengan menggunakan bola-bola rekahan dan diameter bola-bola tersebut merupakan *aperture* rekahan. Perhitungan *aperture* rekahan dilakukan menggunakan perangkat lunak CTan dengan *input* berupa citra

3D sedangkan, fungsi yang mewakili parameter ini ialah *structure separation*. Hasil yang diperoleh dari parameter ini ialah grafik hubungan *aperture* rekahan terhadap tekanan dan persamaan matematis *aperture* rekahan fungsi tekanan.

c. Densitas Rekahan (Φ)

Densitas rekahan merupakan perbandingan antara volume total rekahan (V_f) terhadap volume total sampel (V) dapat dilihat pada Persamaan (3.9) berikut.

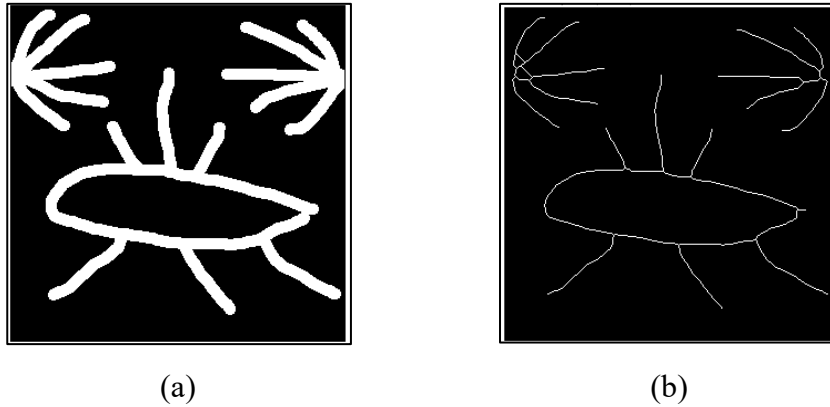
$$\Phi_{AD} = \frac{\sum V_f}{V} \quad (3.9)$$

Dengan Φ_{AD} merupakan densitas rekahan 3D, $\sum V_f$ merupakan volume total rekahan dan V merupakan volume total sampel.

Densitas rekahan dihitung menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan *input* berupa citra biner 2D dan dijalankan menggunakan *source script* yang terdapat pada Lampiran 6. Hasil yang diperoleh ialah grafik hubungan densitas terhadap tekanan dan persamaan matematis densitas fungsi tekanan.

d. Intensitas Rekahan (I)

Perhitungan intensitas rekahan dilakukan menggunakan metode skeletonisasi dengan bantuan perangkat lunak *ImageJ* dengan dasar Persamaan 2.16. Skeletonisasi merupakan proses pengubahan ketebalan dari penyusun citra sampel yang diwakili oleh warna putih pada citra (piksel dengan nilai 1 pada citra biner) menjadi citra baru warna putih 1 piksel. Tujuan dari metode ini ialah mengekstrak fitur bentuk yang merepresentasikan bentuk secara umum suatu objek. Metode ini sebelumnya diperkenalkan oleh Blum (1978) sebagai hasil dari *Medical Axis Transform* (MAT) atau *Symmetry Axis Transform* (SAT) yang menentukan batas titik terdekat untuk tiap titik dalam suatu objek. Metode ini juga pernah digunakan untuk perhitungan intensitas rekahan pada batuan panas bumi dalam bentuk 3D (Tobing, 2016., Rochmatulloh, 2018., & Sumarni, 2018). Gambar 3.20 menunjukkan ilustrasi skeleton.



Gambar 3. 20 Perbedaan (a) citra biner dan (b) citra skeleton (sumber: <http://imagej.net/AnalyzeSkeleton>)

Hasil yang diperoleh dari perhitungan intensitas rekahan ialah grafik hubungan intensitas rekahan terhadap tekanan dan persamaan matematis intensitas fungsi tekanan.