

## DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
INTISARI.....	xvii
ABSTRACT .....	xviii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Penelitian.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Metode Penyelesaian Persamaan Gerak Gelombang .....	5
2.1.1. Metode Beda Hingga .....	5
2.1.2. Metode Pseudospektral .....	6
2.1.3. Metode Elemen Hingga .....	7
2.1.4. Metode Spektral Elemen.....	7
2.2 Komputasi Paralel dalam menyelesaikan Persamaan Gerak Gelombang .....	8
BAB III DASAR TEORI .....	10
3.1 Metode Spektral Elemen.....	10
3.1.1 Formulasi kuat .....	10
3.1.2 Syarat batas tepi.....	11
3.1.3 Formulasi Lemah .....	11
3.1.4 Dekomposisi domain .....	12
3.1.5 Interpolasi dan Integrasi Fungsi pada Elemen .....	15

3.1.6	Sistem Global dan Time Marching.....	18
3.2	Jenis Gelombang Seismik.....	18
3.2.1	Gelombang Badan.....	18
3.2.2	Gelombang permukaan.....	20
3.3	Penjalaran Gelombang Seismik.....	22
3.4.1	Hukum Snellius.....	22
3.4.2	Prinsip Huygens.....	23
3.4.3	Prinsip Fermat.....	24
3.4	Survei Seismik untuk Eksplorasi Minyak Bumi.....	24
3.5	Sistem dan Perangkat Minyak Bumi .....	25
3.6	Komputasi paralel.....	29
3.7	Kontainer .....	32
BAB IV METODE PENELITIAN.....		34
4.1	Perangkat penelitian.....	34
4.2	Diagram alir Penelitian.....	35
4.3	Tahapan Penelitian.....	35
4.3.1	Konfigurasi Sistem .....	35
4.3.2	Tahap pembuatan model.....	38
4.3.3	Parameter Akuisisi.....	39
4.3.4	Kriteria Simulasi.....	39
4.3.5	Pengolahan dan Analisis data .....	43
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....		44
5.1.	Hasil Simulasi Perambatan Gelombang .....	44
5.1.1	Model 1 .....	45
5.1.2	Model 2.....	51
5.1.3	Model 3.....	57
5.1.4	Model 4.....	63
5.2.	Perbandingan Akurasi dan Waktu Simulasi .....	69
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....		72
6.1	Kesimpulan.....	72
6.2	Saran .....	72
DAFTAR PUSTAKA .....		73

LAMPIRAN A .....	77
LAMPIRAN B .....	105

## DAFTAR GAMBAR

- Gambar 3.1 Model bumi terbatas (*finite earth model*) dengan luas  $\Omega$ , sumber gempa  $X_s$ , dan batas penyerap  $\Gamma$ . Pada model terdapat vektor  $n$  yang merupakan vektor normal yang tegak lurus terhadap batas tepi model. Model pada ilustrasi terdiri dari dua lapisan yaitu lapisan 1 dan lapisan 2 (Komatitsch dan Tromp, 1999) ..... 12
- Gambar 3.2 Model bumi terbatas dengan pembagian elemen pada volume dan pembagian elemen pada batas tepi (Komatitsch dan Tromp, 1999) ..... 13
- Gambar 3.3 Pemetaan dari koordinat global (kanan) yang menggunakan koordinat kartesian ke koordinat lokal (kiri) yang menggunakan koordinat dengan simbol  $\xi, \eta, -1 \leq \xi \leq 1, -1 \leq \eta$ . Setiap elemen quadrilateral memiliki hubungan dalam jumlah  $na$  titik kontrol  $x_a = x\xi a, \eta a, a = 1, \dots, na$  dengan  $na$  merupakan fungsi bentuk element (shape function)  $na\xi, \eta$  (Komatitsch dan Tromp, 1999) ..... 14
- Gambar 3.4 Ilustrasi empat elemen yang membentuk *global mesh*. Titik *grid* pembentuk elemen ditandai dengan bentuk persegi dan titik GLL ditandai dengan lingkaran kecil. Titik GLL yang bertindihan dengan titik *grid* pembentuk elemen ditandai dengan persegi bentuk persegi yang di dalamnya terdapat lingkaran. Titik GLL yang berada di batas tepi ditandai dengan titik lingkaran berwarna hitam. .... 16
- Gambar 3.5 Gelombang P dengan arah pergerakan partikel searah dengan pergerakan gelombang. Gelombang P menyebabkan perubahan bentuk dan volume. Pergerakan gelombang dalam ilustrasi adalah pergerakan secara horizontal dengan bagian yang rapat mengalami kompresi dan bagian yang renggang mengalami relaksasi (Shearer, 2009)..... 19
- Gambar 3.6 Gelombang S dengan arah pergerakan partikel tegak lurus dengan pergerakan gelombang. Gelombang S hanya mengalami perubahan bentuk tanpa perubahan volume. Pada ilustrasi gelombang bergerak secara horizontal. (Shearer, 2009) ..... 20
- Gambar 3.7 Pergerakan gelombang Rayleigh yang memiliki pergerakan partikel *elliptical retrograde* sepanjang arah perambatannya. Gelombang ini merupakan penggabungan antara gelombang P dan Sv, sehingga pergerakan partikel pada medium yang dilalui selalu berada pada bidang vertikal (Shearer, 2009) ..... 21

- Gambar 3.8 Pergerakan gelombang Love yang memiliki pergerakan partikel tegak lurus dengan arah perambatan dan sejajar dengan permukaan. Gelombang ini bergerak seperti gelombang S yang tidak memiliki perpindahan vertikal (Shearer, 2009) ..... 22
- Gambar 3.9 Penjalaran gelombang P yang mengalami refleksi dan refraksi dengan asumsi  $VP2 > VS2 > VP1 > VS1$ . Gelombang S selalu lebih lambat dari gelombang P sehingga selalu memantul pada sudut gelombang yang lebih kecil dari gelombang P (Gadallah dan Fisher, 2009)..... 23
- Gambar 3.10 Penggambaran prinsip Huygens. Gelombang menjalar ke segala arah dari sumber getar sebagai pusat sehingga terbentuk muka gelombang. Setiap titik pada muka gelombang merupakan sumber gelombang baru (Gadallah dan Fisher, 2009) ..... 23
- Gambar 3.11 Penggambaran prinsip Fermat. Gelombang akan merambat dari satu titik ke titik lainnya dalam suatu medium dengan lintasan yang memiliki waktu tempuh terpendek. Gelombang yang merambat pada ilustrasi adalah gelombang dengan nomor 8 (Costain dan Coruh, 2004)..... 24
- Gambar 3.12 Prinsip penjalaran gelombang seismik pada metode refleksi. Gelombang yang melewati batuan dengan sifat fisis berbeda akan dipantulkan. Bagian atas dari batuan dengan sifat fisis berbeda dinamakan *reflecting horizon* (Selley dan Sonnenberg, 2014) ..... 25
- Gambar 3.13 Model hipotesis dari berbagai perangkap yang ada (a) antiklin (b) Patahan naik (c) Kubah garam (d) Perangkap stratigrafi (Neupane et al., 2020)..... 28
- Gambar 3.14 Perangkap hidrodinamik merupakan perangkap yang dihalangi oleh pergerakan air. Air mengalir dari atas menuju ke bawah sedangkan minyak dan gas bumi bergerak ke atas (Selley dan Sonnenberg, 2014)..... 29
- Gambar 3.15 Model *Shared Memory System* yang memiliki beberapa unit pemrosesan yang terhubung dengan memori tunggal (Trobe et al., 2018)..... 30
- Gambar 3.16 Konfigurasi perangkat keras pada sistem terdistribusi. Sistem menghubungkan *node* menggunakan jaringan komputer. (Nielsen, 2016)..... 31
- Gambar 3.17 Ilustrasi aplikasi pada infrastruktur yang berbeda. Aplikasi dapat berjalan pada segala sistem jika aplikasi tersebut telah terkontenerisasi (Cook, 2017) ..... 32

Gambar 3.18 Ekosistem Docker. Bagian paling kiri adalah bagian <i>client</i> yang berguna untuk berinteraksi dengan <i>host</i> . Dalam <i>Host</i> sendiri terdapat <i>images</i> yang merupakan <i>file</i> dasar untuk menjalankan <i>container</i> . Docker <i>host</i> dapat berinteraksi dengan registry yang terdapat di internet untuk mengambil image yang telah dibuat. (Docker, n.d.) .....	33
Gambar 4.1 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 4.2 Konfigurasi sistem hubungan antara <i>driver</i> , Nvidia Container Toolkit, dan Docker. Pemasangan driver membutuhkan sistem dengan GPU Nvidia dan driver CUDA. (Nvidia, n.d.) .....	37
Gambar 4.3 Mekanisme pembuatan <i>image</i> Docker. Dockerfile digunakan untuk membuat image. Image dapat disimpan di Docker Registry atau di tar file. Perubahan terhadap <i>image</i> dapat dilakukan dengan menjalankan <i>image</i> dalam <i>container</i> kemudian menyimpan kembali ( <i>commit</i> ) menjadi <i>image</i> (Docker, n.d.).....	37
Gambar 4.4 Rancangan model untuk simulasi yang terdiri dari empat model. ....	41
Gambar 4.5 Sampling sebuah fungsi sinus dengan nilai 10 titik per panjang gelombang atau 11 jika dihitung bersama dengan batas tepi. (Igel, 2017).....	43
Gambar 5.1 Histogram PPW model 1 gelombang S dalam medium padat. Mayoritas berada pada rentang nilai 15,6.....	46
Gambar 5.2 Hasil <i>mesh</i> pada model 1. <i>Mesh</i> pada model homogen ini memiliki bentuk dan ukuran yang sama ( <i>uniform</i> ) pada elemennya. ....	46
Gambar 5.3 Penjalaran gelombang pada model 1 dengan perbedaan <i>Nstep</i> = 2000 atau setara dengan 0,2 s. Menghasilkan gambar a dengan waktu 0 s dan gambar f dengan waktu 1 s. Simbol d menunjukkan gelombang langsung, S gelombang transversal dan P merupakan gelombang longitudinal.....	48
Gambar 5.4 Seismogram model 1 sebelum AGC. Seismogram hanya menampilkan gelombang langsung (d). ....	49
Gambar 5.5 Seismogram model 1 setelah dilakukan pengolahan AGC. Seismogram menampilkan gelombang langsung (d) dan gelombang <i>noise</i> akibat pemantulan pada batas sisi model. ....	50
Gambar 5.6 Histogram PPW model 1 gelombang S dalam medium padat .....	52
Gambar 5.7 Hasil <i>mesh</i> pada model 2. Hasil <i>mesh</i> terbagi menjadi 4 bagian. <i>Mesh</i> yang dihasilkan memiliki ukuran dan bentuk yang sama.....	53

- Gambar 5.8 Penjalaran gelombang pada model 2 dengan perbedaan  $Nstep=2000$  atau setara dengan 0,2 s. Simbol d menunjukkan gelombang langsung, S gelombang transversal, P merupakan gelombang longitudinal, l1 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan penutup dan l2 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan atas batuan sumber. .... 54
- Gambar 5.9 Seismogram model 2 sebelum melalui proses AGC. Hanya gelombang langsung (d) yang terlihat. .... 55
- Gambar 5.10 Seismogram model 2 setelah dilakukan pengolahan AGC. Pada gambar terlihat gelombang langsung (d), pantulan gelombang P pada lapisan penutup (l1) dan pantulan gelombang S pada lapisan atas batuan sumber. .... 56
- Gambar 5.11 Histogram PPW model 3 gelombang S dalam medium padat ..... 58
- Gambar 5.12 Hasil *mesh* pada model 3. Elemen pada *mesh* terdeformasi mengikuti bentuk geometri yang telah ditetapkan. .... 59
- Gambar 5.13 Penjalaran gelombang dengan jeda waktu 0,2 s pada model 3. Simbol d menunjukkan gelombang langsung, S gelombang transversal, P merupakan gelombang longitudinal, l1 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan penutup dan l2 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan atas batuan sumber. .... 60
- Gambar 5.14 Seismogram model 3 sebelum mengalami AGC. Hanya terlihat gelombang langsung (d) ..... 61
- Gambar 5.15 Seismogram model 3 setelah dilakukan pengolahan AGC. Pada gambar terlihat gelombang langsung (d), pantulan gelombang P pada lapisan penutup (l1) dan pantulan gelombang S pada lapisan atas batuan sumber. .... 62
- Gambar 5.16 Histogram PPW model 4 gelombang S dalam medium padat ..... 63
- Gambar 5.17 Hasil *mesh* pada model 4. *Mesh* terdiri dari 5 bagian dan elemen pada *mesh* terdeformasi mengikuti bentuk geometri yang telah ditetapkan. .... 65
- Gambar 5.18 Penjalaran gelombang dengan jeda waktu 0,2 s pada model 4. Simbol d menunjukkan gelombang langsung, S gelombang transversal, P merupakan gelombang longitudinal, l1 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan penutup dan l2 merupakan hasil pantulan gelombang P pada lapisan atas batuan sumber. .... 66

- Gambar 5.19 Seismogram model 4. Terlihat gelombang langsung (d), pantulan gelombang P pada dasar laut (dl), dan gelombang multiple yang dihasilkan gelombang dl (m) ..... 67
- Gambar 5.20 Seismogram model 4 setelah dilakukan pengolahan AGC. Terlihat gelombang langsung (d), pantulan gelombang P pada dasar laut (dl), gelombang *multiple* yang dihasilkan gelombang dl (m). ..... 68
- Gambar 5.21 Perbandingan hasil rekaman pada CPU ditandai dengan garis strip (-) berwarna merah dan hasil rekaman GPU ditandai dengan garis strip titik (-.) berwarna hijau. Grafik juga memuat residu dari kedua hasil rekaman ditandai dengan warna biru..... 70
- Gambar 5.22 Perbandingan waktu simulasi dengan menggunakan implementasi CPU secara serial, CPU paralel, dan GPU. .... 71



## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Properti fisis model yang dibuat .....	38
Tabel 5.1 Nilai PPW gelombang S pada medium solid pada model 1 .....	45
Tabel 5.2 Nilai PPW gelombang S pada medium solid pada model 2 .....	51
Tabel 5. 3 Nilai PPW gelombang S pada medium solid pada model 3 .....	57
Tabel 5.4 Nilai PPW gelombang S pada medium solid pada model 4 .....	63
Tabel 5.5 Nilai PPW gelombang P pada medium fluida model 4 .....	64
Tabel 5.6 Waktu Simulasi .....	70
Tabel 5.7 Rasio Waktu Simulasi .....	70