



**ESTIMASI BATIMETRI MENGGUNAKAN DATA SATELIT
ALTIMETRI *CRYOSAT-2*
(STUDI KASUS LAUT BAGIAN BARAT PULAU SUMATERA)**

TUGAS AKHIR

ALIEF GERY WISHERIUS

23116061

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
JURUSAN TEKNOLOGI INFRASTRUKTUR DAN KEWILAYAHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
LAMPUNG SELATAN

2020



**ESTIMASI BATIMETRI MENGGUNAKAN DATA SATELIT
ALTIMETRI CRYOSAT-2
(STUDI KASUS LAUT BAGIAN BARAT PULAU SUMATERA)**

Tugas Akhir

Alief Gery Wisherius

23116061

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
JURUSAN TEKNOLOGI INFRASTRUKTUR DAN KEWILAYAHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
LAMPUNG SELATAN
2020

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir Sarjana dengan Judul “Estimasi Batimetri Menggunakan Data Satelit Altimetri *Cryosat-2* Studi Kasus Laut Bagian Barat Pulau Sumatera” adalah benar dibuat oleh saya sendiri dan belum pernah dibuat dan diserahkan sebelumnya, baik sebagian ataupun seluruhnya, baik oleh saya ataupun orang lain, baik di Institut Teknologi Sumatera maupun di institusi Pendidikan lainnya.

Lampung Selatan, __-__-__
Penulis

Alief Gery Wisherius
23116061



Diperiksa dan disetujui oleh,

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr.Ir. Kosasih Prijatna, M.Sc

NRK. 1960 0702 198810 1 001

Zulfikar Adlan Nadzir, S.T.,M.Sc.

NRK. 1993 1219 201903 1 013

Disahkan Oleh,

Koordinator Program Studi Teknik Geomatika
Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan
Institut Teknologi Sumatera

Ir. Irdam Adil, M.T

NIP 1952 0921 1985 03 1 001

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan benar.

Nama : Alief Gery Wisherius

NIM : 23116061

Tanda Tangan :

Tanggal :

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Institut Teknologi Sumatera, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Alief Gery Wisherius
NIM : 23116061
Program Studi : Teknik Geomatika
Jurusan : Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan
Jenis Karya : Ilmiah

Demi pengembangan ilmu pengetahuan , menyetujui untuk memberikan kepada Institut Teknologi Sumatera **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Estimasi Batimetri Menggunakan Data Satelit Altimetri Cryosat-2 Studi Kasus Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan), Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Institut Teknologi Sumatera berhak menyimpan, mengalihmedia atau formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, mempublikasikan tugas akhir saya selama masih mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemillik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Lampung Selatan

Pada Tanggal :

Alief Gery Wisherius

Estimasi Batimetri Menggunakan Data Satelit Altimetri *Cryosat-2* Studi Kasus
Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Alief Gery Wisherius 23116061

Dr.Ir. Kosasih Prijatna, M.Sc, Zulfikar Adlan Nadzir S.T.,M.Sc

ABSTRAK

Laut adalah komponen penting dalam proses perencanaan aktivitas di air. Proses perencanaan tersebut membutuhkan informasi nilai kedalaman. Umumnya informasi kedalaman diperoleh menggunakan metode konvensional, namun metode ini memiliki kekurangan dalam segi penggunaan waktu yang relative lama dan biaya yang besar. Sehingga digunakanlah sebuah metode baru dengan menggunakan satelit altimetri. Penelitian ini dilakukan di laut bagian Barat Pulau Sumatera dimana bertemunya 2 lempeng yaitu lempeng hindia-Australia dan Eurasia. Dampak dari pertemuan lempeng tersebut terbentuklah topografi dasar laut yang tidak seragam. Dari perbedaan bentuk topografi tersebut maka dibagilah wilayah penelitian ini kedalam 3 zona kedalaman untuk melihat pada zona manakah hasil estimasi paling akurat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan estimasi batimetri, dan menganalisis hasil estimasi batimetri yang diperoleh dari hasil pengukuran satelit altimetri *cryosat-2* terhadap nilai kedalaman dari *multibeam echosounder* pada zona neritik (laut dangkal), zona bathyal (laut dalam) ataupun zona abisal (laut sangat dalam). Penelitian ini menggunakan data satelit altimetri *cryosat-2* tipe *Geophysical pole-to-pole level 2 (GOP P2P)*, data model undulasi geoid *EGM08*, data model gravity anomali *EGM08*, data *ETOPO1*, dan data *multibeam echosounder*. Penelitian ini menggunakan metode *remove* dan *restore* dimana hasil yang diperoleh adalah medan gayaberat *free air* dan estimasi batimetri. Hasil yang diperoleh dari estimasi batimetri, selanjutnya divalidasi terhadap nilai kedalaman hasil pengukuran *multibeam echosounder*. Proses validasi dilakukan pada tiga zona kedalaman, dimana pada zona neritik diambil sebanyak 51 titik kedalaman, pada zona bathyal digunakan sebanyak 256 titik kedalaman, dan pada zona abisal digunakan sebanyak 562 titik kedalaman. Masing-masing titik tersebut dihitung selisih dari setiap titik kedalaman. Selisih yang diperoleh, kemudian diolah dengan menggunakan pendekatan statistik deteksi outlier 2σ . Dari hasil perhitungan statistik yang dilakukan, diperoleh jumlah titik yang masuk kedalam rentang selang kepercayaan yaitu 80% pada zona neritik, 90% pada zona *bathyal*, dan 83% pada zona abisal. Dari hasil tersebut disimpulkan bahwa kualitas hasil estimasi pada zona abisal dan bathyal lebih baik dibandingkan di zona neritik.

Kata Kunci : *SSH*, Gravity Anomali, Batimetri

*Bathymetry Estimation Using Altimetry Satellite Cryosat-2 Case Study of the West
Sea Sumatera Island*

Alief Gery Wisherius 23116061

Dr.Ir. Kosasih Prijatna, M.Sc, Zulfikar Adlan Nadzir S.T.,M.Sc

ABSTRACT

The sea is an important component in the process of planning activities in water. The planning process requires depth information. Generally depth information is obtained using conventional methods, but this method has shortcomings in terms of the use of relatively long time and large costs. So a new method using altimetry satellite is used. This research was conducted in the western part of the island of Sumatra where two plates were encountered, namely the Indian-Australian and Eurasian plates. The impact of the meeting of the plates formed non-uniform seabed topography. From these different topographic forms, the study area is divided into 3 depth zones to see which zone is the most accurate estimation results. The purpose of this study is to carry out bathymetry estimation, and analyze the bathymetry estimation results obtained from the measurement of cryosat-2 altimetry satellites on the depth value of multibeam echosounder in the neritic zone (shallow sea), bathyal zone (deep sea) or abisal zone (sea) very deep). This research uses pole-to-pole level 2 (GOP P2P) cryosat-2 geophysical satellite altimetry data, EGM08 geoid undulation model data, EGM08 gravity anomaly model data, ETOPO1 data, and multibeam echosounder data. This research uses the remove and restore method where the results obtained are free air gravity field and bathymetry estimation. The results obtained from the bathymetry estimation are then validated against the depth value of the multibeam echosounder measurement. The validation process was carried out in three depth zones, where in the neritic zone as many as 51 depth points were taken, in the bathyal zone 256 points were used, and in the abisal zone as many as 562 depth points were used. Each point is calculated difference from each depth point. The difference obtained is then processed using the 2σ outlier detection statistical approach. From the results of statistical calculations, the number of points entered into the range of confidence intervals is 80% in the neritic zone, 90% in the bathyal zone, and 83% in the abisal zone. From these results it was concluded that the quality of the estimated results in the abisal and bathyal zones was better than in the neritic zone.

Keywords : SSH, Anomaly Gravity, Bathymetry

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bekasi, pada tanggal 6 Juni 1996. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis merupakan anak dari pasangan Order Ginting dan Sinur Barita Tanjung.

Penulis menempuh jenjang sekolah dasar di SDN 101740 Desa Tanjung Selamat, kecamatan Pancurbatu, Deli Serdang, dan menyelesaikan Pendidikan sekolah dasar pada tahun 2008. Penulis selanjutnya melanjutkan Pendidikan Menengah Pertama di SMP Swasta Darrusalam Medan, dan menyelesaikan Pendidikan Mengah Pertama pada tahun 2011. Pada tahun selanjutnya penulis melanjutkan Pendidikan kejenjang Menengah Atas di SMA Negeri 4 Medan, dan menyelesaikan Pendidikan Menengah Atas pada tahun 2014. Penulis kemudian melanjutkan Pendidikannya kejenjang Perguruan Tinggi pada tahun 2016 melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada program studi Teknik Geomatika Institut Teknologi Sumatera.

Selama menempuh Pendidikan di perguruan tinggi penulis ikut aktif dalam beberapa organisasi yaitu Himpunan Mahasiswa Geomatika, Ikatan Mahasiswa Geodesi Indonesia, dan Generasi Baru Indonesia pada tahun 2017-2020.

MOTTO

*“Jadilah Manusia Yang Selalu Bersyukur, Selalu
Bermanfaat Terhadap Seluruh Mahkluk Hidup,
Serta Jangan Pernah Kamu Merasa Sendiri
Karena Orang Orang Yang Selalu Beryukur dan
Bermanfaat Pasti Tidak Akan Pernah Berjalan
Sendiri”*

PERSEMBAHAN

Pada kesempatan ini penulis juga ingin membagikan rasa terima kasih dan bangga yang sebesar-besarnya kepada keluarga, sahabat dan teman-teman semua. Penulis ingin menyampaikan persembahan kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kemudahan dan segalanya dalam hidup penulis
2. Bapak dan Mama beserta Tante dari penulis yang selalu menguatkan dan mendoakan serta memberi semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini dan memotivasi untuk menggapai cita-cita penulis
3. Keluarga besar dikampung halaman tepat nya di kota medan, terima kasih untuk dorongan dan semangat buat penulis selama merantau di lampung
4. Terima kasih kepada dosen pembimbing 1 dan pembimbing 2 penulis yaitu bapak Dr.Ir. Kosasih Prijatna, M.Sc dan bapak Zulfikar Adlan Nadzir S.T.,M.Sc yang sudah sabar membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini
5. Bapak Prayudha Hartanto S.T., M.T dan Ibu Yustisi Ardhitasari Lumban Gaol yang telah membimbing penulis dalam pengolahan Altimetri di Badan Informasi Geospasial
6. Teman-teman penulis Caca, Carlos dan Beauty yang sudah membantu penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini
7. Sahabat penulis Arief Budiman, Agung Prasetyo dan Agus Suprianto atas dukungannya dalam bentuk peminjaman laptop dan wifi internet dalam pengerjaan tugas akhir ini
8. Adik tingkat penulis Shafira Damayanti atas bantuan nya berupa catatan kuliah yang sangat bermanfaat dalam penyelesaian tugas akhir ini
9. Seluruh keluarga besar Teknik Geomatika Institut Teknologi Sumatera atas ilmu dan pengalaman yang sudah diberikan untuk penulis
10. Seseorang yang spesial yang tidak bisa penulis sebutkan namanya, terima kasih telah menjadi motivasi untuk menggapai cita-cita hebat penulis.

KATA PENGANTAR

Segala Puji bagi Allah SWT Tuhan semesta alam. Hanya kepada-Nya kami menyembah dan Hanya kepada-Nya kami memohon pertolongan. Tiada sekutu bagiNya apa yang ada di langit dan di bumi. Shalawat beserta salam semoga tetap terlimpahkan kepada Rasullullah SAW beserta keluarga, sahabat dan seluruh umatnya hingga akhir zaman.

Tugas Akhir dengan judul : **“Estimasi Batimetri Menggunakan Data Satelit Altimetri Cryosat-2 Studi Kasus Laut Bagian Barat Pulau Sumatera”**

Dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari terselesaikannya tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak yang memberikan bimbingan dan bantuan kepada penulis. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr.Ir. Kosasih Prijatna, M.Sc dan bapak Zulfikar Adlan Nadzir S.T.,M.Sc selaku pembimbing penulis yang sudah memberikan nasihat, waktu serta ilmu yang diberikan kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Satrio Muhammad Alif S.T., M.T selaku dosen wali penulis selama berkuliah di Institut Teknologi Sumatera.
3. Bapak Agung Pandi Nugroho, S.T., M.T dan Ibu Lea Kristi Agustina, S.T., M.Eng selaku dosen penguji penulis yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Prayudha Hartanto S.T., M.T dan Ibu Yustisi Ardhitasari Lumban Gaol yang telah membimbing penulis dalam proses pengolahan Altimetri di Badan Informasi Geospasial
5. Serta Seluruh Staf Pengajar Teknik Geomatika Institut Teknologi Sumatera atas ilmu, pengalaman dan arahan terhadap penulis untuk lebih baik lagi kedepannnya.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, dikarenakan keterbatasan yang penulis miliki. Oleh karena itu penulis sangat menerima apabila ada saran dan kritik yang sifatnya membangun guna perbaikan untuk penelitian selanjutnya.

Lampung Selatan, 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I	
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.2.1 Rumusan Masalah.....	3
1.2.2 Tujuan	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.3.1 Ruang Lingkup Pengolahan.....	4
1.3.2 Ruang Lingkup Wilayah.....	5
1.4 Metodologi Penelitian	8
1.5 Sistematika Penulisan.....	10
BAB II	
TINJUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Satelit Altimetri	11
2.2 Satelit Cryosat 2	12

2.3 Sistem Pengukuran Satelit Altimetri	16
2.4 Hubungan <i>Sea Surface Height</i> , <i>Gravity Anomaly</i> dan Batimetri	17
2.4.1 <i>Sea Surface Height</i>	17
2.4.2 <i>Gravity Anomaly</i>	19
2.4.3 Batimetri	20
2.5 <i>Least-Square Collocation (LSC)</i>	22
2.6 Zona Laut Berdasarkan Kedalaman	23
2.6.1 Zona Litoral (Wilayah Pasang Surut)	23
2.6.2 Zona Neritik (Laut Dangkal)	23
2.6.3 Zona Bathial (Laut Dalam)	24
2.6.4 Zona Abisal (Laut Sangat Dalam)	24
2.7 <i>Multibeam Echosounder</i>	24
2.8 Filter Gaussian.....	25
2.9 Resampling Dengan Grdfilter	26
2.10 Selang Kepercayaan	27
2.11 Metode Deteksi <i>Outlier</i> 2 Sigma.....	27
BAB III	
METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Pengumpulan Data	29
3.2 Pengolahan Data.....	32
3.2.1 Pengolahan Gravity Anomali.....	35
3.2.2 Pengolahan Batimetri.....	39
3.2.3 Proses Validasi Data Batimetri	41
BAB IV	
HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Data <i>Sea Surface Height</i> Satelit di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera	43
4.2 Bentuk Residual Gradien Geoid Di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera	45
4.3 Bentuk Residual Medan Gayaberat di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera	47
4.4 Model Medan Gayaberat Setelah Dikoreksi di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera	50

4.5 Model ETOPO1 Hasil <i>Cut</i> dan <i>Filtering</i> di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	52
4.6 Bentuk Medan Gayaberat Gelombang Panjang di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	53
4.7 Bentuk Medan Gayaberat Gelombang Pendek di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	54
4.8 Model Batimetri Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	55
4.9 Proses Validasi Estimasi Batimetri	59
4.9.1 Selisih Nilai Kedalaman Batimetri Dari Altimetri dan Multibeam	59
4.9.2 Proses Validas Berdasarkan Kedalaman.....	60
BAB V	
KESIMPULAN DAN SARAN	68
5.1 Kesimpulan.....	68
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Absolut Orbit Number Penelitian	6
Tabel 2.1 Informasi Satelit Cryosat 2	12
Tabel 3.1 Variabel data <i>GOP P2P</i>	35
Tabel 4.1 Jumlah Titik Pada Setiap Orbit	45
Tabel 4.2 Tabel Informasi Model Batimetri	56
Tabel 4.3 Informasi Hasil Proses Validasi Selang Kepercayaan 95%.....	60
Tabel 4.4 Informasi Hasil Validasi 2σ	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jalur Cycle Satelit Altimetri Cryosat 2 yang digunakan	7
Gambar 1.2 Lokasi Penelitian	7
Gambar 1.3 Zona Kedalaman Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	8
Gambar 1.4 Diagram Alir	9
Gambar 2.1 Gambar ini menjelaskan bagian bagian dari satelit <i>Cryosat-2</i> a). Reflektor <i>SLR</i> b). <i>Doris Reciver</i> untuk penentuan orbit c). Antena <i>X-Band</i> d). Antena <i>S-Band</i> [9]	13
Gambar 2.2 Sistem Pengukuran Satelit Altimetri	17
Gambar 2.3 Skema prinsip pengukuran satelit altimetri Cryosat 2 untuk memperoleh <i>sea surface height</i> . Diamana 1). N adalah undulasi atau tinggi geoid dari ellipsoid, 2). h adalah <i>sea surface height</i> , dan 3). ζ adalah <i>ocean topography</i>	18
Gambar 2.4 Ilustrasi Geoid terhadap Ellipsoid	19
Gambar 2.5 Batasan Dasar pembuatan topografi dari pengukuran gravity anomaly di ilustrasikan oleh seamounts (Kiri) dan plateau (kanan). Penampakan gravity dari kaki gunung yang berjarak dekat (terpisah 4 kilometer dan tinggi 1 kilometer) kuat dan berbeda ketika kedalaman laut rata – rata adalah 2 kilometer atau kurang, tetapi penampakan objek tersebut bergabung dan menjadi lemah ketika kedalaman laut 4 kilometer. Secara isostatis akan menghasilkan efek tepi gravity lokal yang sangat lemah pada jarak 150 kilometer, dengan demikian gravity yang jauh tidak memberikan informasi keseluruhan kedalaman [14].	21
Gambar 2.6 Zonasi Laut.....	23
Gambar 2.7 Prinsip Multibeam Echosounder [24]	25
Gambar 2.8 Ilustrasi Penggunaan filter rata-rata berukuran 3×3 pixel	27
Gambar 3.1 Geoid Undulasi EGM2008 Indonesia	30
Gambar 3.3 Peta Cakupan Multibeam Echosounder	32
Gambar 3.4 Batimetri hasil Auto Grid yang diperoleh dari <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (NOAA)	32
Gambar 3.5 Diagram Pengolahan Medan Gayaberat.....	33
Gambar 3.6 Diagram Pengolahan Medan Gayaberat Menjadi Batimetri	34
Gambar 4.1 Model Nilai <i>Sea Surface Height</i> di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera.....	43
Gambar 4.2 Grafik Profil <i>Sea Surface Height</i> di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera.....	44

Gambar 4.3 Jumlah Titik Pada Tiap Orbit di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera.....	44
Gambar 4.4 Azimut Geoid Gradien	46
Gambar 4.5 Grafik Residual Gradien Geoid atau Defleksi Vertikal di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera	47
Gambar 4.6 Residual Medan Gayaberat di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera.....	48
Gambar 4.7 Grafik Residual Medan Gayaberat Setiap Titik di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera.....	48
Gambar 4.8 Medan Gayaberat Hasil Penjumlahan Gelombang Panjang, Residual dan Pendek	49
Gambar 4.9 Grafik Medan Gayaberat Setiap Titik dari Hasil Penjumlahan Gelombang Panjang, Menengah dan Pendek.....	49
Gambar 4.10 Medan Gayaberat Hasil Filter Di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera.....	51
Gambar 4.11 Grafik Medan Gayaberat Hasil Filter Pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera.....	51
Gambar 4.12 Model ETOPO1 Hasil <i>Cutting</i> Pada Wilayah Periran Bagian Barat Pulau Sumatera.....	52
Gambar 4.13 Model ETOPO1 Hasil <i>Filtering</i> Pada Wilayah Periran Bagian Barat Pulau Sumatera.....	53
Gambar 4.14 Model medan gayaberat gelombang panjang.....	54
Gambar 4.15 Model medan gayaberat gelombang pendek.....	55
Gambar 4.16 Peta Model Batimetri Multibeam Dan Kontur	57
Gambar 4.17 Peta Model Batimetri Dengan Metode Altimetri dan Kontur	58
Gambar 4.18 Selisih Kedalaman Altimetri dan Multibeam Beserta Pembagian Zona Kedalaman	59
Gambar 4.19 Peta Selisih Kedalaman <i>ETOPO1</i> resolusi 5 menit dan <i>Multibeam Echosounder</i> resolusi 5 menit	62
Gambar 4.20 Peta Pertemuan Lempeng India-Australia dan Eurasia. a) Kotak warna kuning adalah wilayah penelitian, b) Garis merah adalah palung Sunda...	63
Gambar 4.21 Peta Selisih Kedalaman Zona Sangat Dalam (<i>Abisal</i>). a) Kotak Kuning adalah wilayah palung Sunda dan selisih kedalaman tertinggi, b) Garis Merah adalah wilayah Zona Abisal	64
Gambar 4.22 Sampel Zona Sangat Dalam (<i>Abisal</i>). a) Kotak kuning adalah titik selisih kedalaman terbesar yang berada di wilayah Palung Sunda	64

Gambar 4.23 Peta Selisih Kedalaman Zona Dalam (<i>Bathyal</i>).....	65
Gambar 4.24 Sampel Zona Dalam (<i>Bathyal</i>). a) Kotak kuning menjelaskan titik-titik kedalaman yang seharusnya bukan berada pada zona bathyal	66
Gambar 4.23 Peta Selisih Kedalaman Zona Dangkal (<i>Neritik</i>)	67
Gambar 4.24 Sampel Zona Dangkal (<i>Neritik</i>)	67

DAFTAR LAMPIRAN**LAMPIRAN A**

SCRIPT PENGOLAHAN SATELIT ALTIMETRI CRYOSAT-2 MENJADI BATIMETRI	74
--	-----------

LAMPIRAN B

DATA KEDALAMAN ALTIMETRI DAN MULTIBEAM ECHOSOUNDER.....	76
--	-----------

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Komponen permukaan bumi terdiri dari 71 persen air. Jumlah total air yang ada di bumi sekitar 534.992 juta kilometer kubik. Sembilan puluh tujuh persen dari total air yang ada di bumi tersebut adalah lautan atau air asin [1]. Melihat dari besarnya komponen lautan di muka bumi, maka dapat diartikan lautan adalah komponen yang sangat penting di bumi yang berfungsi sebagai penyeimbang ekosistem. Informasi mengenai dinamika perubahan bentuk topografi permukaan laut menjadi sangat penting untuk menunjang kegiatan-kegiatan kelautan seperti penelitian, operasi pelayaran untuk transportasi laut, penangkapan ikan, eksplorasi sumber daya laut, serta pembangunan disektor kelautan lainnya.

Proses pemodelan dinamika perubahan topografi permukaan laut membutuhkan informasi kedalaman laut yang diperoleh dengan melakukan survei batimetri. Survei batimetri adalah suatu proses pengukuran kedalaman yang bertujuan untuk memperoleh gambaran (model) bentuk permukaan (konfigurasi) dasar perairan (*seabed surface*) [2].

Seiring perkembangan zaman, visualisasi survei batimetri sudah dapat dilakukan dengan dua metode yaitu survei secara langsung dan tidak langsung. Medium yang dapat digunakan dalam survei batimetri ini terdiri dari *echosounder* yang digunakan pada survei secara langsung dan satelit altimetri yang digunakan pada survei tidak langsung. Sehingga lebih memudahkan dalam melakukan proses visualisasi topografi dasar laut sesuai dengan cakupan wilayah pengamatan survei.

Penelitian ini dilakukan pada wilayah laut bagian barat pulau Sumatera, dimana wilayah penelitian ini terdiri dari beberapa zona berdasarkan kedalaman. Pembagian zona kedalaman ini disebabkan terdapatnya lempeng Samudera Hindia pada wilayah laut bagian Barat Pulau Sumatera, sehingga terdapat beragam bentuk dasar laut di wilayah perairan tersebut. Pembagian zona kedalaman tersebut terdiri dari zona neritik (laut dangkal), zona bathyal (laut dalam), dan zona abisal (laut sangat dalam).

Proses pemodelan batimetri pada laut bagian Barat Pulau Sumatera ini relatif sulit untuk dilakukan, hal tersebut disebabkan oleh banyaknya ekosistem seperti lamun dan terumbu karang (banyak ditemukan pada wilayah perairan dangkal) yang menyebabkan sulitnya survei untuk dilakukan. Kapal-kapal yang membawa alat untuk survei batimetri, seperti echosounder, sonar dan lainnya tidak dapat digunakan dengan leluasa (khususnya wilayah perairan dangkal yang memiliki kondisi substrat dasar laut yang tidak beraturan). Wilayah penelitian ini juga sangatlah luas sehingga survei batimetri dengan metode konvensional sangatlah membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang tinggi [3]. Dalam mengatasi masalah tersebut, terdapat sebuah metode survei batimetri yang dapat dilakukan secara tidak langsung atau disebut juga dengan metode penginderaan jauh, dimana metode ini relatif lebih murah dan cakupan wilayahnya yang luas, serta dapat menjangkau wilayah yang relatif sulit [3].

Bermula dari permasalahan tersebut, maka dilakukan pemodelan batimetri dengan menggunakan pengukuran satelit altimetri. Satelit altimetri merupakan salah satu metode penginderaan jauh, yang mana satelit ini dapat digunakan untuk memantau topografi dan dinamika yang terjadi di dasar laut. Prinsip dasar dari pengamatan altimetri yaitu dengan menghitung selisih interval waktu antara gelombang elektromagnetik yang dipancarkan dengan gelombang elektromagnetik yang dipantulkan oleh permukaan laut [4]. Satelit altimetri yang digunakan sebagai sumber data estimasi batimetri pada penelitian ini adalah satelit altimetri *Cryosat-2*. Satelit ini merupakan satelit tipe *Geodetic Mission*, memiliki *repeat cycle* 369 hari, 5344 orbit dengan *sub-cycle* per 30 hari [5], sehingga data yang diperoleh lebih rapat dibandingkan dengan satelit altimetri lainnya.

Berdasarkan permasalahan tersebut maka perlu dilakukan penelitian dan pemodelan batimetri untuk menganalisis seberapa akurat dan efisien data yang diperoleh dari pemodelan batimetri menggunakan satelit altimetri *cryosat-2*, yang nantinya hasil dari penelitian tersebut dapat menciptakan suatu inovasi baru sebagai solusi untuk pemodelan batimetri pada zona neritik (laut dangkal), zona bathyal (laut dalam) ataupun zona abisal (laut sangat dalam) [6]. Khususnya pada wilayah laut bagian barat pulau Sumatera, yang mana merupakan bagian dari wilayah pengelolaan perikanan 572 (WPP-572) yang kaya akan sumber daya hayati laut.

Perairan (WPP-572) meliputi perairan Samudera Hindia sebelah barat sumatera [7]. Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi gambaran topografi dasar laut, yang digunakan untuk mengetahui dan merancang pembangunan pada sektor kelautan.

1.2 Tujuan Penelitian

Dilihat dari latar belakang dan kondisi yang ada, maka rumusan masalah dan tujuan dari penelitian ini akan dijelaskan secara rinci agar mudah dibaca dan dipahami secara umum.

1.2.1 Rumusan Masalah

Survei batimetri dengan menggunakan *ecosounder* membutuhkan proses yang cukup lama serta biaya yang besar [3]. Saat ini sudah ditemukan metode baru yang dapat digunakan dalam proses survei batimetri tersebut, yaitu dengan menggunakan media satelit altimetri. Untuk hasil dari batimetri tersebut belum dapat dipastikan ketelitian data yang diperoleh. Untuk mengatasi masalah itu maka disusun pertanyaan penelitian meliputi.

1. Bagaimana penentuan estimasi batimetri di wilayah laut bagian Barat Pulau Sumatera?
2. Bagaimana cara mengetahui keakuratan hasil estimasi batimetri dari satelit altimetri *Cryosat-2* di wilayah laut bagian Barat Pulau Sumatera?

1.2.2 Tujuan

Pemodelan batimetri menggunakan data satelit altimetri menjadi suatu solusi untuk mengatasi permasalahan terhadap lama nya waktu yang dibutuhkan dan biaya yang besar dalam survei batimetri konvensional [3]. Seiring dengan kesuksesan penelitian terdahulu dalam pemodelan batimetri dengan menggunakan data satelit altimetri, maka dibuatlah tujuan yang ingin dicapai pada penelitian tugas akhir ini yaitu.

1. Mengestimasi batimetri di wilayah laut bagian barat pulau sumatera.

2. Menganalisis hasil estimasi batimetri yang diperoleh dari satelit altimetri *Cryosat-2* terhadap nilai kedalaman yang diperoleh dari *Multibeam Echosounder* pada zona neritik (laut dangkal), zona bathyal (laut dalam) ataupun zona abisal (laut sangat dalam) di wilayah laut bagian Barat Pulau Sumatera.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Melihat begitu luasnya bahasan mengenai Altimetri dan Multibeam Echosounder maka perlu dilakukan pembatasan masalah dalam penelitian ini. Adapun ruang lingkup penelitian dijelaskan kedalam ruang lingkup pengolahan dan ruang lingkup wilayah sebagai berikut :

1.3.1 Ruang Lingkup Pengolahan

Pada penelitian ini masalah dibatasi pada hasil survey batimetri yang diperoleh dari beberapa parameter yang terdiri dari Satelit Altimetri *Cryosat -2* dan *Multibeam Echosounder*.

a. Ruang Lingkup Pengolahan Altimetri Cryosat -2

Pada proses pengolahan data Altimetri *Cryosat-2* dibatasi oleh beberapa variabel, yaitu *Sea Surface High (SSH)*, *Geoid Undulation Model*, medan gayaberat dan *Sea Surface Topografi* yang terreferensi terhadap model Geoid *Earth Gravitational Model 2008 (EGM 08)*. Variabel dari *Sea Surface Height* dihilangkan (*remove*) pengaruh dari faktor topografi baik secara local ataupun global, yang mana tujuannya adalah untuk memperoleh nilai residual gradien geoid. Nilai residual gradien geoid dikalkulasikan terhadap *EGM2008* dengan menggunakan metode *Least Square Collocation (LSC)*. Hasil pengolahan tersebut akan menghasilkan residual medan gaya berat. Hasil residual medan gaya berat dikalkulasikan (*restore*) terhadap medan gaya berat model hingga menghasilkan medan gaya berat akhir. Medan gaya berat yang diperoleh akan dikalkulasikan kembali terhadap data *ETOPO1* yang sudah diresampling menjadi resolusi 5 menit dengan menggunakan metode *Gaussian Filter* hingga menghasilkan prediksi batimetri.

b. Ruang Lingkup Pengolahan *Multibeam Echosounder*

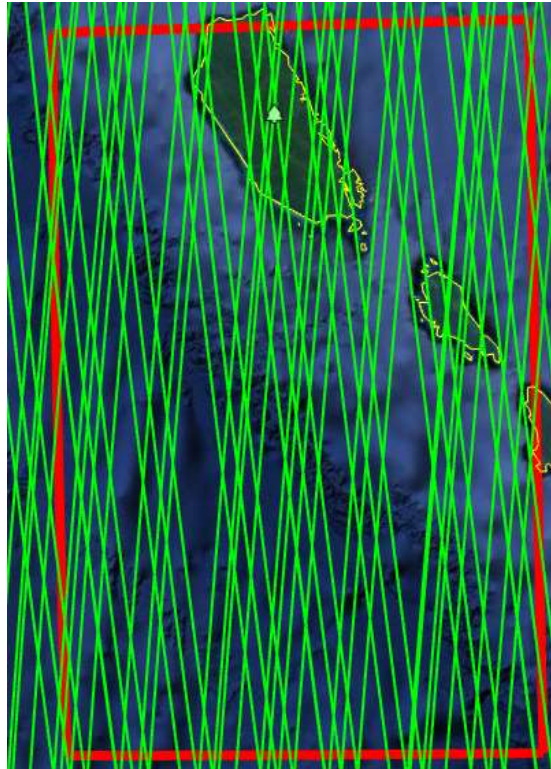
Pada proses pengolahan data *Multibeam Echosounder* dibatasi hanya dengan beberapa variabel, yaitu data *Multibeam Echosounder* yang diperoleh dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dengan resolusi spasial 230 meter. Data *Multibeam* yang diperoleh kemudian diresampling untuk menyamakan resolusi spasial terhadap hasil estimasi batimetri dari satelit altimetri *Cryosat-2*, dimana proses resampling ini menggunakan metode *Gaussian*. Data hasil resampling yang diperoleh adalah data *Multibeam* dengan resolusi spasial 5 menit atau 9.25 kilometer. Hasil dari data *Multibeam Echosounder* ini sudah dalam bentuk *auto grid*, dan akan digunakan sebagai data validasi dari hasil estimasi batimetri yang diperoleh dari data satelit altimetri *Cryosat-2*.

1.3.2 Ruang Lingkup Wilayah

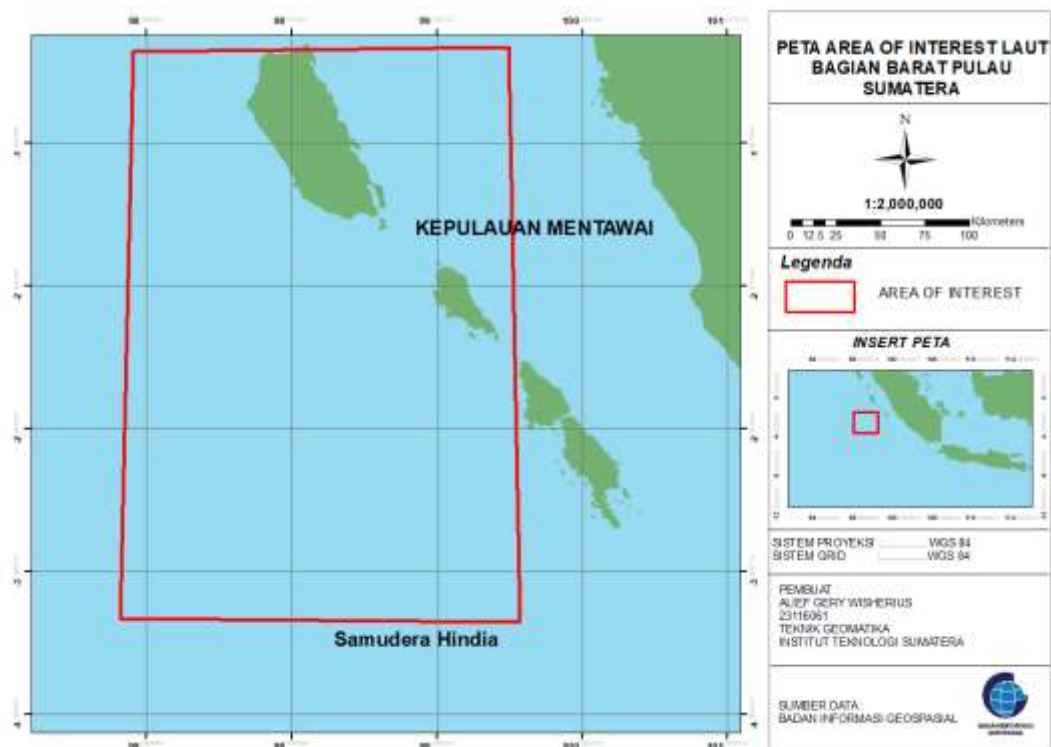
Penelitian ini menggunakan 50 orbit satelit altimetri tipe *Geodetic Mission* yang disajikan pada tabel 1.1, dengan rentang waktu yang digunakan dari oktober 2011– juli 2015. Spacing orbit satelit altimetri *Cryosat-2* ini adalah 7.2 kilometer. Wilayah penelitian terletak di laut bagian Barat Pulau Sumatera. Wilayah penelitian ini berada pada $(-1^{\circ} \text{ LS} - (-4^{\circ} \text{ LS}))$ dan $(98^{\circ} \text{ BT} - 100^{\circ} \text{ BT})$ dan dibagi oleh beberapa zona kedalaman yang disajikan pada gambar 1.1 dan 1.2.

Tabel 1.1 Absolut Orbit Number Penelitian

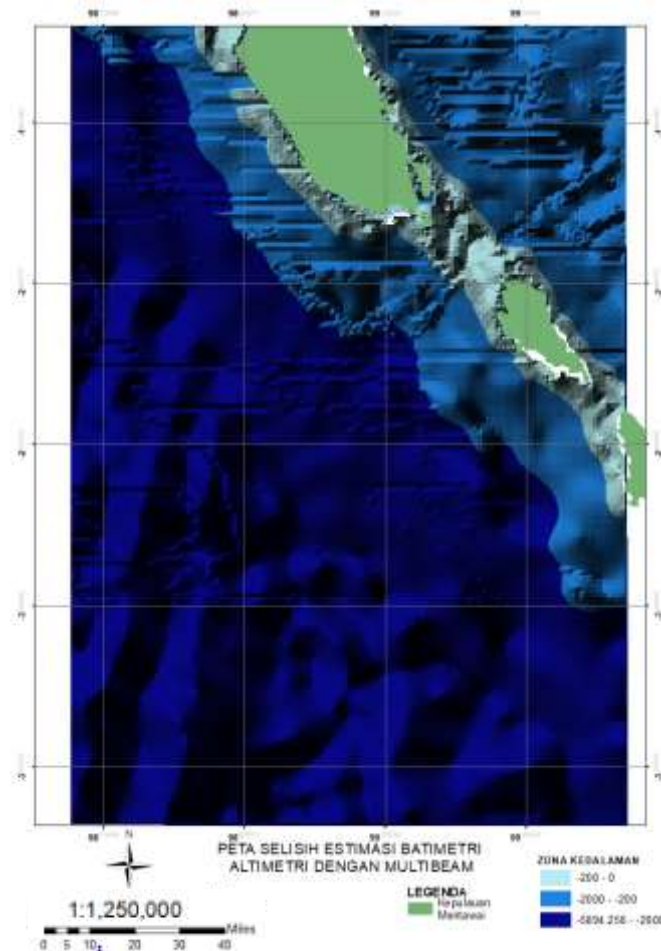
Nomor Orbit	Informasi Orbit Tanggal Orbit	Nomor Orbit	Informasi Orbit Tanggal Orbit
8036	14-10-2011	18333	22-09-2013
8065	16-10-2011	18724	19-10-2013
8485	14-11-2011	18753	21-10-2013
9296	09-01-2012	19144	17-11-2013
9687	05-02-2012	19173	19-11-2013
9716	07-02-2012	19564	16-12-2013
10107	05-03-2012	21020	26-03-2014
10136	17-03-2012	21215	09-04-2014
10527	02-04-2012	21606	06-05-2014
10977	01-05-2012	21635	08-05-2014
11367	30-05-2012	22446	03-07-2014
11758	26-06-2012	22837	30-07-2014
12178	25-07-2012	22866	01-08-2014
13409	18-10-2012	23257	28-08-2014
13829	16-11-2012	23677	26-09-2014
14220	13-12-2012	24097	25-10-2014
14640	11-01-2013	24488	20-11-2014
15031	07-02-2013	24517	22-11-2014
15060	09-02-2013	24908	19-12-2014
16262	03-05-2013	25328	17-01-2015
16291	05-05-2013	26139	14-03-2015
16682	01-06-2013	26559	12-04-2015
16711	03-06-2013	27399	09-06-2015
17102	30-06-2013	-	06-07-2015
17522	28-07-2013		
17913	24-08-2013		



Gambar 1.1 Jalur Cycle Satelit Altimetri Cryosat 2 yang digunakan



Gambar 1.2 Lokasi Penelitian

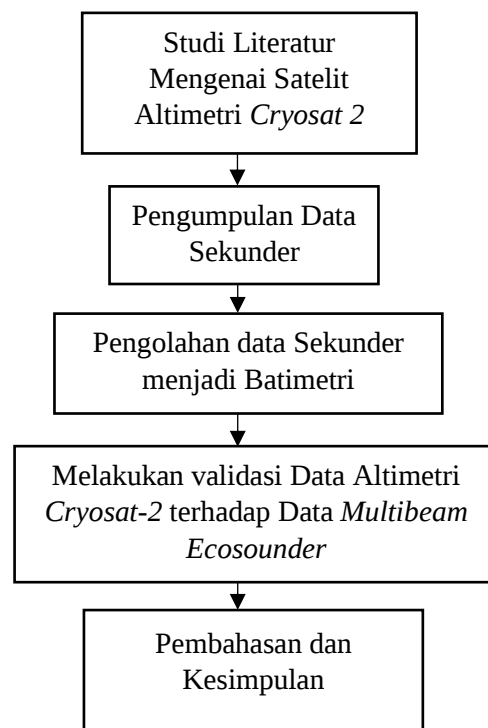


Gambar 1.3 Zona Kedalaman Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

1.4 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini terlihat pada gambar 1.3 dimulai dengan studi literatur untuk mengidentifikasi permasalahan pengukuran satelit altimetri *Cryosat-2* untuk memodelkan batimetri yang bersumber dari jurnal ilmiah dan *handbook* satelit dengan kajian meliputi prinsip dasar pengukuran dan solusi dalam pengukuran. Pengumpulan data sekunder menggunakan data orbit satelit altimetri *Cryosat-2* dan data *Sea Surface High* dari *European Space Agency* (ESA) untuk proses pemodelan medan gaya berat dan pemodelan batimetri, data *EGM 2008* dari *National Geospatial Agency* (NGA) untuk proses pengujian peningkatan perbaikan akurasi, data *Multibeam Echosounder* dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) untuk proses validasi hasil estimasi batimetri.

Proses estimasi batimetri dilakukan untuk mengetahui ketelitian model batimetri yang dihasilkan oleh satelit *cryosat-2* pada daerah dangkal, sedang dan dalam. Proses pemodelan batimetri dilaksanakan dengan melakukan pemodelan gravity anomaly yang diperoleh dari data SSH, data SSH tersebut nantinya dilakukan proses perhitungan terhadap model SST dan Undulasi geoid EGM2008 hingga memperoleh residual geoid, hasil residual geoid kemudian diolah dengan menggunakan metode *Least Square Collocation* hingga menghasilkan residual medan gayaberat. Residual medan gayaberat kemudian diolah kembali terhadap medan gayaberat EGM2008 hingga menghasilkan model medan gayaberat *free air*. Model medan gaya berat *free air*. Tahap berikutnya adalah proses perolehan data medan gayaberat gelombang panjang, kemudian medan gayaberat gelombang panjang yang diperoleh diolah lagi terhadap medan gayaberat *free air* hingga menghasilkan model medan gayaberat gelombang pendek. Tahap akhir adalah hasil medan gayaberat gelombang pendek ditransformasi dengan referensi kedalaman 11000 meter hingga menghasilkan model estimasi batimetri.



Gambar 1.4 Diagram Alir

1.5 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran yang singkat mengenai pembahasan penelitian, maka penelitian ini dibagi menjadi 5 bab yang saling berhubungan. Adapun sistematika dari penulisan penelitian adalah sebagai berikut :

BAB 1 : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, metodologi dan sistematika penulisan.

BAB 2 : ESTIMASI BATIMETRI MENGGUNAKAN DATA SATELIT ALTIMETRI

Bab ini menjelaskan Teori – teori dasar umum yang berasal dari sumber acuan yang berupa tulisan – tulisan ilmiah yang berkaitan dengan variabel-variabel penelitian.

BAB 3 : METODELOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan lokasi penelitian, tahapan–tahapan dalam penelitian dan pengolahan data, kerangka pikir serta desain penelitian.

BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menyajikan data yang diperoleh beserta hasil pengolahannya. Data yang disajikan dapat berupa tabel, gambar atau grafik. Pada bab ini juga mencakup analisis atas hasil yang diperoleh dari pengolahan data.

BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini penutup dan berisi kesimpulan dari seluruh penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1 Satelit Altimetri

Sistem satelit altimetri berkembang sejak tahun 1975, ketika diluncurkannya sistem satelit Geos-3. Pada saat ini secara umum sistem satelit altimetri mempunyai tiga objektif ilmiah jangka panjang yaitu mengamati sirkulasi lautan global, memantau volume dari lempengan es kutub, dan mengamati perubahan muka laut rata-rata (MSL) global [8].

Dalam konteks geodesi, objektif terakhir dari misi satelit altimetri tersebut adalah yang menjadi perhatian. Dengan kemampuannya untuk mengamati topografi dan dinamika dari permukaan laut secara kontinyu, maka satelit altimetri tidak hanya bermanfaat untuk pemantauan perubahan *MSL* global, tetapi juga akan bermanfaat untuk beberapa aplikasi geodetik dan oseanografi seperti yang diberikan [8]:

- Penentuan topografi permukaan laut (SST)
- Penentuan topografi permukaan es
- Penentuan geoid di wilayah lautan
- Penentuan karakteristik arus dan eddies
- Penentuan tinggi (signifikan) dan panjang (dominan) gelombang
- Studi pasang surut di lepas pantai
- Penentuan kecepatan angin di atas permukaan laut
- Penentuan batas wilayah laut, dan es
- Studi fenomena El Nino
- Manajemen sumber daya laut
- Unifikasi datum tinggi antar pulau

Begitu banyak hal yang dapat kita pelajari dengan mengaplikasikan teknologi satelit altimetri, sehingga teknologi ini mulai menjadi tren baru dalam dunia science dan rekayasa geodesi kelautan, oseanografi, dan bidang-bidang ilmu terkait lainnya.

2.2 Satelit Cryosat 2

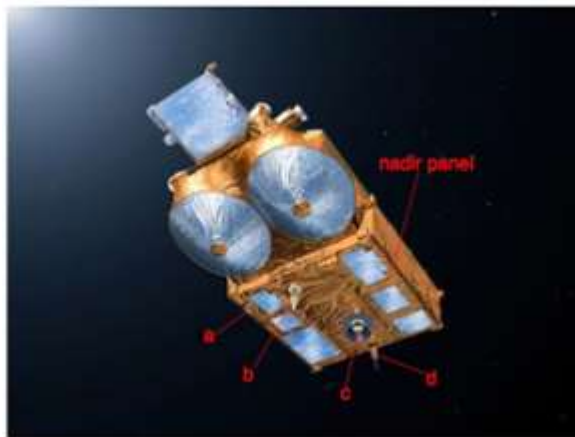
Cryosat-2 membawa radar altimetry yang canggih untuk memenuhi dua tujuan utamanya. Pertama adalah untuk mendapatkan pengukuran teliti dari ketebalan es yang mengambang di lautan sehingga variasi tahunannya dapat dideteksi. Kedua adalah untuk mengamati permukaan dari lapisan es secara akurat untuk mendeteksi perubahan kecil yang terjadi. Radar altimetri pada *Cryosat-2* didasarkan pada *Cryosat-1* dan dengan beberapa tambahan yang didesain untuk menghasilkan pengukuran permukaan es yang lebih baik. Karena pengoperasiannya menggunakan mode *SAR* dan *interferometry*, altimeter yang digunakan disebut dengan *SIRAL* (*SAR Interferometric Radar Altimeter*). *Cryosat-2* berada pada inklinasi orbit yang tinggi sehingga mampu mencapai lintang 88° di utara dan selatan bumi [4][9].

Cryosat-2 akan menghasilkan informasi mengenai ketebalan es yang mengapung di lautan dengan mengukur *freeboard* dari apungan es yaitu tinggi dari ketebalan es yang berada diatas permukaan air. Teknik ini sudah digunakan oleh altimeter *ERS-1*, tetapi instrument ini sama seperti radar altimeter yang lainnya, terhambat oleh resolusi spasialnya yang rendah, yaitu sekitar 5 km. *Cryosat-2* akan mengembangkan kemampuan resolusi spasialnya sampai 250 m pada arah *along-track* dengan menggunakan teknik *Synthetic Aperture*. Misi utama satelit ini adalah mempelajari perubahan cuaca yang terjadi di bumi beberapa waktu terakhir ini, serta mengukur ketebalan permukaan es di Antartika dan Greenland dan beberapa kawasan es lain di Bumi. *Cryosat-2* sebelumnya diberi nama *Srysat*. Pada tahun 2005 satelit ini gagal diluncurkan [4][9].

Tabel 2.1 Informasi Satelit Cryosat 2

Cryosat-2 overview	
Diluncurkan	8 April 2010
Durasi Misi	Minimum 3 tahun
Orbit	LEO, <i>non Sun-synchronous</i>
- Altitude	717 km
- Inclination	92 deg
- Repeat cycles	369 hari dengan 30 hari sub-cycle

- Jumlah Orbit	5344 Orbit / tahun
<i>Payload</i>	<i>SIRAL (SAR/Interferometric Radar Altimeter)</i>
	<i>DORIS receiver</i>
	<i>Laser retrorreflector</i>
	<i>Star-trackers (3)</i>
Masa	720 kg
Dimensi	4.60 x 2.4 x 2.2 m
Penyedia Peluncuran	International Space Company Kosmotras
Peluncur	Russian/Ukrainian <i>Dnepr</i> based on <i>SS-18</i> intercontinental ballistic missile



Gambar 2.1 Gambar ini menjelaskan bagian bagian dari satelit *Cryosat-2* a). Reflektor *SLR* b). *Doris Reciver* untuk penentuan orbit c). Antena *X-Band* d). Antena *S-Band* [9]

Cryosat-2 memantau Bumi dari ketinggian diatas 700 km pada lintang 88°. Satelit ini merupakan tipe *Geodetic Mission* dimana satelit ini akan terus mengorbit mengelilingi bumi. *Cryosat-2* ini memantau perubahan ketebalan lapisan es kutub dan es yang mengapung di laut dengan keakuratan tinggi sehingga dengan kemampuan jangkauan observasi yang lebih luas, satelit ini telah menunjukkan hasil pemahaman yang lebih menyeluruh tentang laju menghilangnya lapisan es di darat dan di laut. Meski semula dirancang untuk lapisan es, kemudian

kemampuannya dikembangkan untuk memantau permukaan danau dan sungai-sungai besar[4][9].

Pengukuran *cryosat-2* akan memiliki 20 kali resolusi spasial 250 meter sampai 5000 meter. Keakuratan pengukuran ketebalan sekitar 10% dari perubahan setahun penuh. Akurasi yang diharapkan dari perubahan ketebalan untuk Arctic laut es 1,6 cm/tahun untuk lapisan es regional tanah 3,3 cm/tahun, untuk lapisan es di Antartika 0.17 cm/tahun [4][9]. Pengolahan/Output ini dibagi menjadi dua kategori:

- Level-1b, yaitu radar gema yang terletak secara geografis, yang mana mencakup perubahan karakteristik alat ukur
- Level-2, yaitu, ketinggian permukaan bumi dan bebas dari es, dengan termasuk perubahan atmosfer dan geofisika

Radar satelit altimetri *Cryosat-2* yang disebut SIRAL, terdiri dari tiga mode operasi yaitu *Low Resolution Mode (LRM)*, *Synthetic Aperture Radar mode (SAR)* dan *Synthetic Aperture Radar interferometer (SARin)*. Mode operasi ini didesain untuk tiga kondisi yang berbeda yaitu laut es, lapisan es yang miring dan permukaan es yang datar. Mode yang terakhir sangat cocok digunakan pada laut terbuka. Pemilihan mode operasi ini berdasarkan keadaan wilayah tersebut, dan juga untuk mode operasi ini dilakukan *update* setiap dua minggu untuk melihat perubahan permukaan es. Produk *Cryosat-2 level-1b* dan *level-2* dirancang untuk memuat data altimeter *LRM* atau *Pseudo-LRM*. Dalam produk *level-1b* terdapat perbedaan antara resolusi rendah (*LRM* dan *Pseudo-LRM*) dan resolusi tinggi (*SAR* dan *SARin*). Parameter level-1b menyediakan data resolusi rendah (*LRM* dan *Pseudo-LRM*) diidentifikasi dengan akhiran “_ku” sedangkan data dengan resolusi tinggi diidentifikasi dengan akhiran “hr_ku”. Pada produk level-2 dan P2P dimana terdapat perbedaan pemrosesan optimal (*LRM*, *SAR* dan *SARin*). Parameter data altimeter dari pemrosesan optimal diidentifikasi dengan akhiran “_ku”. Parameter data altimeter dari pemrosesan *Pseudo-LRM* diidentifikasi dengan akhiran “_plrm_ku” [4][9].

Cryosat-2 Ocean product hadir dengan 8 jenis produk yang berbeda, dibedakan berdasarkan mode (*LRM, SAR, dan SARin*). Peningkatan level dari *level-1b* menjadi *level 2* dan meningkatkan latensi serta akurasi, yang dimulai dari *Near-Real Time Ocean Products (NOP)*, ke produk *Ocean Products (IOP)* dan *Geophysical Ocean Product (GOP)* [5][10]. Produk-produk tersebut dijelaskan seperti berikut:

- *Level-1b* dan *level-2 Near-Real Time (NOP)*: data dikirimkan dengan waktu 3 jam akuisisi data sensing
- *Level-1b* dan *level-2 Intermediate (IOP)*: data dikirimkan dengan waktu 2 sampai 3 hari sesudah akuisisi data sensing terutama karena konsolidasi beberapa data tambahan.
- *Level-2 Intermediate Pole-To-Pole (IOP P2P)*: data dikirimkan dengan latensi yang sama seperti *IOP* dan berisi *LRM, SAR dan SARin level-2 IOP* dengan cakupan setengah orbit.
- *Level-1b* dan *level-2 Geophysical (GOP)*: data dikirimkan dengan waktu 30 hari setelah akuisisi data, terutama karena konsolidasi beberapa data tambahan.
- *Level-2 Geophysical Pole-To-Pole (GOP P2P)*: data dikirimkan dengan latensi yang sama seperti *GOP* dan berisi *LRM, SAR dan SARin level-2 GOP* dengan cakupan setengah orbit.

Data dikumpulkan dan diolah secara berulang dan sistematis, tanpa kemungkinan "*on demand*". Informasi eksternal tentang parameter orbit yang dibutuhkan untuk pengolahan data berasal dari pusat SSALTO , yang dipimpin oleh badan antariksa Perancis CNES . University College London menganalisa data dan bertanggung jawab untuk menciptakan peta distribusi es di lautan dan gletser [4][9].

2.3 Sistem Pengukuran Satelit Altimetri

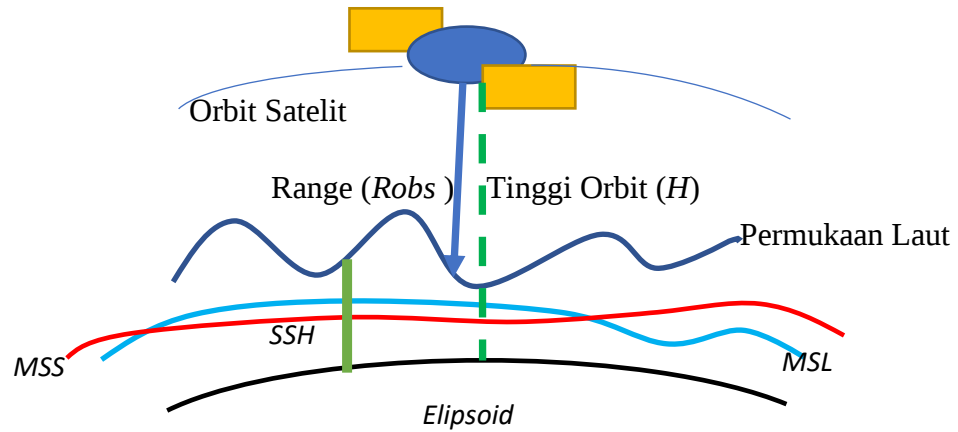
Prinsip satelit altimetri adalah melakukan penentuan jarak dari satelit menuju permukaan laut [11]. Terlihat pada gambar 2.2 satelit altimetri memancarkan pulsa gelombang ke permukaan objek pantulan dibawahnya seperti lautan, daratan, dan permukaan es. Kemudian diterima kembali oleh satelit altimetri.

Nilai jarak pengukuran satelit altimetri tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.1 berikut ini:

$$R_{obs} = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.1)$$

R_{obs} adalah jarak dari satelit ke permukaan laut, Δt adalah selisih waktu pada saat perjalanan dua gelombang yang diamati, dan c adalah cepat rambat gelombang elektromagnetik [12]. Namun, nilai R_{obs} hasil pengukuran satelit altimetri tidak dapat secara langsung digunakan untuk aplikasi oseanografi dan geodesi. Hal tersebut didasari untuk memperoleh nilai tinggi muka laut harus terlebih dahulu dilakukan koreksi dan konversi terhadap bidang referensi, yaitu ellipsoid referensi (ER). Koreksi digunakan untuk meminimalisir perubahan kecepatan gelombang dan penghamburan gelombang dari keadaan laut setempat [13].

Perubahan kecepatan gelombang terjadi akibat keberadaan gas kering terutama oksigen dan nitrogen yang diminimalisir menggunakan koreksi troposfer kering (ΔR_{dry}), uap air yang diminimalisir menggunakan koreksi troposfer basah (ΔR_{wet}), dan elektron bebas berada pada atmosfer yang diminimalisir menggunakan koreksi ionosfer (ΔR_{ion}). Penghamburan gelombang dipengaruhi oleh kondisi angin dan gelombang pada laut setempat, disebut *sea state bias* (ΔR_{ssb}) [13].



Gambar 2.2 Sistem Pengukuran Satelit Altimetri

Hubungan antara nilai jarak pengukuran (R_{obs}) dengan jarak terkoreksi (R_{corr}) ditunjukkan pada persamaan 2.2 berikut,

$$R_{corr} = R_{obs} - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{ion} - \Delta R_{ssb} \quad (2.2)$$

$$SSH = H - R_{corr} \quad (2.3)$$

Nilai tinggi muka air laut diperoleh dari persamaan 2.2, dimana *sea surface height* (SSH) merupakan tinggi muka laut diatas elipsoid referensi, H adalah tinggi orbit yang diperoleh dengan memanfaatkan sensor satelit altimetri yaitu *Dual Frequency Doppler Tracking System (DORIS)* dan *GPS Payload (GPSP) Receiver* [13].

2.4 Hubungan Sea Surface Height, Gravity Anomaly dan Batimetri

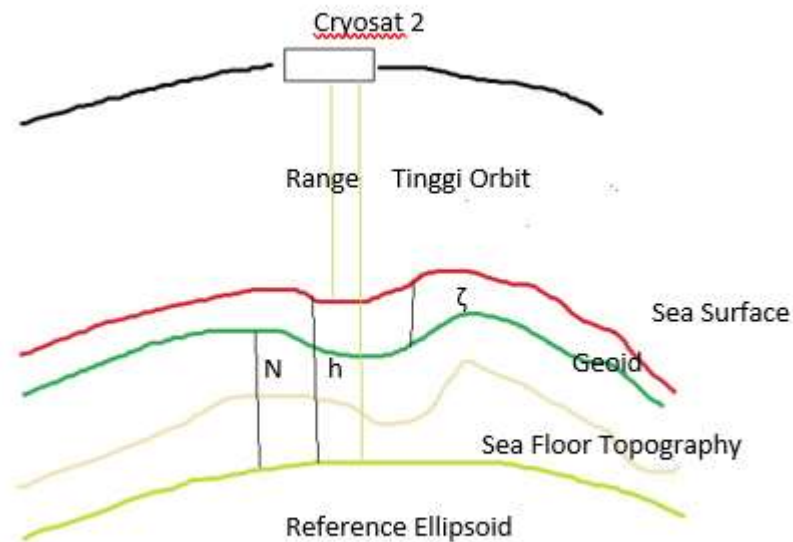
2.4.1 Sea Surface Height

Jarak pengukuran satelit altimetri terhadap *sea surface* dan *retracked* dikoreksi untuk memodelkan kecepatan dari pulsa radar (Kecepatan Cahaya) terhadap atmosfer. Koreksi ini juga memperhitungkan interaksi yang terjadi dengan permukaan laut melalui koreksi keadaan laut [13][14]. Ketinggian dari satelit altimetri ditentukan dari orbit dari satelit yang terreferensi terhadap elipsoid [14]. Ketinggian satelit altimetri dengan jarak yang sudah terkoreksi akan memberikan *sea surface height* relatif terhadap elipsoid seperti yang di tunjukkan pada gambar 2.3.

Formula pada penentuan *sea surface height* dijelaskan seperti berikut:

$$h = N + \zeta + e \quad (2.4)$$

Dimana N adalah tinggi geoid terhadap ellipsoid referensi, ζ adalah variabel waktu dari *sea surface topografi*, dan e adalah error.



Gambar 2.3 Skema prinsip pengukuran satelit altimetri Cryosat 2 untuk memperoleh *sea surface height*. Dimana 1). N adalah undulasi atau tinggi geoid dari ellipsoid, 2). h adalah *sea surface height*, dan 3). ζ adalah *ocean topography*.

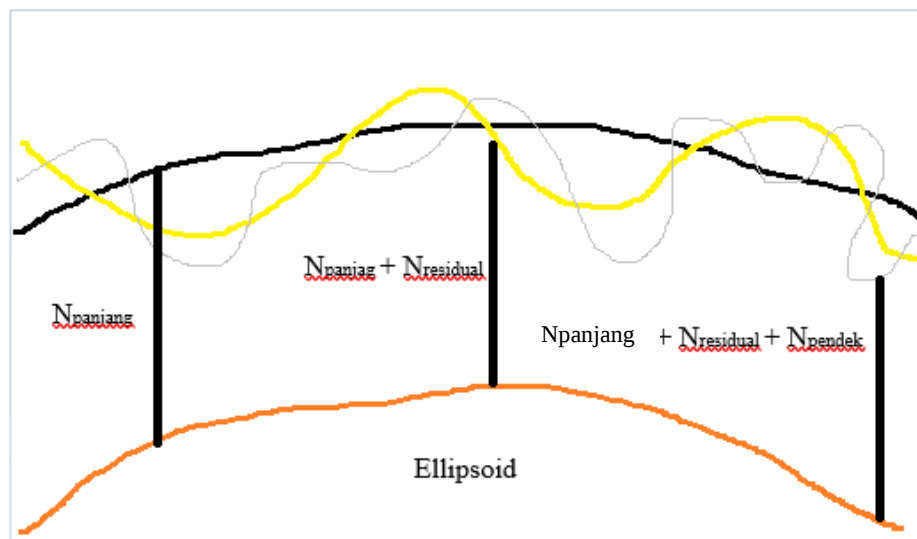
Prinsip satelit altimetri adalah melakukan penentuan jarak dari satelit menuju permukaan laut [15]. Terlihat pada gambar 2.2 satelit altimetri memancarkan pulsa gelombang ke permukaan objek pantulan di bawahnya seperti lautan, daratan, dan permukaan es. Kemudian diterima kembali oleh receiver pada satelit altimetri. Nilai jarak pengukuran satelit altimetri tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.1.

2.4.2 Gravity Anomaly

Remove Compute Restore (RCR) adalah teknik yang digunakan dalam menentukan medan gaya berat. Teknik ini didasarkan pada pemisahan sinyal medan gaya berat menjadi tiga komponen yaitu gelombang panjang, gelombang pendek, dan bagian residual seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.4.

Pada gambar tersebut menjelaskan penambahan tiga gelombang berbeda (N) yang memberikan model geoid yang paling realistis. Setiap komponen N dihitung dari medan gaya berat yang sesuai (Δg) dengan menggunakan rumus Stoke [16]. Penentuan geoid dengan menggunakan data medan gayaberat disebut pemodelan geoid gravimetri.

Langkah pertama dalam Teknik RCR adalah menghitung gradien sepanjang jalur satelit. Yang kedua adalah menghapus gradien referensi dari model medan gayaberat global dan diikuti dengan menghapus outlier. Penghapusan dilakukan dengan menerapkan tes τ seperti yang disebutkan dalam teori Pope [17]. Tahap selanjutnya adalah menghitung residual medan gaya berat. Terdapat dua metode berbeda dalam perhitungan ini, yaitu *Least-Square Collocation* (LSC) dan *Inverse Vening-Meinesz* (IVM). Pada penelitian ini menggunakan metode *Least-Square Collocation* (LSC). Tahap terakhir mengoreksi medan gaya berat dari model medan gaya berat global.



Gambar 2.4 Ilustrasi Geoid terhadap Ellipsoid

$$\left\{ \begin{array}{l} N = N_{\text{panjang}} + N_{\text{residual}} + N_{\text{pendek}} \quad (2.5) \\ \Delta g = \Delta g_{\text{panjang}} + \Delta g_{\text{residual}} + \Delta g_{\text{pendek}} \quad (2.6) \end{array} \right.$$

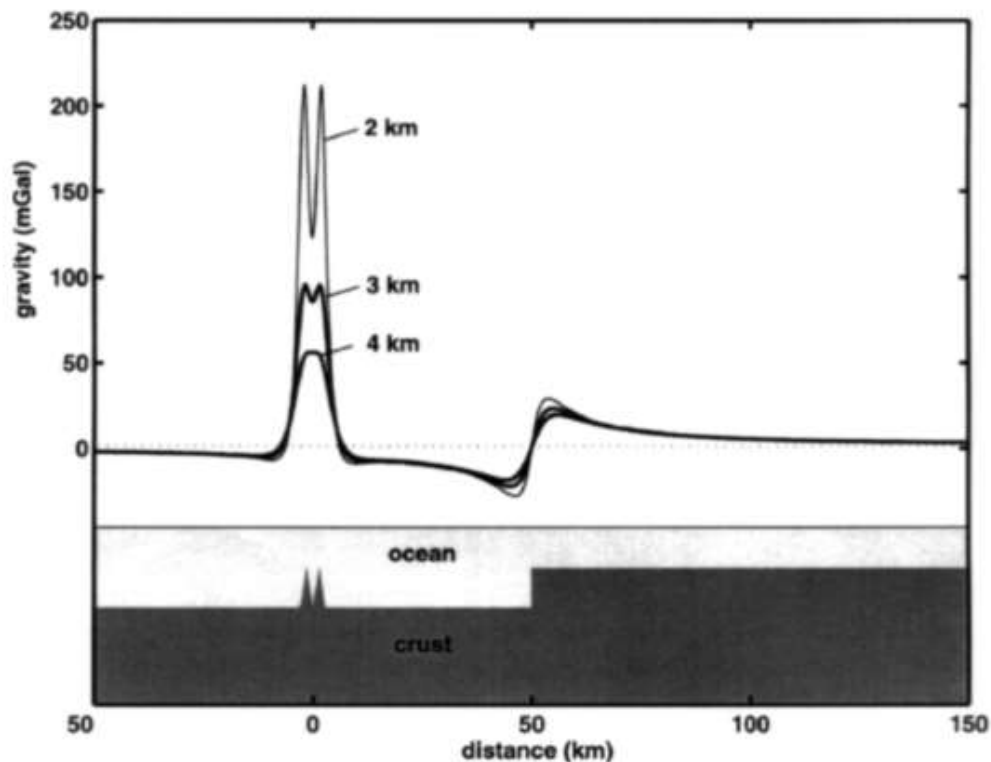
Dengan N adalah Undulasi Geoid, N_{panjang} adalah gelombang panjang komponen dari N , N_{residual} adalah residual komponen dari N , N_{pendek} adalah gelombang pendek komponen dari N , Δg adalah medan gaya berat, $\Delta g_{\text{panjang}}$ adalah gelombang panjang komponen dari Δg , $\Delta g_{\text{residual}}$ adalah residual komponen dari Δg , Δg_{pendek} adalah gelombang pendek komponen dari Δg [15].

2.4.3 Batimetri

Satelit altimetri menggunakan pulsa radar untuk mengukur ketinggian satelit diatas titik permukaan laut. *Retrack* global, ditambah dengan perhitungan dinamis orbit memberikan pengukuran independen ketinggian satelit diatas ellipsoid. Perbedaan antara kedua pengukuran ini sama dengan *sea surface height* dikurangi dengan keterlambatan dalam propagasi radar karena ionosfer dan troposfer. Ada banyak kesalahan dalam pengukuran ini tetapi kebanyakan terjadi pada skala panjang yang lebih besar dari beberapa ratus kilometer [18].

Pada pemodelan medan gayaberat dan estimasi batimetri, sumber kesalahan terbesar adalah kekasaran permukaan laut akibat gelombang laut. Pulsa radar merefleksikan dari area permukaan laut yang meningkat akibat keadaan laut [19]. Superposisi pantulan dari area yang lebih besar ini menstabilkan bentuk gema tetapi juga menyusun gema sehingga waktu nya kurang pasti. Dengan rata-rata banyak gema (1000 Hz) selama beberapa siklus berulang, sehingga akan memperoleh ketelitian 10–20 mm [18]. Pada jarak 4 kilometer yang mana ini berhubungan dengan kesalahan kemiringan permukaan laut sebesar 4 μ rad. Hal ini akan menjadi kesalahan medan gayaberat sebesar 4 mGal. Terdapat suatu proses untuk meningkatkan resolusi dari pengukuran ini yaitu dengan melakukan lebih banyak pengukuran atau atau menghilangkan gelombang laut.

Keadaan ini juga diperparah di lautan dengan kedalaman 4000 meter, dimana medan gaya berat dari dasar Samudra ke permukaan Samudra menyebabkan terjadinya filter *low-pass* yang kuat pada sinyal medan gayaberat tetapi tidak berdampak terhadap noise pada radar. Dengan mempertimbangkan anomali didasar laut dengan panjang gelombang 16 kilometer dan amplitudo 15 mGal (mis, nilai tipikal untuk lautan). Pada keadaan tersebut medan gaya berat di permukaan laut akan berkurang menjadi 3,1 mGal (dijelaskan pada gambar 2.5).



Gambar 2.5 Batasan Dasar pembuatan topografi dari pengukuran gravity anomaly di ilustrasikan oleh seamounts (Kiri) dan plateau (kanan). Penampakan gravity dari kaki gunung yang berjarak dekat (terpisah 4 kilometer dan tinggi 1 kilometer) kuat dan berbeda ketika kedalaman laut rata – rata adalah 2 kilometer atau kurang, tetapi penampakan objek tersebut bergabung dan menjadi lemah ketika kedalaman laut 4 kilometer. Secara isostatis akan menghasilkan efek tepi gravity lokal yang sangat lemah pada jarak 150 kilometer, dengan demikian gravity yang jauh tidak memberikan informasi keseluruhan kedalaman [14].

Sumber kesalahan lainnya termasuk kesalahan model pasang surut, variabilitas samudera, arus laut rata-rata, noise ionosfer, noise troposfer, dan bias elektromagnetik. Koreksi untuk banyak kesalahan ini disimpan dengan data geofisik. Namun untuk koreksi medan gaya berat dan terutama prediksi batimetri tidak semua koreksi relevan atau bahkan berguna. Sebagai contoh koreksi

berdasarkan pada model global yaitu troposfer basah, troposfer kering, ionosfer, dan barometer. Hal ini dikarenakan tidak ada komponen panjang gelombang yang lebih pendek dari 1000 kilometer, dan variasi amplitude kurang dari 1 meter sehingga parameter tersebut tidak mempengaruhi lebih dari 1 μ rad dari error [14].

2.5 Least-Square Collocation (LSC)

Metode *least-square collocation* merupakan suatu metode yang digunakan untuk menghitung medan gaya berat akhir dengan menjumlahkan residual medan gaya berat (Δg_{res}) dan juga menghitung dari medan gaya berat referensi (Δg_{ref}) [20]. Selain *sea surface height* dari pengukuran satelit altimetri, model geopotensial global juga diperlukan sebagai medan gaya berat referensi. Referensi yang digunakan adalah EGM08 untuk derajat 2190. *Sea surface height* dan EGM08 akan memberikan nilai residu gradien geoid (ϵ_{res}). Residu gradien geoid yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung residual medan gaya berat dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\Delta g_{res} = C_{\Delta g \epsilon}^S C_{\Delta g \Delta g}^S \begin{bmatrix} C_{\epsilon \epsilon}^o + D_{\epsilon} & C_{\epsilon \Delta g}^o \\ C_{\Delta g \epsilon}^o & C_{\Delta g \Delta g}^o + D_{\Delta g} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon \\ \Delta g \end{bmatrix} + \Delta g_{ref} \quad (2.7)$$

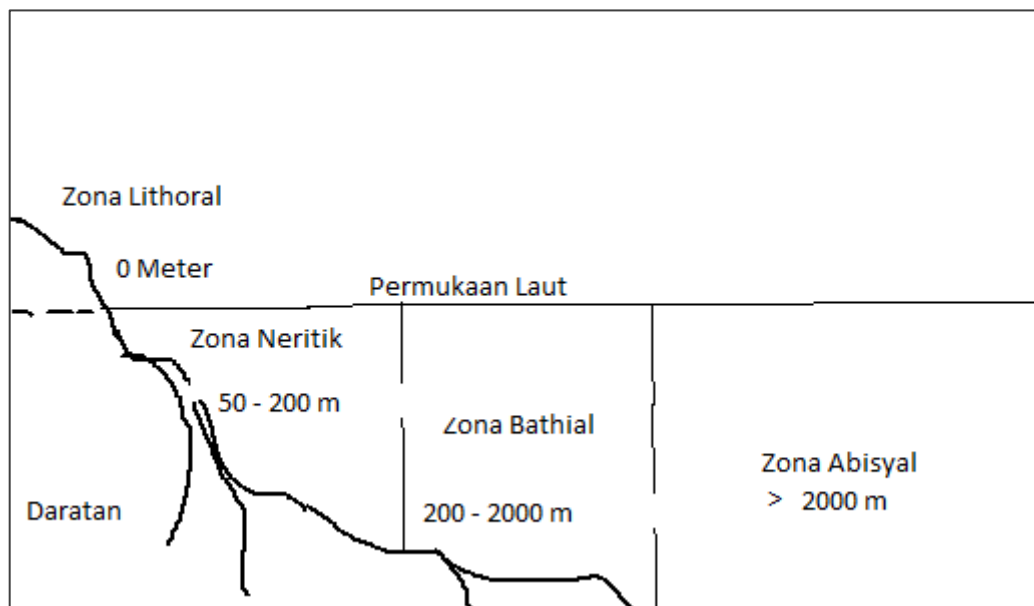
Dengan Δg_{res} adalah vector dari residual medan gaya berat, ϵ_{res} adalah residual gradien geoid, $C_{\Delta g \epsilon}$ adalah medan gaya berat yang diperoleh dari matrik kovariansi residual gradien geoid, $C_{\epsilon \epsilon}$ adalah residual gradien geoid yang diperoleh dari matrik kovariansi residual gradien geoid, $C_{\Delta g \Delta g}$ adalah medan gaya berat yang diperoleh dari matrik kovariansi medan gaya berat D_{ϵ} , D_{ϵ} adalah gangguan dari residual gradien geoid, $D_{\Delta g}$ adalah gangguan dari residual medan gaya berat, Δg_{ref} adalah referensi medan gaya berat [21]. Medan gaya berat akhir diperoleh dengan mengkalkulasikan residual medan gaya berat ke dalam perhitungan yang dihitung dari model medan gayabarat global EGM08.

2.6 Zona Laut Berdasarkan Kedalaman

Berdasarkan kedalaman nya, laut terbagi menjadi beberapa zona kelautan, seperti :

2.6.1 Zona Litoral (Wilayah Pasang Surut)

Zona litoral adalah zona atau wilayah laut yang apabila pada saat terjadi air pasang, wilayah ini akan tergenang oleh air, dan pada saat terjadi air surut, wilayah ini akan mengering dan berubah menjadi pantai seperti yang dijelaskan oleh gambar 2.6. Oleh karena itu lah daerah ini sering disebut wilayah dengan daerah pasang surut [22]



Gambar 2.6 Zonasi Laut

2.6.2 Zona Neritik (Laut Dangkal)

Zona neritic adalah wilayah perairan dangkal yang terletak dekat dengan pantai. Kedalaman dari zona ini adalah dimulai dari titik 0 sampai 50 meter atau 200 meter. Kawasan ini dapat tertembus sinar matahari dengan sangat baik, sehingga menjadikannya sebagai habitat yang sangat cocok bagi berbagai jenis spesies laut seperti Ubur-ubur, Fitoplankton, Zooplankton, Rumpun laut, serta jenis-jenis spesies lainnya [22]. Seperti yang dijelaskan pada gambar 2.6.

2.6.3 Zona Bathial (Laut Dalam)

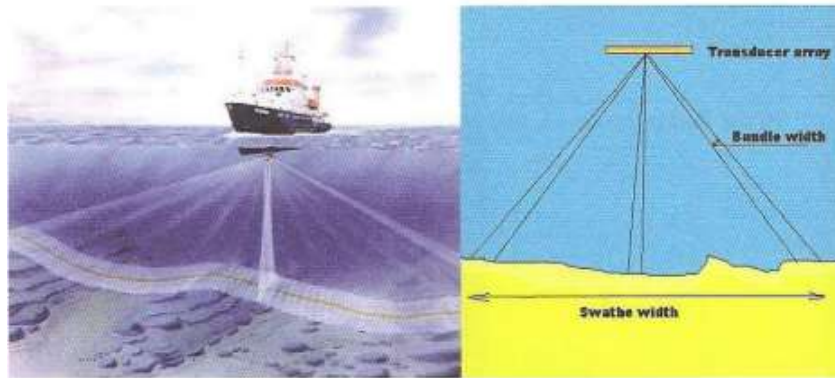
Zona bathyal merupakan wilayah perairan yang memiliki kedalaman yang berkisar antara 200 hingga 2000 meter. Wilayah ini tidak dapat ditembus oleh sinar matahari. Hal tersebutlah yang mengakibatkan sedikitnya jumlah spesies laut [22]. Seperti yang dijelaskan pada gambar 2.6.

2.6.4 Zona Abisal (Laut Sangat Dalam)

Ini merupakan bagian laut yang memiliki kedalaman lebih dari 2000 meter. Wilayah ini memiliki suhu yang sangat dingin. Hal inilah yang menjadikan zona abisal hanya memiliki beberapa spesies bawah laut. Dan di zona ini tidak dapat ditemui spesies tumbuh-tumbuhan laut [22]. Seperti yang dijelaskan pada gambar 2.6.

2.7 Multibeam Echosounder

Multibeam Echosounder (MBES) merupakan salah satu alat yang digunakan dalam proses pemeruman dalam suatu survey hidrografi. Pemeruman (*sounding*) sendiri adalah proses dan aktivitas yang di tunjukkan untuk memperoleh gambaran (model) bentuk permukaan (topografi) dasar perairan (*seabed surface*) [23]. Multibeam echosounder adalah sebuah instrumen yang mampu memetakan lebih dari satu titik lokasi permukaan dasar laut dengan satu kali pancaran sinyal dan menghasilkan resolusi yang lebih baik dari echosounder konvensional [24]. Multibeam echosounder memancarkan beam dengan frekuensi rentang 12-500 kHz. Pola pancarannya melebar dan melintang terhadap badan kapal. Jika kapal bergerak maju maka hasil sapuan multibeam echosounder tersebut akan menghasilkan suatu luasan yang menggambarkan permukaan dasar laut [24].



Gambar 2.7 Prinsip Multibeam Echosounder [24]

Area yang tegak lurus dengan jalur survei ini disebut swath. Dimensi dari swath yang melintang tegak lurus dengan badan kapal disebut dengan swath width, biasanya dimensi ini diukur dalam satuan derajat atau ukuran fisik yang biasanya berubah terhadap kedalaman [24].

Pada Prinsipnya pengukuran multibeam echosounder yang digunakan adalah pengukuran selisih fase pulsa akustik (jenis pengamatan yang digunakan adalah metode pulsa akustik). Untuk teknik pengukuran yang digunakan selisih fase pulsa akustik ini merupakan fungsi dari selisih waktu pemancaran dan penerimaan pulsa akustik serta sudut datang dari sinyal tiap-tiap transduser. Selisih fase pulsa akustik dalam multibeam echosounder artinya sebagai fungsi dari selisih fase waktu pemancaran dan waktu penerimaan. Kemudian perhitungan waktu tempuh dan arah sudut pancaran setiap stave yang ditentukan dari pengukuran selisih fase pulsa multibeam echosounder [24].

2.8 Filter Gaussian

Filter *Gaussian* adalah salah satu filter linier dengan nilai pembobotan untuk setiap anggotanya dipilih berdasarkan bentuk fungsi *Gaussian*. Filter *Gaussian* dipilih sebagai filter penghalusan berdasarkan pertimbangan bahwa filter ini mempunyai pusat karnel.

Filter *Gaussian* sangat baik untuk menghilangkan *noise* yang bersifat sebaran normal [25]. Untuk menghitung atau menentukan nilai-nilai setiap elemen dalam filter penghalus *Gaussian* maka digunakan persamaan 2.8.

$$G(i, f) = c. e^{-\frac{(i-u)^2 + (j-v)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.8)$$

Dengan c dan e adalah konstanta, $G(i, f)$ adalah elemen matriks karnel gauss pada posisi (i, j), u dan v adalah indeks tengah dari matriks karnel gauss, σ adalah deviasi standar dan piksel pada pusat (x, y) dengan bobot terbesar sama dengan 1. Maksimal dari matriks *Gaussian* adalah 5x5.

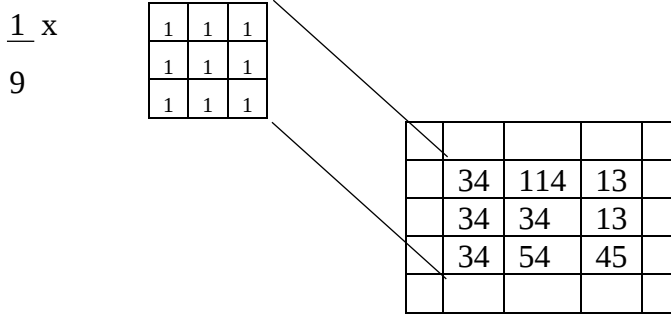
2.9 Resampling Dengan Grdfilter

Grdfilter ini adalah salah satu metode yang dapat digunakan dalam proses resampling suatu data dalam domain waktu tertentu dengan menggunakan salah satu filter isotropic atau persegi panjang konvolusi yang dipilih atau non-konvolusi dan menghitung jarak menggunakan geometri Cartesian atau Spherical. Proses dari pengolahan ini adalah dengan merata-ratakan setiap kotak carnel dengan sebuah model dengan bobot yang sama. Proses ini disebut dengan Boxcar, Cosine ataupun Gaussian, dimana pada proses ini teori oprator linier digunakan. Nilai-nilai ditengah model telah diperbaiki dengan besar sama dengan 1 yang tujuannya untuk memudahkan plot [25].

Salah satu filter linier adalah filter rata-rata dari intensitas pada beberapa pixel lokal dimana setiap pixel akan digantikan nilainya dengan rata-rata dari nilai intensitas pixel tersebut dengan pixel-pixel tetangganya, dan jumlah pixel tetangga yang dilibatkan tergantung pada filter yang dirancang [25]. Secara matematis, hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$h(x,y) = \frac{1}{M} \sum f(k,l) \quad (2.10)$$

Dimana M adalah jumlah pixel pada jendela sebesar N x N



Gambar 2.8 Ilustrasi Penggunaan filter rata-rata berukuran 3x3 pixel

2.10 Selang Kepercayaan

Untuk mengetahui ukuran populasi atau disebut dengan parameter biasanya seorang peneliti mengukurnya tidak secara langsung melainkan mengambil sebagian kecil dari populasi (disebut dengan sampel) kemudian mengukurnya. Kemudian hasil pengukuran sampel tersebut digunakan untuk menduga ukuran sebenarnya. Secara umum parameter yang diduga ialah nilai tengah (mean).

Karena nilai parameter tidak bisa ditentukan kepastiannya 100% maka dikenal selang kepercayaan (*Confidence Interval*) yaitu ukuran yang menunjukkan nilai parameter yang asli berada. Dalam penelitian ini selang kepercayaan yang digunakan adalah selang kepercayaan 95%.

Proses kalkulasi selang kepercayaan dijelaskan pada persamaan 2.10 [26].

$$\bar{X} - z_{\sigma/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + z_{\sigma/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.10)$$

2.11 Metode Deteksi Outlier 2 Sigma

Metode ini adalah salah satu metode yang sering digunakan untuk mengestimasi probabilitas dari suatu populasi. Metode ini juga digunakan sebagai tes sederhana untuk memperoleh outlier jika populasi dianggap normal, dan sebagai tes normalitas jika populasi berpotensi tidak normal. Untuk memperoleh standar deviasi, tahap pertama adalah menghitung penyimpangan, baik kesalahan ataupun

residual tergantung apakah seseorang tahu populasi tersebut. Langkah selanjutnya adalah melakukan standarisasi dengan membaginya terhadap standar deviasi.

Dalam proses perhitungannya terlebih dahulu menghitung penyimpangan dan kemudian membandingkannya dengan frekuensi yang diharapkan. Nilai yang sudah melewati 3 standar deviasi dari nilai normal maka dinyatakan sebagai nilai outlier [27]. Secara umum formulasi yang digunakan dalam proses perhitungan ini dijelaskan pada persamaan 2.11, 2.12, dan 2.13.

$$\mu - 1\sigma \leq X \leq \mu + 1\sigma \quad 2.11$$

$$\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma \quad 2.12$$

$$\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma \quad 2.13$$

Dimana μ adalah nilai rata-rata dari sampel, σ adalah nilai standar deviasi dari sampel.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pengumpulan Data

Sebagaimana yang tercantum dalam diagram alir penelitian gambar 1.2, dimana penelitian ini menggunakan data orbit dan data satelit altimetri *Cryosat 2 geodetic mission* tipe *Geophysical pole-to-pole level 2 (GOP P2P)* sebagai data utama penelitian. Selanjutnya data *EGM 08* yang digunakan untuk pemodelan medan gayabarat, dan data *ETOPO1* yang digunakan sebagai data untuk pemodelan batimetri. Berikutnya adalah *data Multibeam ecosounder* yang digunakan sebagai data validasi dari hasil pemodelan batimetri tersebut.

a. Data Orbit Satelit Altimetri *Cryosat 2*

Orbit satelit *cryosat-2* diunduh pada salah satu *website* resmi penyedia data satelit altimetri *cryosat-2* yaitu *European Space Agency* yang dapat diakses pada alamat web <ftp://calval-pds.cryosat.esa.int/> dalam format *.KMZ file* dan bentuk *.txt file*, format ini dapat dibuka di *Google Earth*. Pemilihan orbit ini disesuaikan terhadap *area of interest* dari penelitian ini yaitu laut bagian barat pulau sumatera yang terdiri dari 50 orbit yang mana spacing antar orbit adalah 7.2 kilometer. Informasi mengenai data orbit dijelaskan pada tabel 1.1. Orbit yang digunakan pada penelitian ini berjenis *ascending* dan *descending*. *Ascending* adalah lintasan satelit yang terbentuk saat satelit bergerak dari bagian selatan bumi dan menuju bagian utara bumi, begitu juga *descending* merupakan suatu lintasan satelit yang terbentuk saat satelit bergerak dari bagian utara bumi menuju bagian selatan bumi.

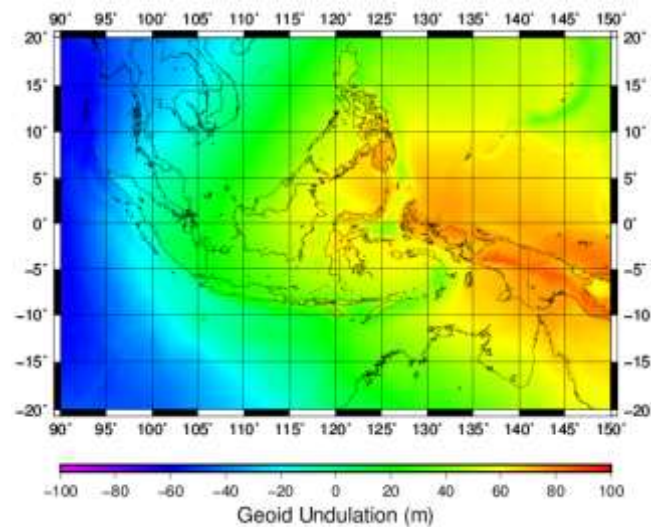
b. Data Satelit Altimetri *Cryosat 2 GOP P2P*

Data satelit altimetri *cryosat 2 GOP P2P* diperoleh dari salah satu *website* resmi penyedia data satelit altimetri *cryosat 2* yaitu *European Space Agency* yang dapat diakses pada alamat web ftp://science-pds.cryosat.esa.int/SIR_GOP_P2P/ dalam format *.NetCDF file*, dimana seluruh data ini diolah menggunakan software *ARCGIS* untuk mengubah *export* format data *.NetCDF.file* menjadi *.txt file* yang kemudian diolah menjadi data *sea surface height* menggunakan *Microsoft Excel*. Untuk data satelit altimetri *cryosat 2* yang digunakan menggunakan data

Geophysical pole-to-pole level 2 (GOP P2P) dengan rentang waktu 4 tahun yang dijelaskan pada tabel 1.1.

c. Data *Earth Gravitational Model (EGM) 2008*

Data *EGM2008* yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *National Geospatial Agency (NGA)*. Data *EGM2008* terdiri atas beberapa data yang nantinya digunakan dalam penentuan *geoid undulation model* dan model medan gayabarat. Data tersebut terdiri dari *coeff_height_and_depth_to2190_DTM 2008 .file*, *egm 2008 .file*, *egm_to 2190_tidefree .file*, dan *Zeta-to-N_to 2160_egm 2008 .file*. Yang nantinya diproses menggunakan *file harmonic_synth_v03.exe* pada *command prompt*. Data ini divisualisasikan pada gambar 3.1.

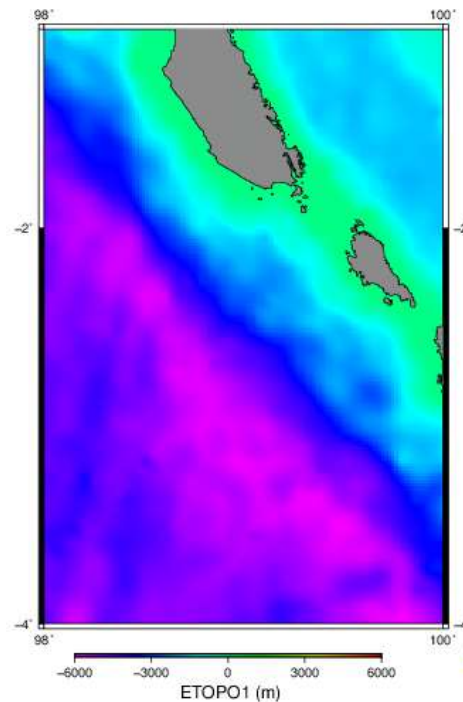


Gambar 3.1 Geoid Undulasi EGM2008 Indonesia

d. Data *ETOPO1*

Data *ETOPO1* yang digunakan pada penelitian ini adalah data yang diperoleh dari website open source *National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)*. Data ini mencakup seluruh wilayah Indonesia dengan resolusi 1 menit dan dalam format *.grd.file*. Data ini adalah model elevasi digital global (*DEM*) dari permukaan bumi yang mencakup topografi daratan dan batimetri laut. Model elevasi digital global ini nantinya digunakan sebagai data untuk memperoleh batimetri yang diperoleh dari medan gayabarat yang diolah sebelumnya

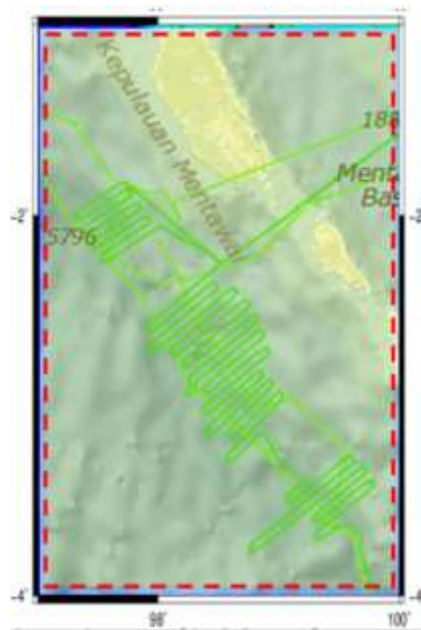
menggunakan data *sea surface height*. Model visualisasi ETOPO1 dijelaskan pada gambar 3.2



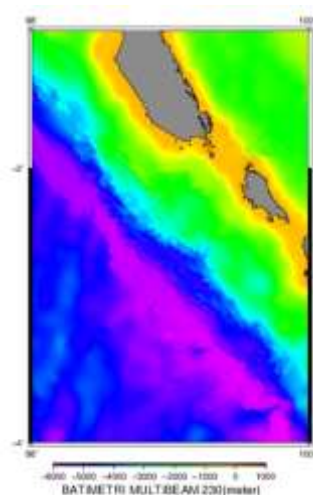
Gambar 3.2 Model ETOPO1 Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

e. Data *Multibeam Echosounder* Resolusi 230 Meter

Data *Multibeam Echosounder* diperoleh dari situs resmi yaitu *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* yang dapat di akses pada situs <https://www.ngdc.noaa.gov/maps/autogrid/> dalam format *.txt.file*. Data yang diperoleh adalah data *Multibeam Echosounder* Kongsberg EM302 dan EM710 yang sudah *auto grid* atau terkoreksi. Rentang waktu pengambilan data sounding tersebut adalah 1 bulan, yang dilakukan pada 23 mei 2015 sampai 22 juni 2015. Data *Multibeam Echosounder* ini memiliki resolusi spatial sebesar 230 meter, namun dilakukan penurunan resolusi menjadi 5 menit atau 9.25 kilometer, dimana tujuannya adalah untuk menyetarakan resolusi estimasi batimetri *Multibeam Echosounder* dengan estimasi batimetri dari satelit altimetri *Cryosat-2*. Data tersebut divisualisasikan pada gambar 3.3 dan 3.4.



Gambar 3.3 Peta Cakupan Multibeam Echosounder

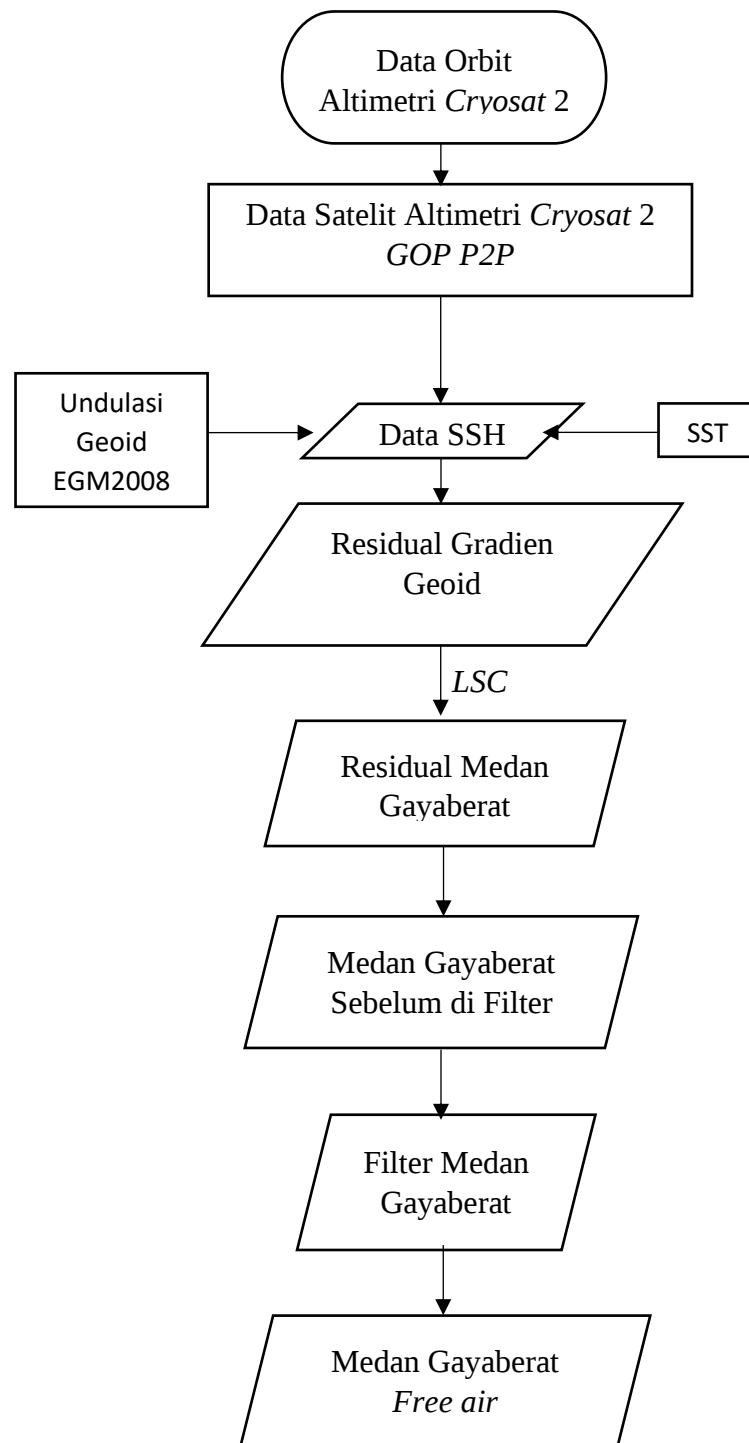


Gambar 3.4 Batimetri hasil Auto Grid yang diperoleh dari *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*

3.2 Pengolahan Data

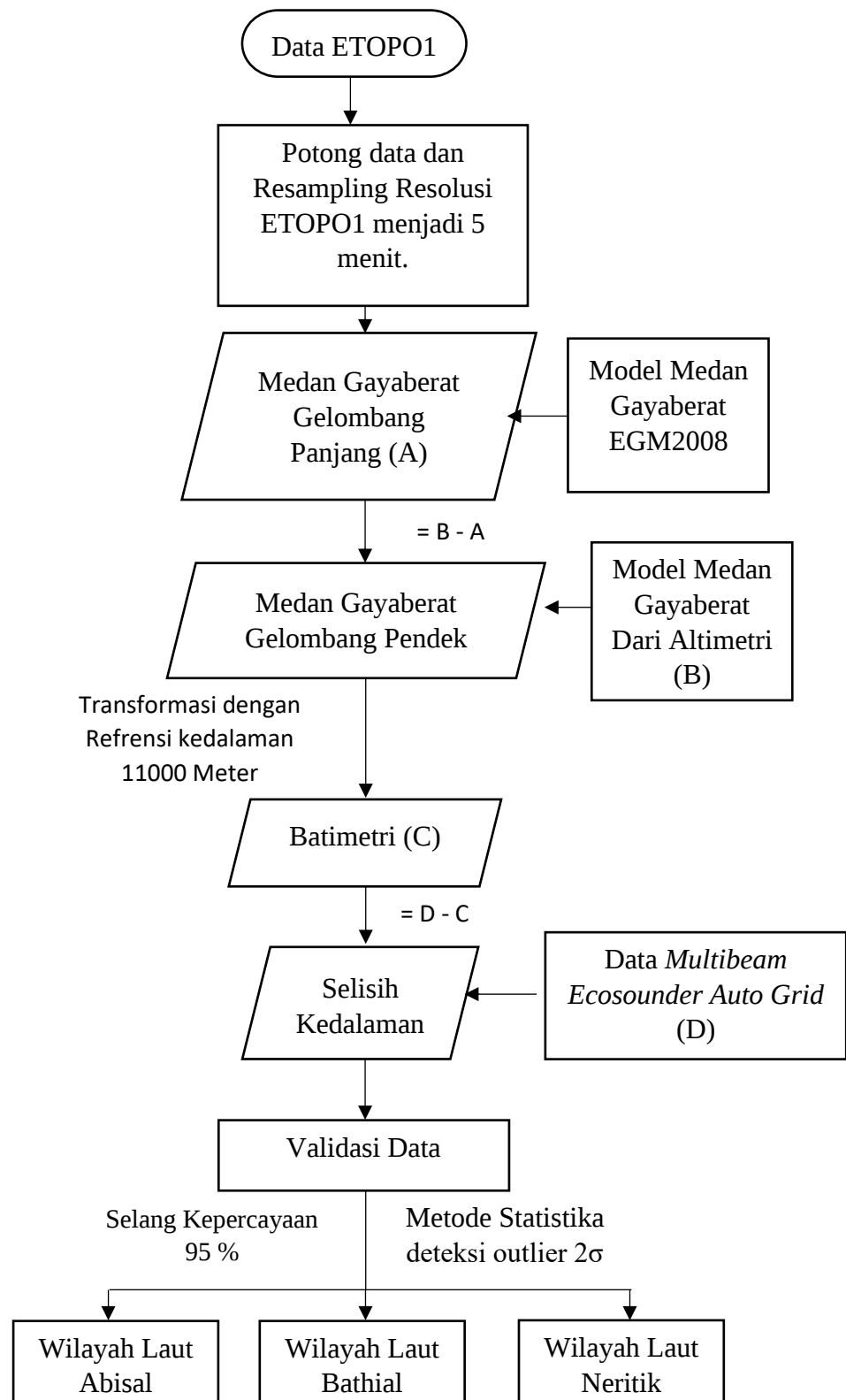
Data yang telah diperoleh pada subbab 3.1 selanjutnya dilakukan pengolahan data. Bentuk pengolahan data dalam penelitian ini secara garis besar terdiri dari pengolahan medan gayaberat *free air*, dan pengolahan medan gayaberat *free air* menjadi batimetri. Proses pengolahan data ditunjukkan pada gambar 3.3 dan 3.4 dibawah ini.

A. Pengolahan Medan Gaya Berat



Gambar 3.5 Diagram Pengolahan Medan Gayaberat

B. Pemodelan Medan Gaya Berat Menjadi Batimetri



Gambar 3.6 Diagram Pengolahan Medan Gayaberat Menjadi Batimetri

3.2.1 Pengolahan Gravity Anomali

Pada dasarnya pengolahan medan gayaberat ini bertujuan untuk memperoleh perbedaan yang terjadi antara medan gayaberat terhadap geoid dan medan gayaberat terhadap ellipsoid [28]. Pengolahan ini membutuhkan beberapa variabel dalam perhitungannya, dimana variabel tersebut terdiri dari *sea surface height*, residual gradien geoid, dan residual gravity anomaly. Proses pengolahan variabel-variabel tersebut dijelaskan seperti berikut :

a. Pengolahan Data *Sea Surface Height*

Pengolahan ini merupakan tahap awal dalam pengolahan medan gayaberat menggunakan data satelit altimetri. Pada pengolahan ini terdapat beberapa variabel yang digunakan untuk memperoleh nilai *sea surface height* yang dijelaskan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variabel data *GOP P2P*

No	Nama	Deskripsi
1	<i>lat_01</i>	Latitude pada 1Hz
2	<i>lon_01</i>	Longitude pada 1Hz
3	<i>range_ocean_01_ku</i>	Rentang lautan yang di amati
4	<i>sea_state_bias_01_ku</i>	Koreksi empiris terhadap gelombang signifikan
5	<i>iono_corr_gim_01</i>	Dilakukan untuk memperbaiki keterlambatan pulsa radar yang disebabkan oleh elektron bebas dan ionosfer
6	<i>mod_dry_tropo_cor_01</i>	Dilakukan untuk memperbaiki keterlambatan pulsa radar yang disebabkan oleh gas kering di atmosfer
7	<i>mod_wet_tropo_cor_01</i>	Dilakukan untuk memperbaiki keterlambatan pulsa radar yang disebabkan oleh komponen H2O di atmosfer

8	<i>solid_earth_tide_01</i>	Untuk menghilangkan distorsi pasang surut lokal pada kerak bumi
9	<i>alt_01</i>	Tingkat ketinggian sesaat berubah seiring waktu
10	<i>ocean_tide_sol1_01</i>	Untuk menghilangkan distorsi terhadap kerak bumi yang disebabkan oleh meningkatnya berat lautan saat air pasang naik
11	<i>pole_tide_01, dan</i>	Untuk menghilangkan distorsi terhadap pasang surut laut
12	<i>inv_bar_cor_01.</i>	Untuk menghilangkan tekanan terhadap permukaan laut yang disebabkan barometer lokal

Tahapan pengolahan *sea surface height* dilakukan sebagai berikut :

- 1) Melakukan proses convert data *cryosat 2 GOP P2P* dengan format *.NetCDF.file* menjadi data dengan format *.txt.file*. Dalam proses *convert* tersebut dilakukan seleksi variabel-variabel yang dibutuhkan untuk pengolahan *sea surface height* dijelaskan pada tabel 3.1.
- 2) Variabel-variabel yang ada kemudian diproses menggunakan persamaan 3.1 dan 3.2 seperti berikut:

$$CR = (range_ocean_01_ku) - (sea_state_bias_01_ku (iono_corr_gim_01) - (mod_dry_tropo_cor_01) - (mod_wet_tropo_cor_01)) \quad (3.1)$$

$$SSH = (alt_01) - (CR) - (solid_earth_tide_01) - (ocean_tide_sol1_01) - (pole_tide_01) - (inv_bar_cor_01) \quad (3.2)$$

- 3) Nilai *sea surface height* (SSH) yang diperoleh nantinya akan dikonversi untuk memperoleh model medan gayabarat pada tahap berikutnya

b. Pengolahan Residual Gradien Geoid

Nilai *sea surface high* yang sudah diperoleh kemudian diolah terhadap data *geoid undulation model EGM08* dan *sea surface topografi (SST)* dengan menggunakan *threshold 25%*. Pengolahan ini bertujuan untuk menghapus refrensi geoid dan menghitung residual sepanjang jalur. Nilai *residual gradient geoid* diperoleh dengan menggunakan pendekatan statistik *Spherical formula*. Dimana data yang nantinya ingin diperoleh adalah gradien geoid, azimuth dari gradien geoid, dan standar deviasi dari geoid gradien [29]. Tahapan-tahapan yang dilakukan untuk memperoleh data- data tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Nilai residual gradien geoid dan nilai azimuth gradien diawali dengan menghitung rata-rata radius gauss pada rata-rata latitude [20][21]. Untuk menghitung rata-rata latitude dengan persamaan 3.3 berikut ini :

$$\text{Lat rata-rata} = (\text{lat (i)} + \text{lat (i-1)}) \times 0.5 \times 0.017453292 \quad (3.3)$$

Dimana nilai 0.017453292 rad. adalah nilai 1 derajat saat dikonfirmasi menjadi radian.

Pada tahap ini latitude dan longitude dikonversi menjadi bentuk radian [20][21]. Proses perhitungan ini dijelaskan pada persamaan 3.4 dan 3.5 berikut:

$$\text{Lat} = (\text{lat (i)} - \text{lat (i-1)}) \times 0.017453292 \quad (3.4)$$

$$\text{Lon} = (\text{lon (i)} - \text{lon (i-1)}) \times \cos (\text{Lat rata-rata}) \times 0.017453292 \quad (3.5)$$

Berikutnya adalah menghitung gradien geoid dengan menggunakan pendekatan formula *spherical distance* [20][21]. Proses ini dijelaskan pada persamaan 3.6 berikut :

$$\text{Sperical Distance} = ((\text{lat}^2 + \text{lon}^2) \times (6371000 \text{ meter}))^{1/2} \quad (3.6)$$

Proses terakhir adalah menghitung azimuth gradien geoid [14]. Perhitungan ini dijelaskan pada persamaan 3.7 berikut :

$$\text{Az (i-1)} = \arctan (\text{lon} , \text{lat}) \quad (3.7)$$

- 2) Proses perhitungan standar deviasi dari gradien geoid dijelaskan pada persamaan 3.8 seperti berikut :

$$Gstd(k) = \frac{((err(i+1))^2 + err(i)^2)^{1/2}}{Diff \times \rho} \quad (3.8)$$

Dimana Gstd adalah standar deviasi dari groid gradien, err adalah standar deviasi dari panjang *track sea surface height*, Diff adalah panjang track, i adalah banyak jumlah data err, dan rho adalah nilai 206264.8062 [20][21].

Script dan tahap pengolahan ini dapat dilihat pada lampiran A.

c. Pengolahan Data Residual Medan Gayaberat (LSC)

Pada pengolahan ini menggunakan nilai dari residual gradien geoid, dimana nilai dari residual gradien geoid digunakan untuk memperoleh nilai residual medan gayaberat. Pada perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan metode *least square collocation (LSC)*. Proses perhitungan untuk memperoleh nilai dari residual medan gayaberat dijelaskan pada persamaan 2.7.

Dalam proses penentuan nilai medan gayaberat dibutuhkan 3 komponen utama yang terdiri dari gelombang pendek yaitu hasil pengukuran secara langsung yang dalam penelitian ini menggunakan data altimetri yang diolah menjadi data *sea surface height*, gelombang panjang yaitu model medan gayaberat, dan yang terakhir adalah gelombang menengah hasil kalkulasi komponen gelombang pendek dan panjang. Komponen-komponen tersebut kalkulasi dengan pendekatan matematis dimana hasil dari proses tersebut kemudian akan menghasilkan nilai medan gayaberat *free air*. Script dan tahap pengolahan ini dapat dilihat pada lampiran A.

d. Filtering Medan Gayaberat

Nilai medan gayaberat yang sudah diperoleh kemudian difilter, dimana tujuannya untuk menghilangkan *noise* yang terdistribusi dari hasil gravity anomaly *free air*. Proses ini dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan *spherical distance* dimana pada perhitungan ini memfokuskan terhadap nilai latitude dan

longitude sebagai komponen utama perhitungan [20][21]. Proses perhitungan ini dijelaskan pada persamaan 3.9.

$$SD = 6371000 \times \cos^{-1} (\sin (\text{lat} (i) \times 0.017453292) \times \sin (\text{lat} (i-1) \times 0.017453292) + \cos (\text{lat} (i) \times 0.017453292) \times \cos (\text{lat} (i-1) \times 0.017453292) \times \cos ((\text{lon} (i) - \text{lon} (i-1)) \times 0.017453292)) \quad (3.9)$$

Dimana SD adalah *spherical distance*, 6371000 adalah nilai jari-jari bumi, dan 0.017453292 adalah nilai 1 derajat dikonversi menjadi radian. Script dan tahap pengolahan ini dapat dilihat pada lampiran A.

3.2.2 Pengolahan Batimetri

Nilai medan gayaberat *free air* yang diperoleh kemudian akan ditransformasi menjadi sebuah estimasi batimetri. Pada proses pengolahan ini digunakan beberapa data tambahan yaitu data *ETOPO1* dengan resolusi 5 menit dan model medan gayaberat global dari *EGM2008*. Tahapan dalam pengolahan model batimetri ini terdiri dari proses pemotongan data dan resampling data *ETOPO1*, pengolahan medan gayaberat gelombang panjang, pengolahan medan gayaberat gelombang pendek dan pengolahan model batimetri. Tahapan ini akan dijelaskan pada bagaian selanjutnya.

a. Pemotongan Data Dan Resampling

Pengolahan yang dilakukan pada bagian ini adalah pemotongan data dan *resampling*. Data yang digunakan pada pengolahan ini adalah data model relief global dengan resolusi 1 menit (*ETOPO1*). Tujuan dilakukannya pemotongan data model relief global dan *resampling* pada pengolahan ini adalah untuk membatasi wilayah yang digunakan pada model agar sesuai dengan *area of interest*, dan mengubah resolusi spasial dari model relief global yang digunakan.

Proses *resampling* ini dikalkulasikan menggunakan metode *Gaussian* atau dengan menggunakan formula *spherical distance* dimana komponen yang menjadi parameter utama adalah longitude dan latitude [20][21]. Proses perhitungan dapat dilihat pada persamaan 3.9.

b. Pengolahan Medan Gayaberat Gelombang Panjang

Pada pengolahan ini digunakan dua variabel untuk memperoleh medan gayaberat gelombang panjang. Variabel itu terdiri dari nilai model relief global (*ETOPO1*) yang sudah dipotong sesuai cakupan wilayah penelitian dan juga sudah diresampling menjadi data resolusi spasial 5 menit, kemudian selanjutnya adalah data model medan gayaberat global *EGM2008*. Pada pengolahan ini digunakan referensi kedalaman laut maksimal sebesar 11000 meter [20][21]. Perhitungan pada pengolahan ini menggunakan pendekatan sistematis yang dijelaskan pada persamaan 3.10.

$$LGA = h_1 - ((-1 \times h_2) - 6000) \times 2 \times \pi \times \rho \times 0.006627 \quad (3.10)$$

Dimana LGA adalah medan gayaberat gelombang panjang, h_1 adalah nilai medan gayaberat setiap titik, h_2 adalah data kedalaman dari model relief setiap titik, ρ adalah konstanta ketetapan dengan nilai 1.64, nilai 6000 adalah konstanta ketetapan, 0.006627 adalah nilai eksentrisitas.

Script dan tahap untuk pengolahan medan gaya berat gelombang panjang ini akan dijelaskan pada lampiran A.

c. Pengolahan Medan Gayaberat Gelombang Pendek

Terdapat 2 variabel yang dibutuhkan untuk pengolahan nilai medan gayaberat gelombang pendek. Variabel yang dibutuhkan terdiri dari nilai medan gayaberat gelombang panjang, dan medan gayaberat *free air*. Proses perhitungan ini dilakukan dengan mengkalkulasikan nilai kedalaman setiap titik dengan menggunakan pendekatan sistematis [20][21].

Pengolahan ini dijelaskan pada persamaan 3.11.

$$Sga = h2_{(i)} - h1_{(i)} \quad (3.11)$$

Dimana $h1_{(i)}$ adalah nilai kedalaman pada medan gayaberat gelombang panjang setiap titik, dan $h2_{(i)}$ adalah nilai medan gayaberat *free air* setiap titik. Script dan tahap pengolahan medan gayaberat gelombang pendek ini akan dijelaskan pada lampiran A

d. Estimasi Batimetri

Nilai dari medan gayaberat gelombang pendek kemudian ditransformasi menjadi estimasi batimetri. Pada proses estimasi ini digunakan referensi kedalam 11000 meter. Perhitungan pada proses estimasi ini menggunakan metode pendekatan sistematis, dimana nilai kedalaman ($h_{Sga(i)}$) pada setiap titik medan gayaberat gelombang pendek direduksi untuk mendapatkan nilai kedalaman estimasi sebenarnya [20][21]. Proses perhitungan tersebut dijelaskan pada persamaan 3.12.

$$H = \frac{(-1 \times h_{Sga(i)})}{(2 \times \pi \times \rho \times 0.006627) - rh} \quad (3.12)$$

Dimana H adalah nilai kedalaman setiap titik hasil estimasi batimetri, ($h_{Sga(i)}$) adalah nilai kedalaman setiap titik dari medan gayaberat gelombang pendek, rh adalah konstanta dengan nilai 6000, 0.006627 adalah nilai eksentrisitas, ρ adalah konstanta dengan nilai 1.64, dan π adalah konstanta dengan nilai 3.14.

3.2.3 Proses Validasi Data Batimetri

a. Selisih Nilai Kedalaman Dari Model Batimetri

Hasil model estimasi batimetri yang diperoleh dari data satelit altimetri *Cryosat-2* kemudian dikalkulasikan terhadap model batimetri yang diperoleh dari data *Multibeam Echosounder*. Tujuannya adalah untuk memperoleh selisih nilai kedalaman dari dua model batimetri tersebut. Selisih yang diperoleh kemudian dibandingkan berdasarkan zona kedalaman, yang bertujuan untuk melihat zona kedalaman yang paling besar mengakibatkan selisih kedalaman kedua model batimetri tersebut. Proses perbandingan tersebut dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan statistika selang kepercayaan 95% dan metode deteksi *outlier* 2σ .

b. Selang Kepercayaan 95% Dan Metode Deteksi Outlier 2 Sigma

Metode pendekatan ini dilakukan untuk melihat berapa persen data sampel yang berada dalam rentang toleransi dan berapa banyak data outlier dari hasil perkiraan pada setiap zona, dimana tujuannya adalah untuk melihat keakuratan hasil

estimasi batimetri yang diperoleh dari satelit altimetri *Cryosat-2*. Pada proses pengolahan data ini dibutuhkan beberapa parameter, dimana parameter tersebut terdiri dari nilai rata-rata sampel atau populasi, standar deviasi dari sampel atau populasi, dan nilai *convidence level*. Formulasi perhitungan ini dapat dilihat pada persamaan 2.9, 2.10, 2.11, 2.12.

c. Proses Validasi Estimasi Batimetri Berdasarkan Zona Kedalaman

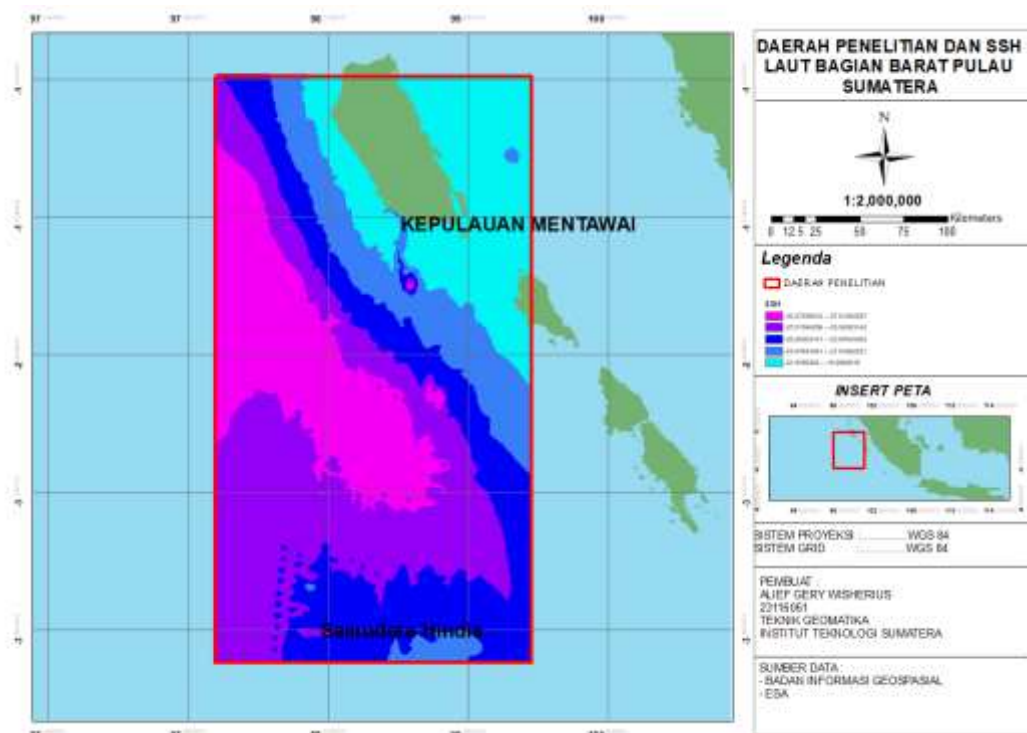
Proses validasi estimasi batimetri pada penelitian ini dilakukan dengan melakukan validasi estimasi batimetri dari satelit altimetri *Cryosat-2* terhadap estimasi batimetri hasil dari pengukuran konvensional menggunakan data *Multibeam Echosounder*. Pada tahap ini proses validasi estimasi batimetri berfokus terhadap hasil estimasi kedalaman (*depht*) yang diperoleh dari kedua metode pengukuran tersebut. Proses validasi hasil estimasi batimetri ini dilakukan pada empat wilayah zona kedalaman yaitu hasil estimasi batimetri pada wilayah keseluruhan, hasil estimasi batimetri pada wilayah laut zona sangat dalam (Abisal), hasil estimasi batimetri pada wilayah laut zona dalam (Bathial), dan hasil estimasi batimetri pada wilayah laut zona dangkal (Neritik) [6].

BAB IV

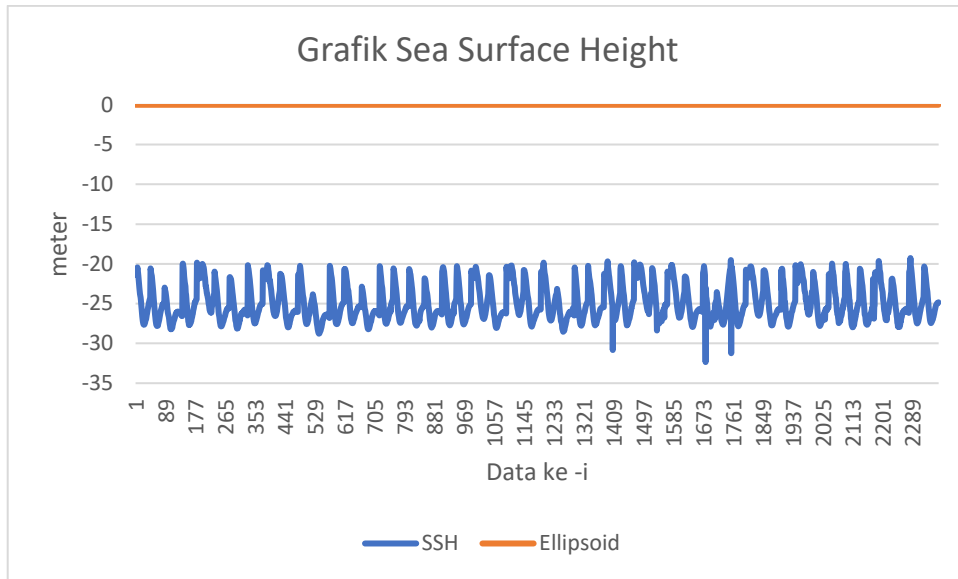
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Sea Surface Height Satelit di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera

Hasil yang diperoleh dari pengolahan *sea surface height* dimodelkan seperti pada gambar 4.1 dan 4.2. Proses pengolahan *sea surface height* menggunakan data satelit *cryosat-2* tipe *GOP P2P*, dimana hasil yang diperoleh memiliki nilai *sea surface height* yang relatif tidak terlalu jauh berbeda. Dari model tersebut diperoleh *sea surface height* yang memiliki nilai fluktuatif, mulai dari yang terbesar adalah -32.3 meter sampai dengan -19.3 meter. Secara keseluruhan hasil yang diperoleh relatif tidak jauh berbeda, dimana nilai rata-rata *sea surface height* pada wilayah penelitian ini adalah -24.8 meter. Dari nilai *sea surface height* yang berada pada rentang nilai negative, maka dapat diartikan bahwa *sea surface* berada dibawah model ellipsoid.

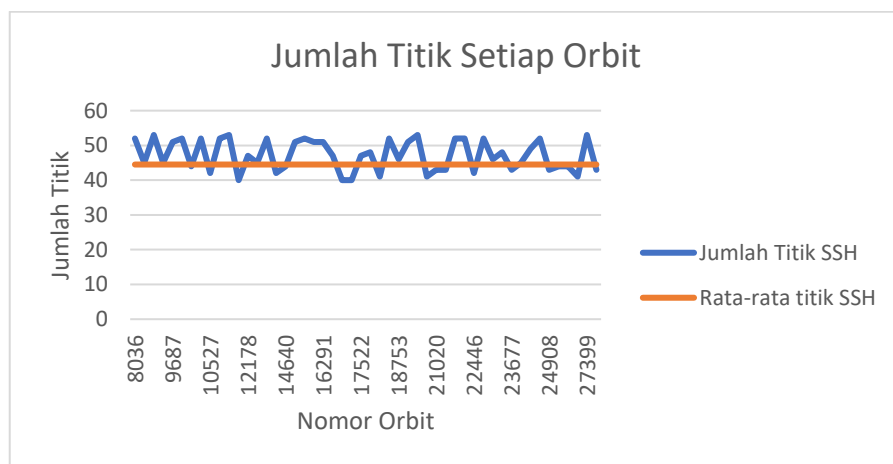


Gambar 4.1 Model Nilai *Sea Surface Hight* di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera



Gambar 4.2 Grafik Profil *Sea Surface Height* di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Hasil model *sea surface* tersebut diperoleh dengan menggunakan 2366 titik *sea surface height*, dan terdiri dari 50 orbit dengan rentang waktu pengamatan selama empat tahun seperti dijelaskan pada gambar 4.3. Secara keseluruhan jumlah titik yang digunakan pada pengolahan *sea surface height* pada wilayah laut bagian barat pulau sumatera adalah 44 titik pada setiap orbit. Nilai *sea surface height* yang berada pada titik *cross over point* tidak sejajar, sehingga tahap selanjutnya adalah mensejajarkan *cross over point* tersebut hingga menjadi nilai residual gradien geoid.



Gambar 4.3 Jumlah Titik Pada Tiap Orbit di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

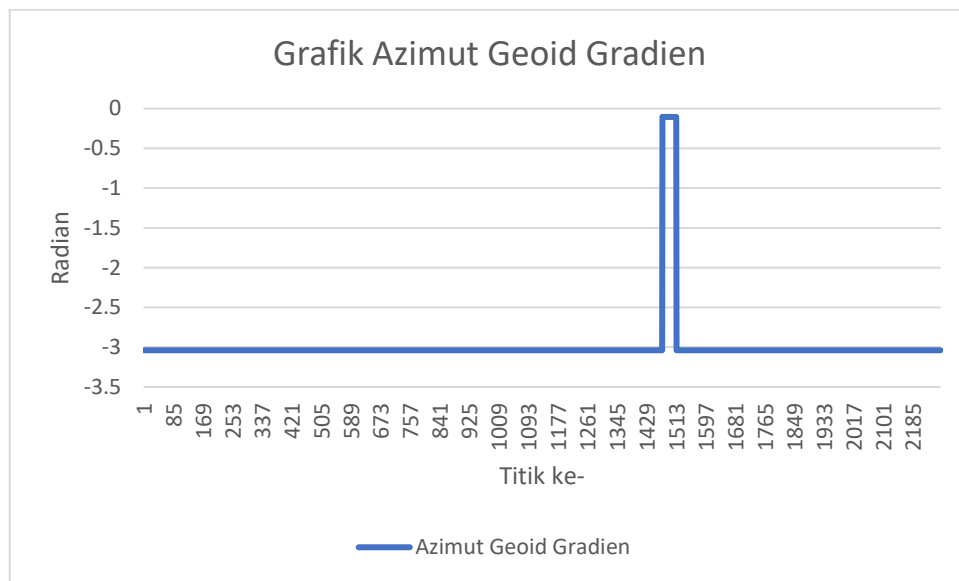
Tabel 4.1 Jumlah Titik Pada Setiap Orbit

Nomor Orbit	Jumlah Titik	Nomor Orbit	Jumlah Titik
8036	52	18333	41
8065	45	18724	52
8485	53	18753	46
9296	45	19144	51
9687	51	19173	53
9716	52	19564	41
10107	44	21020	43
10136	50	21215	43
10527	42	21606	52
10977	52	21635	52
11367	53	22446	42
11758	40	22837	52
12178	47	22866	46
13409	45	23257	48
13829	52	23677	43
14220	42	24097	45
14640	44	24488	49
15031	51	24517	52
15060	52	24908	43
16262	51	25328	44
16291	51	26139	44
16682	47	26559	41
16711	52	27399	53
17102	40	-	42
17522	47		
17913	48		

4.2 Bentuk Residual Gradien Geoid Di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera

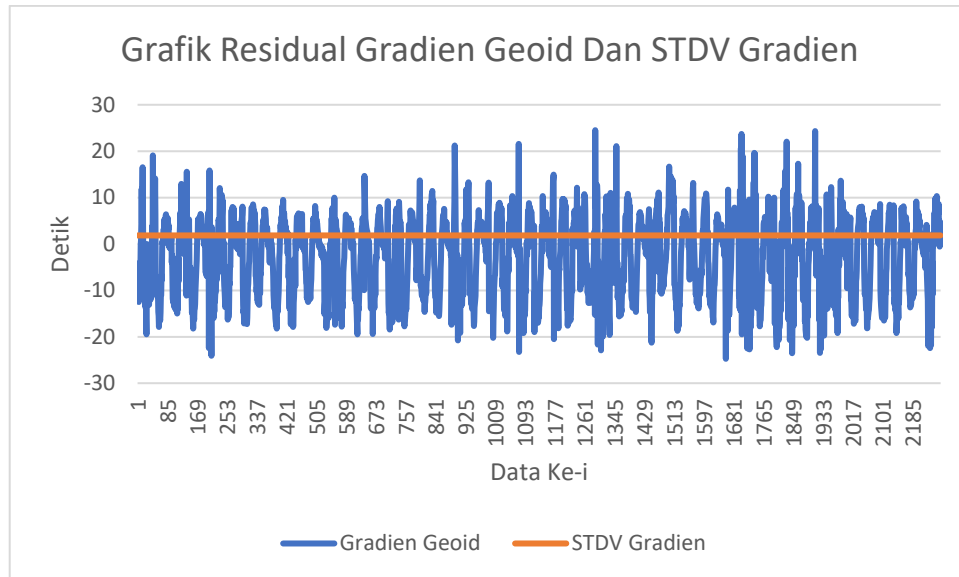
Dari hasil *sea surface height* yang sudah diperoleh, selanjutnya digunakan untuk memperoleh residual gradien geoid, azimuth gradien geoid dan standart deviasi dari geoid gradient. Pada dasarnya proses ini dilakukan untuk menghilangkan atau secara umum disebut *remove*, dimana maksud dari proses ini adalah untuk menghilangkan pengaruh topografi dan pengaruh komponen gelombang panjang dari data medan gayabarat *free air* [30].

Seperti yang dijelaskan pada gambar 4.5, dapat dilihat bahwa nilai dari gradien geoid yang diperoleh memiliki nilai yang fluktuatif dengan nilai residual gradien geoid berada pada rentang kemiringan 24.5 detik sampai -24.7 detik. Dapat dilihat dari pada gambar 4.4, bahwa pada wilayah penelitian ini diperoleh azimuth geoid gradient, yang mana nilai dari setiap titik relatif sama yaitu -3 radian, namun terjadi perubahan nilai pada titik 1429 sampai 1513 dengan nilai -0.103 radian. Perubahan ini terjadi akibat terdapat beberapa data satelit yang tidak terkoreksi troposfer.



Gambar 4.4 Azimut Geoid Gradien

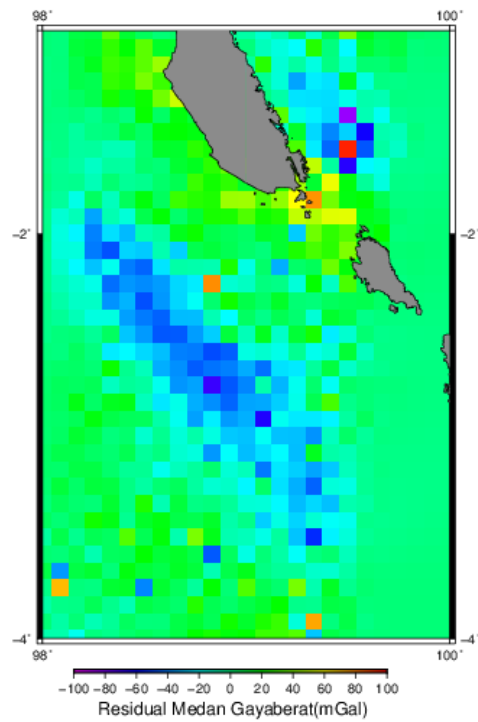
Hasil yang diperoleh dari pengolahan residual gradien geoid dijelaskan pada gambar 4.5. Dari hasil yang diperoleh nilai dari standart deviasi gradien geoid yang diperoleh untuk setiap titik menghasilkan nilai standart deviasi gradien geoid 1.8 detik. Residual gradien geoid yang diperoleh pada penelitian ini disebabkan oleh lempengan Litosfer yang bersubduksi di dalam mantel yang merupakan bagian dari geoid dinamis, sisa dari proses yang terjadi yang mengakibatkan terdapat residual geoid [30].



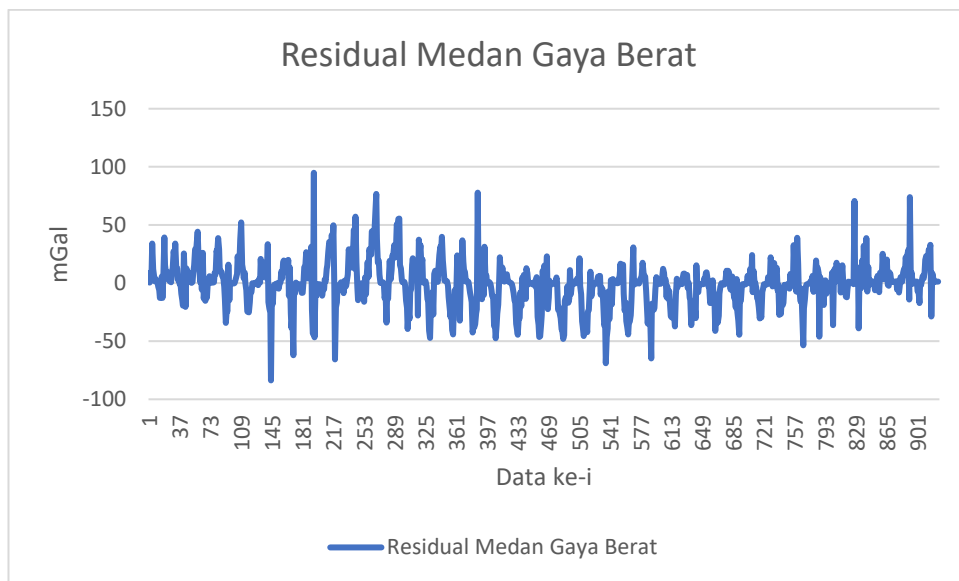
Gambar 4.5 Grafik Residual Gradien Geoid atau Defleksi Vertikal di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

4.3 Bentuk Residual Medan Gayaberat di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera

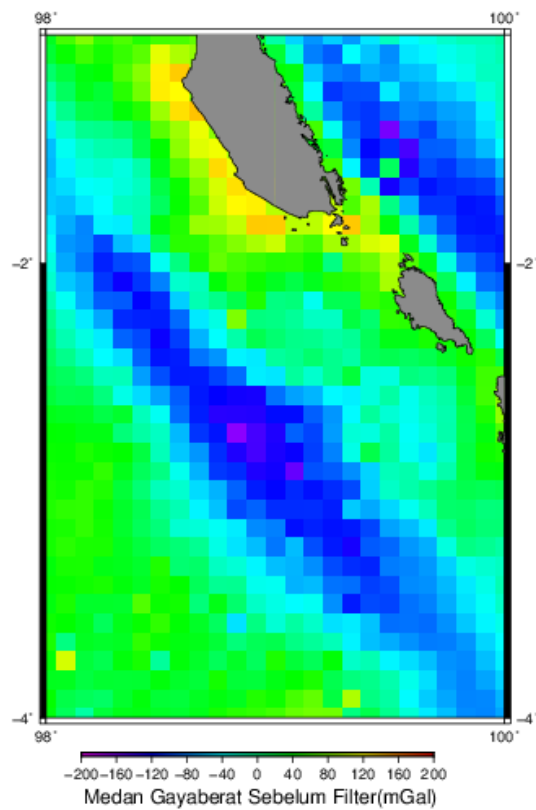
Bentuk residual medan gayaberat adalah suatu model medan gayaberat yang sudah tidak lagi dipengaruhi atau sudah terbebas dari efek-efek lain baik itu faktor yang diakibatkan secara local atau pun global. Pada dasarnya proses ini dilakukan untuk menjumlahkan kembali atau *restore* nilai gaya berat residual yang sudah diolah menjadi residual gradien geoid dengan geoid komponen gelombang panjang dan komponen gelombang pendek (pengaruh topografi). Pada pengolahan residual medan gayaberat pada penelitian ini diperoleh nilai medan gayaberat yang bervariasi dengan persebaran nilai tertinggi 95 mGal dan terendah -83 mGal. Model dari medan gayaberat penelitian ini dijelaskan pada gambar 4.6 dan 4.7.



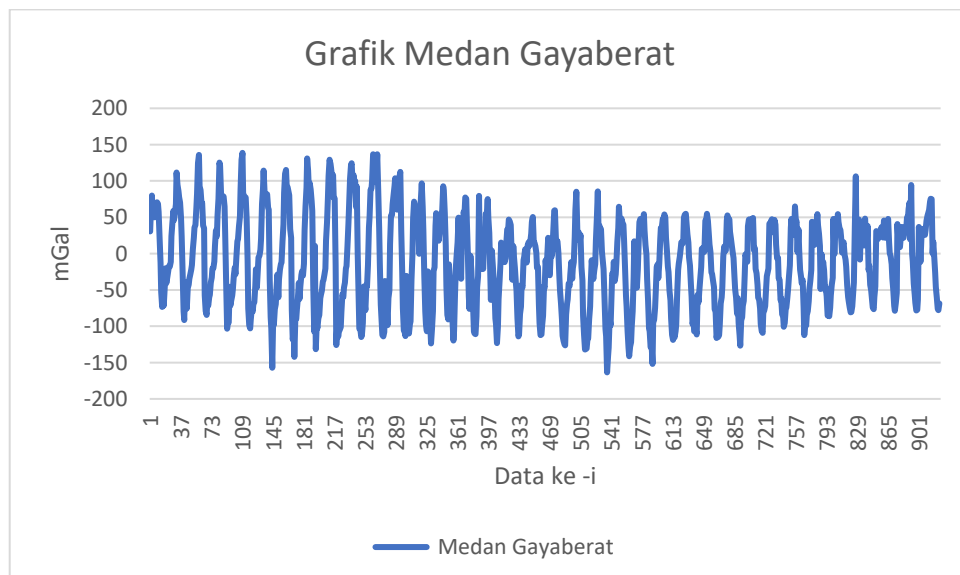
Gambar 4.6 Residual Medan Gayaberat di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera



Gambar 4.7 Grafik Residual Medan Gayaberat Setiap Titik di Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera



Gambar 4.8 Medan Gayaberat Hasil Penjumlahan Gelombang Panjang, Residual dan Pendek



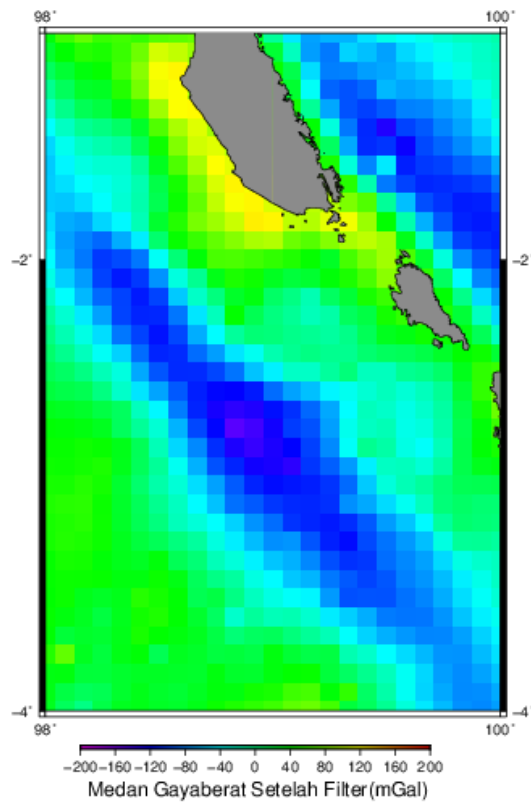
Gambar 4.9 Grafik Medan Gayaberat Setiap Titik dari Hasil Penjumlahan Gelombang Panjang, Menengah dan Pendek

Nilai residual medan gayaberat akan digunakan sebagai komponen untuk memperoleh medan gayaberat total. Medan gayaberat total tersebut dijelaskan pada gambar 4.8 dan gambar 4.9. Dari penjumlahan ini menghasilkan nilai medan gaya berat yang beragam dimana nilai terbesar adalah 138 mGal dan yang terendah adalah -163 mGal. Nilai-nilai tersebut menjelaskan keadaan medan gayaberat pada wilayah ini sangat beragam.

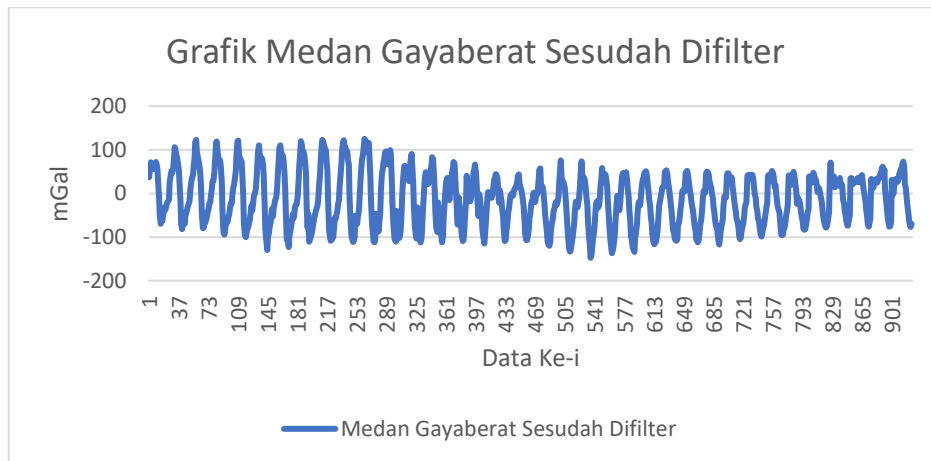
Dari beberapa studi literatur disebutkan bahwa medan gayaberat dihasilkan dari penjumlahan 3 komponen gelombang, yang mana masing-masing gelombang tersebut adalah gelombang panjang (model medan gayaberat EGM068), gelombang pendek (*sea surface high*), dan gelombang menengah (residual medan gayaberat). Hasil penjumlahan ketiga komponen tersebut nantinya akan menghasilkan medan gayaberat, namun medan gayaberat yang dihasilkan masih memiliki *noise*. *Noise* pada medan gayaberat yang diperoleh kemudian difilter menggunakan metode gaussian untuk menghilangkan *noise* yang terdistribusi [31].

4.4 Model Medan Gayaberat Setelah Dikoreksi di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera

Nilai medan gayaberat yang diperoleh kemudian difilter agar menghilangkan *noise* yang ada. Dari hasil koreksi diperoleh model medan gayaberat yang memiliki nilai bervariasi, dimana nilai dari medan gaya berat untuk wilayah penelitian ini berada pada rentang 125 mGal sampai -147 mGal, dijelaskan pada gambar 4.10 dan 4.11. Terjadi perubahan nilai medan gaya berat akibat filtering yang dilakukan dimana untuk gravity anomali sebelum difilter berada pada rentang 138 mGal sampai -163 mGal. Dari hasil pengolahan tersebut dapat dilihat terjadi penambahan nilai medan gaya berat akibat filtering dimana untuk nilai batas atas medan gaya berat berkurang 13 mGal, dan untuk nilai medan gaya berat pada batas bawah berkurang - 16 mGal. Hasil yang diperoleh ini adalah hasil medan gayaberat *free air* yang nantinya akan ditransformasi menjadi estimasi batimetri pada perairan bagian Barat Pulau Sumatera.



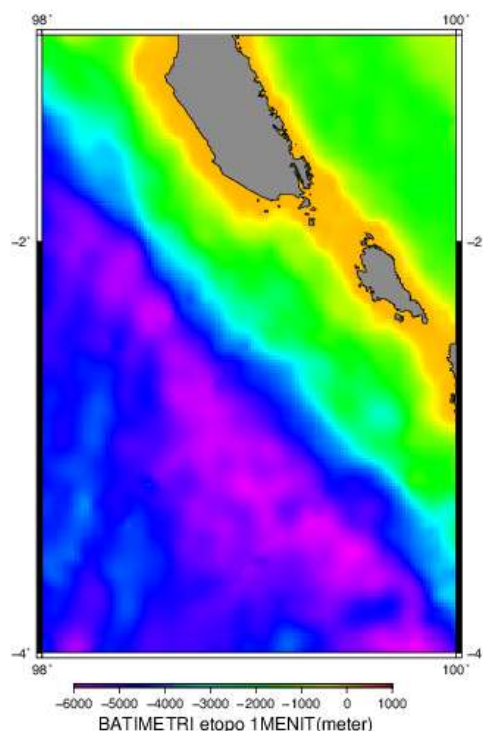
Gambar 4.10 Medan Gayaberat Hasil Filter Di Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera



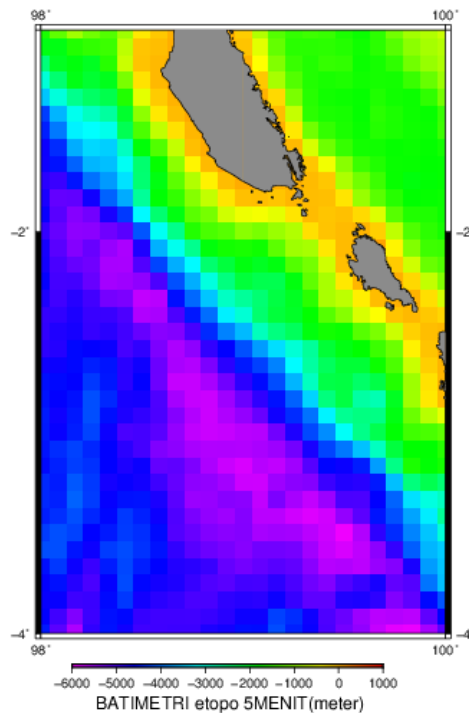
Gambar 4.11 Grafik Medan Gayaberat Hasil Filter Pada Perairan Bagian Barat Pulau Sumatera

4.5 Model ETOPO1 Hasil *Cut* dan *Filtering* di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Model ETOPO1 pada penelitian ini digunakan sebagai referensi bentuk topografi dan referensi kedalaman dalam proses pemodelan batimetri pada penelitian ini. Proses pemotongan atau *cutting* pada referensi bentuk topografi dan kedalaman dilakukan sesuai dengan cakupan wilayah penelitian ini. Hasil pemotongan atau *cutting* model referensi ini dijelaskan pada gambar 4.12. Dari hasil model referensi yang telah dipotong didapatkan nilai kedalaman yang bervariasi dengan jumlah titik kedalaman berjumlah 21091 titik. Interval kedalaman yang diperoleh dari model referensi berada pada nilai -5945 meter sampai 0 meter, dengan rata-rata kedalaman dari model referensi adalah -3104 meter. Pada proses pemodelan ini dibutuhkan resolusi yang sama terhadap data medan gaya berat *free air*, sehingga dilakukanlah proses *resampling* untuk menyetarakan resolusi dari ETOPO1 terhadap medan gaya berat. Hasil filtering ini dijelaskan pada gambar 4.13.



Gambar 4.12 Model ETOPO1 Hasil *Cutting* Pada Wilayah Periran Bagian Barat Pulau Sumatera



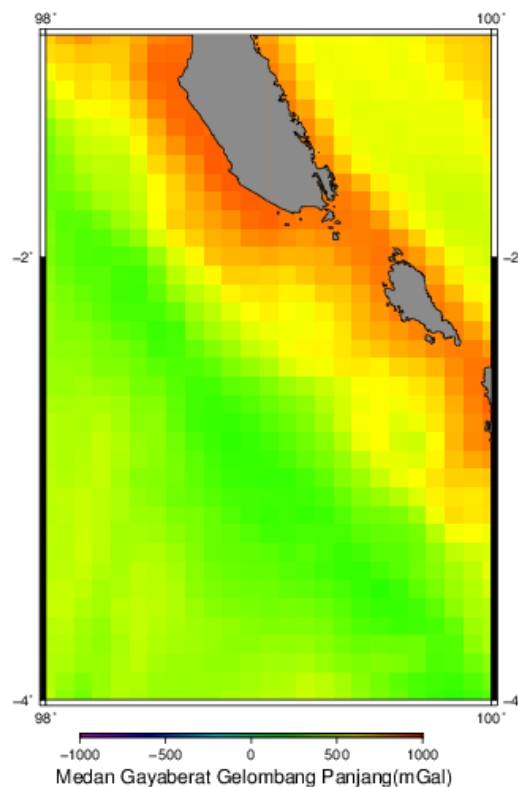
Gambar 4.13 Model ETOPO1 Hasil *Filtering* Pada Wilayah Periran Bagian Barat Pulau Sumatera

Dari hasil resampling yang dilakukan, diperoleh nilai resolusi spasial dari model ETOPO1 ini adalah 5 menit atau 9.25 kilometer. Model ETOPO1 hasil resampling ini memiliki kedalaman yang bervariasi dengan rentang kedalaman berada pada -5909 sampai 0 meter, dan dengan rata-rata kedalaman -3098 meter. Dari hasil yang diperoleh terdapat perubahan-perubahan nilai akibat penyetaraan resolusi, dimana jika dilihat dari nilai rata-rata yang diperoleh maka terjadi perubahan kedalaman 6 meter. Hasil model referensi yang sudah diresampling nantinya akan digunakan untuk memperoleh medan gayaberat gelombang panjang.

4.6 Bentuk Medan Gayaberat Gelombang Panjang di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Pada dasarnya untuk memperoleh model batimetri pada penelitian ini dibutuhkan proses *remove* dan *restore*. Pada tahap ini proses yang dilakukan adalah *remove*, dimana pengaruh topografi terhadap gelombang panjang dihilangkan dan nantinya dikembalikan lagi atau disebut dengan *restore* pada akhir proses hitungan [32].

Pada pengolahan ini diperoleh hasil seperti yang dijelaskan pada gambar 4.14. Secara keseluruhan hasil dari medan gayaberat gelombang panjang berada pada rentang nilai 857 mGal sampai 265 mGal. Untuk tahap selanjutnya adalah tahap *restore*, pada tahap ini dibutuhkan nilai komponen gelombang pendek dalam pengolahannya.

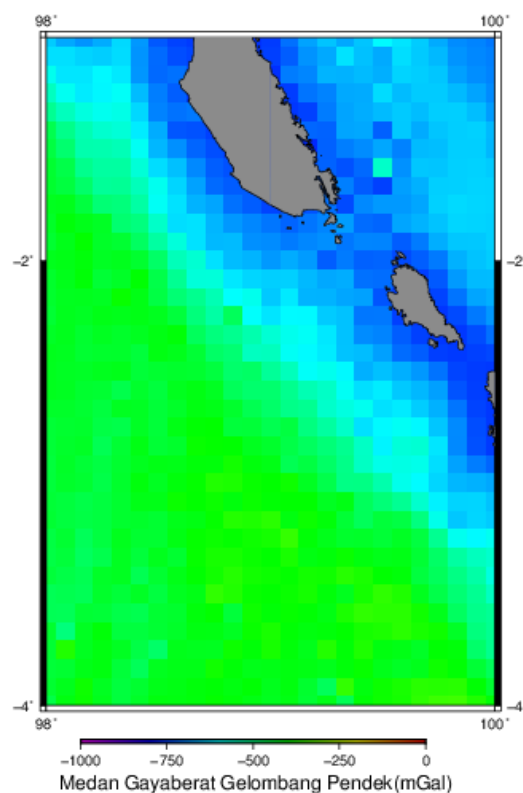


Gambar 4.14 Model medan gayaberat gelombang panjang

4.7 Bentuk Medan Gayaberat Gelombang Pendek di Perairan Wilayah Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Medan gayaberat gelombang pendek adalah suatu model medan gayaberat yang dipengaruhi oleh topografi [33]. Secara umum komponen medan gayaberat gelombang pendek pada pemodelan geoid menunjukkan bentuk permukaan atau terrain dari suatu wilayah dengan nilai interval yang rapat [34]. Hasil yang diperoleh dari pengolahan ini dijelaskan pada gambar 4.15. Pada tahap ini nilai medan gaya berat gelombang panjang dikalkulasi dengan model medan gayaberat

free air. Dari model tersebut diperoleh nilai medan gayaberat yang bervariasi yang berada pada rentang -769 mGal sampai -350 mGal. Dari pengolahan ini terlihat perubahan nilai medan gayaberat yang diperoleh dari medan gayaberat gelombang panjang sebelumnya, dimana perubahan ini terjadi akibat proses kalkulasi komponen medan gayaberat gelombang panjang terhadap medan gayaberat *free air*. Proses pemodelan batimetri dilakukan dengan merubah nilai medan gayaberat gelombang pendek menjadi nilai kedalaman, dimana dalam proses perubahannya dilakukan dengan menjumlahkan nilai medan gayaberat gelombang pendek terhadap referensi kedalaman.



Gambar 4.15 Model medan gayaberat gelombang pendek

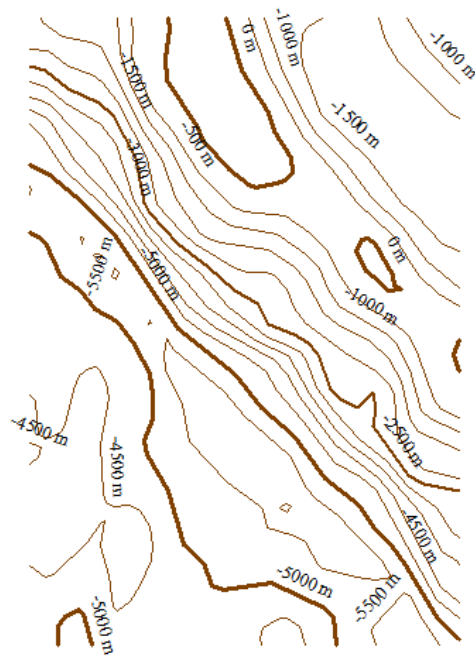
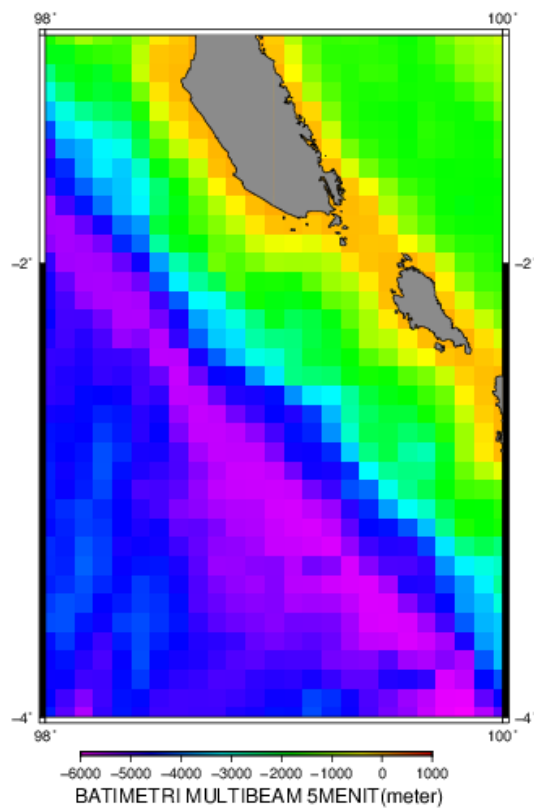
4.8 Model Batimetri Laut Bagian Barat Pulau Sumatera

Model medan gayaberat gelombang pendek kemudian ditransformasi menjadi estimasi batimetri dengan referensi kedalaman maksimal 11000 meter. Hasil dari proses tersebut menghasilkan nilai estimasi batimetri pada wilayah laut bagian Barat Pulau Sumatera. Sehingga pada wilayah penelitian ini diperoleh 2 hasil estimasi batimetri. Model estimasi batimetri tersebut terdiri dari estimasi batimetri hasil

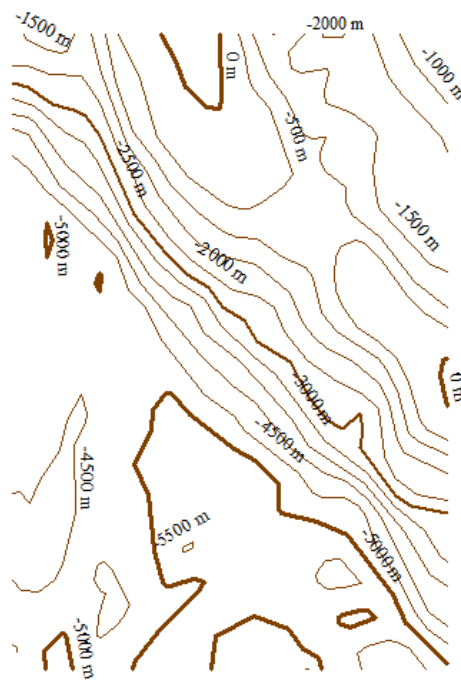
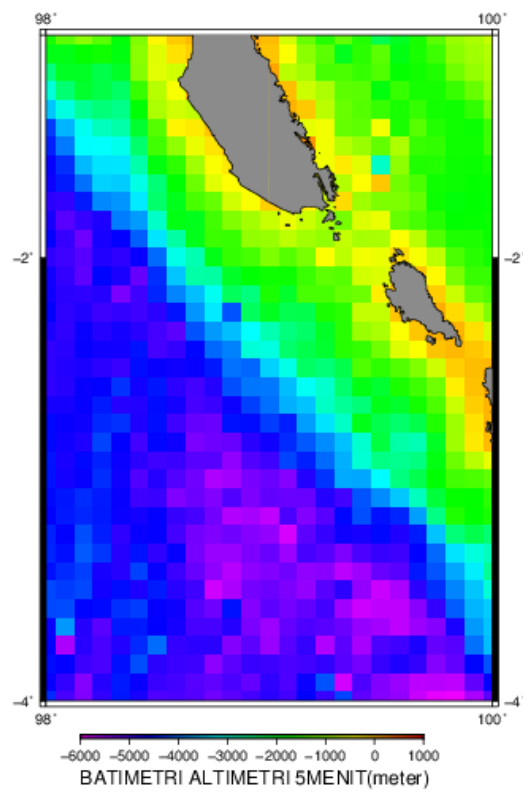
pemodelan menggunakan data satelit altimetri *Cryosat-2* dan estimasi batimetri hasil dari pengukuran *Multibeam Echosounder*. Hasil estimasi batimetri dengan menggunakan data satelit altimetri *Cryosat-2* ini dijelaskan pada gambar 4.17, kemudian untuk estimasi batimetri menggunakan data *Multibeam Echosounder* dijelaskan pada gambar 4.16. Dari kedua estimasi batimetri yang digunakan diperoleh nilai kedalaman, dimana untuk nilai rata-rata kedalaman dari metode penginderaan jauh dengan media satelit altimetri *Cryosat-2* adalah -3087 meter dan rata-rata nilai kedalaman metode akustik dengan media *Multibeam Echosounder* adalah -3103 meter, dengan kedalaman maksimum untuk media satelit altimetri *Cryosat-2* adalah -5942 meter dan untuk metode akustik *Multibeam Echosounder* adalah -5902 meter. Dapat dilihat dari hasil yang diperoleh, terdapat perbedaan hasil kedalaman estimasi batimetri. Perbedaan tersebut akan dijelaskan pada tahap proses validasi yang mana akan dibagi menjadi tiga zona kedalaman.

Tabel 4.2. Tabel Informasi Model Batimetri

No	Metode	Jumlah Titik	Kedalaman Max (Meter)	Rata-Rata Kedalaman (Meter)
1	Altimetri Cryosat 2	925	-5942	-3087
2	Multibeam Echosounder	925	-5902	-3103



Gambar 4.16 Peta Model Batimetri Multibeam Dan Kontur

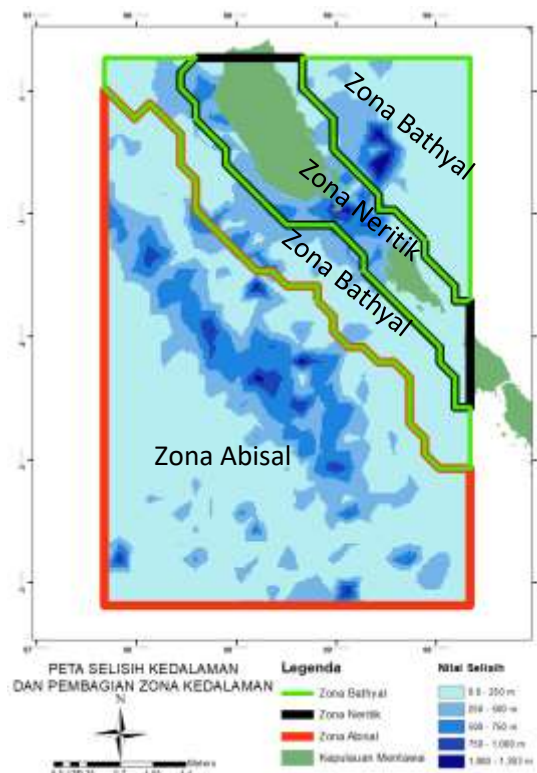


Gambar 4.17 Peta Model Batimetri Dengan Metode Altimetri dan Kontur

4.9 Proses Validasi Estimasi Batimetri

4.9.1 Selisih Nilai Kedalaman Batimetri Dari Altimetri dan Multibeam

Estimasi batimetri yang diperoleh dari pengolahan data satelit altimetri *Cryosat-2* dikalkulasikan terhadap model batimetri yang diperoleh menggunakan metode akustik *Multibeam Echosounder*. Hasil kalkulasi tersebut menghasilkan nilai selisih kedalaman pada setiap titik. Model dari selisih kedalaman dapat dilihat pada gambar 4.18. Dari hasil selisih kedalaman tersebut diperoleh nilai selisih tertinggi 1383 meter dan terendah 0.6 meter dengan rata-rata selisih kedalaman -16 meter. Hasil yang diperoleh memperlihatkan terdapat selisih nilai kedalaman yang besar, namun dari selisih kedalaman yang diperoleh belum diketahui pada zona kedalaman mana yang mengakibatkan terjadinya selisih nilai kedalaman yang paling besar. Dari permasalahan tersebut maka dilakukanlah proses perbandingan nilai selisih kedalaman yang dibagi menjadi tiga zona kedalaman yaitu zona *neritic*, *bathyal* dan *abisal* yang di jelaskan pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Selisih Kedalaman Altimetri dan Multibeam Beserta Pembagian Zona Kedalaman

4.9.2 Proses Validas Berdasarkan Kedalaman

Proses validasi model tersebut dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan statistika. Tahap ini dilakukan dengan mevalidasi hasil estimasi batimetri satelit altimetri *Cryosat-2* terhadap estimasi batimetri *Multibeam Ecosounder* dengan melihat kesalahan selisih kedalaman yang dibagi kedalam 3 zona kedalaman. Zona-zona tersebut terdiri dari zona neritik, bathyal, dan abisal. Dari hasil Pengambilan sampel pada setiap zona, diperoleh beberapa titik kedalaman dimana pada zona neritik diambil sampel sebanyak 51 titik, kemudian pada zona bathyal diambil sampel sebanyak 254 titik, selanjutnya pada zona abisal diambil sampel sebanyak 562 titik. Proses validasi ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan selang kepercayaan dua sigma dan selang kepercayaan 95%. Pada proses validasi data kedalaman menggunakan pendekatan selang kepercayaan 95%, dengan mencari selisih hasil kedalaman dari kedua estimasi batimetri tersebut, diperoleh hasil pada zona dangkal untuk data yang masuk kedalam rentang selang kepercayaan adalah 15%, kemudian untuk zona dalam data yang masuk kedalam rentang selang kepercayaan adalah 8%, lalu untuk zona sangat dalam data yang masuk kedalam rentang selang kepercayaan adalah 6%. Hasil yang diperoleh dijelaskan pada tabel 4.3. Dari hasil pendekatan ini hanya sedikit data yang masuk kedalam rentang selang kepercayaan. Hal ini diakibatkan terlalu besarnya selisih kedalaman yang dihasilkan dari kedua model batimetri, sehingga untuk data yang memiliki selisih kecil akan terakumulasi kesalahan yang besar. Hal tersebut mengakibatkan tidak efisien dalam pemilihan outlier. Sehingga untuk pendekatan ini tidak dapat digunakan pada proses validasi. Akibat dari permasalahan tersebut maka dilakukan metode pendeteksian outlier 2σ untuk melihat keakuratan hasil estimasi batimetri secara kualitatif.

Tabel 4.3 Informasi Hasil Proses Validasi Selang Kepercayaan 95%

No	Zona Kedalaman	Jumlah Titik	Standar Deviasi (meter)	Rata-rata (meter)	Batas Atas dan Batas Bawah (meter)	Persen Masuk
1	Neritik	51	299	318	235 – 400	15%
2	Bathyal	254	210	175	149 - 201	8%
3	Abisal	562	230	222	203 – 241	6%

Proses validasi berikutnya dilakukan dengan mencari selisih kedalaman dari kedua estimasi batimetri, kemudian selisih yang diperoleh akan divalidasi terhadap setiap zona kedalaman menggunakan metode deteksi *outlier* 2σ . Dari pendekatan ini diperoleh hasil pada zona neritik data yang masuk kedalam rentang kepercayaan adalah 80%, kemudian untuk zona bathyal data yang masuk kedalam rentang kepercayaan adalah 90%, dan untuk zona abisal data yang masuk kedalam rentang kepercayaan adalah 83%. Hasil ini dijelaskan pada tabel 4.4.

Dari hasil yang diperoleh terdapat outlier atau data yang tidak masuk kedalam rentang kepercayaan, dimana outlier pada zona neritik berada pada nilai selisih kedalaman yang melebihi 599 meter, kemudian outlier pada zona bathyal berada pada nilai selisih kedalaman yang melebihi 421 meter, selanjutnya untuk outlier pada zona abisal berada pada nilai selisih kedalaman yang melebihi 461 meter.

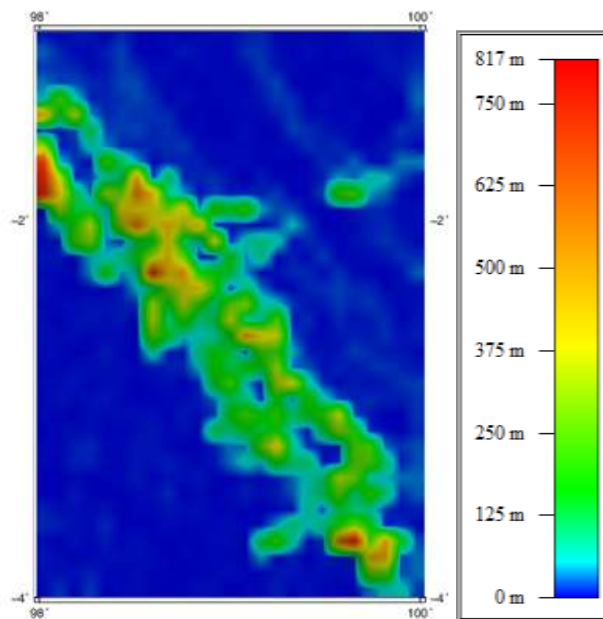
Tabel 4.4 Informasi Hasil Validasi 2σ

No	Zona Kedalaman	Jumlah Titik	Standar Deviasi (Meter)	Outlier (Meter)	Jumlah Outlier	Jumlah Titik Yang Dianggap Benar	Persen Masuk
1	Neritik	51	299	599	10	41	80%
2	Bathyal	254	210	421	23	231	90%
3	Abisal	562	230	461	95	467	83%

Dari hasil yang diperoleh dari proses validasi estimasi batimetri dengan metode deteksi *outlier* 2σ , dapat dijelaskan bahwa untuk hasil pemodelan batimetri menggunakan data satelit altimetri secara keseluruhan sudah mendekati bentuk topografi yang serupa dengan hasil pengukuran *Multibeam Echosounder* dengan nilai rata-rata kedalaman dari satelit altimetri *Cryosat-2* adalah -3087 meter dan nilai rata-rata kedalaman dari *Multibeam Echosounder* adalah -3103 meter. Dapat dilihat untuk zona abisal dan bathyal, hasil estimasi batimetri yang diperoleh dengan jumlah titik yang masuk kedalam rentang kepercayaan adalah 83% dan 90%, dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada zona abisal dan bathyal memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan hasil estimasi batimetri pada wilayah

laut zona neritik dengan jumlah titik kedalaman yang masuk kedalam selang kepercayaan adalah 80%.

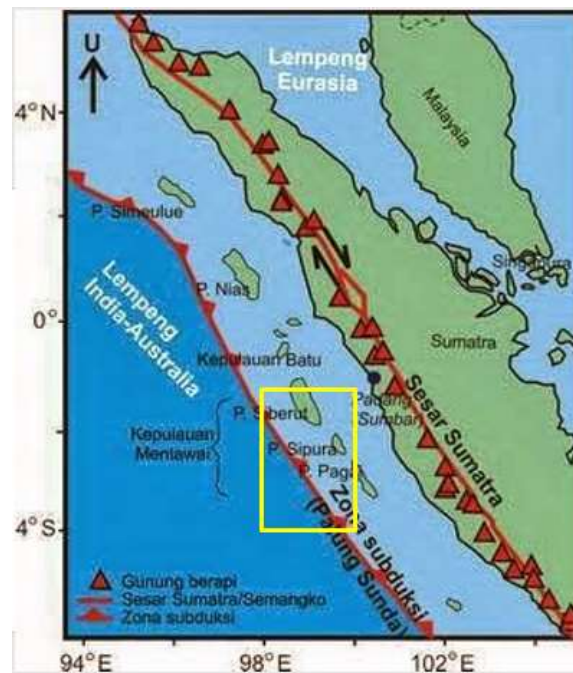
Secara umum dari penelitian yang sudah ada, estimasi batimetri dengan menggunakan satelit altimetri akan menghasilkan nilai estimasi batimetri dengan kualitas terbaik berada pada zona abisal. Pada penelitian ini diperoleh hasil yang berbeda dari hasil penelitian secara umum, dimana nilai estimasi terbaik berada di zona bathyal. Dari permasalahan tersebut dilakukan proses analisis dengan melihat selisih kedalaman dari *ETOPO1* dengan resolusi 5 menit (*ETOPO1* resolusi 5 menit ini merupakan salah satu komponen utama dalam proses transformasi medan gayaberat *free air* menjadi estimasi batimetri) terhadap nilai referensi kedalaman *Multibeam Echosounder* dengan resolusi 5 menit. Selisih kedalaman *ETOPO1* dan *Multibeam Echosounder* ini di jelaskan pada gambar 4.19.



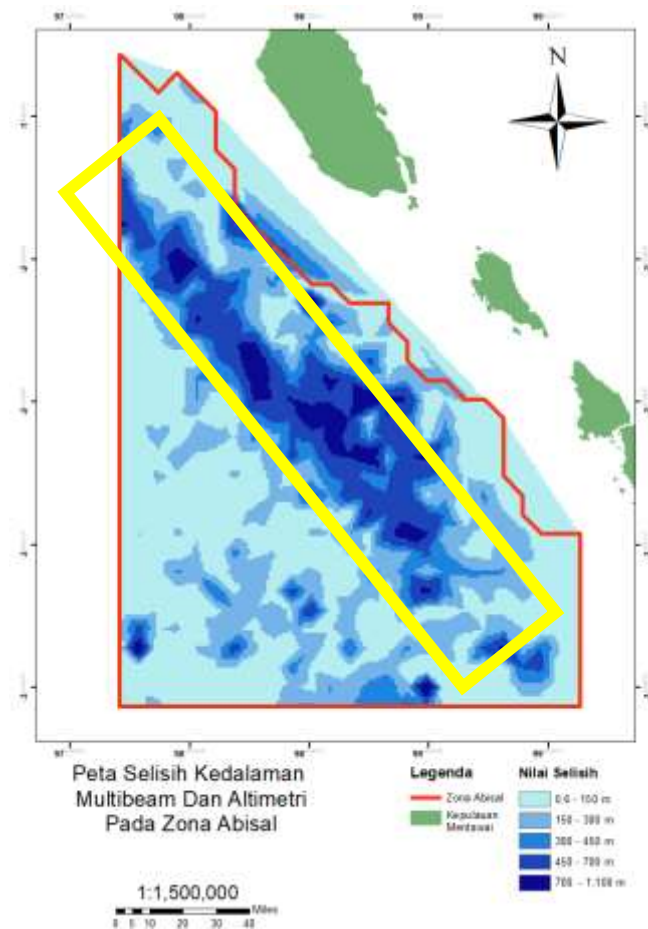
Gambar 4.19 Peta Selisih Kedalaman *ETOPO1* resolusi 5 menit dan *Multibeam Echosounder* resolusi 5 menit

Dari selisih nilai kedalaman *ETOPO1* dan *Multibeam Echosounder* diperoleh hasil selisih kedalaman yang berada pada rentang 0 meter sampai 817 meter, dimana selisih kedalaman terbesar tersebar di wilayah zona kedalaman abisal

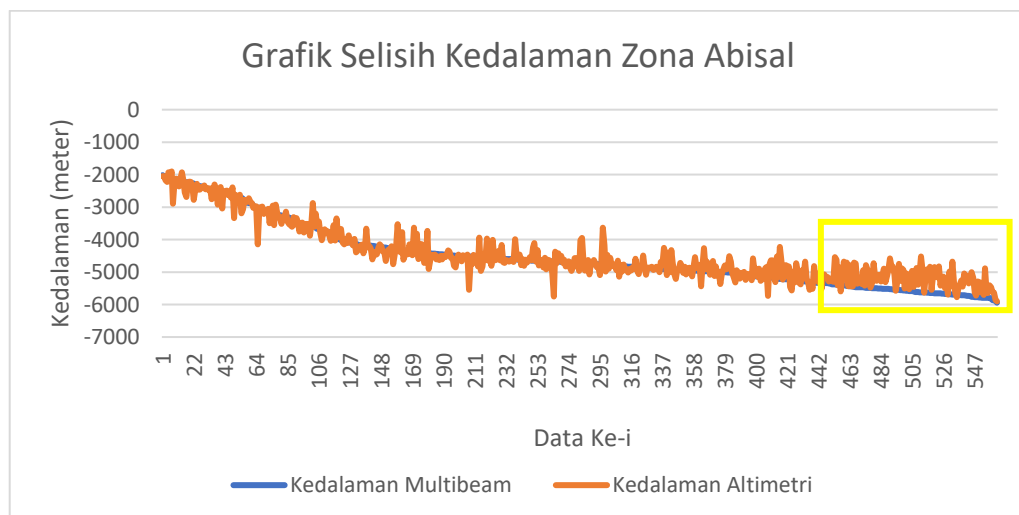
tepatnya pada palung Sunda. Dijelaskan pada gambar 4.20, 4.21, 4.22. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan hasil estimasi batimetri yang diperoleh pada penelitian di wilayah laut bagian Barat pulau Sumatera ini dengan hasil penelitian para peneliti sebelumnya disebabkan karena adanya palung Sunda pada wilayah zona abisal yang mengakibatkan tidak akuratnya hasil estimasi satelit altimetri Cryosat-2, selain itu salah satu penyebab perbedaan hasil estimasi batimetri tersebut adalah data referensi yang digunakan dalam proses validasi hasil estimasi batimetri di wilayah zona abisal, dimana nilai referensi yang digunakan untuk validasi adalah nilai kedalaman yang diperoleh dari *Multibeam Echosounder* yang pada umumnya memiliki ketelitian yang tinggi dan dapat memetakan palung yang ada pada zona abisal tersebut dengan baik.



Gambar 4.20 Peta Pertemuan Lempeng India-Australia dan Eurasia. a) Kotak warna kuning adalah wilayah penelitian, b) Garis merah adalah palung Sunda

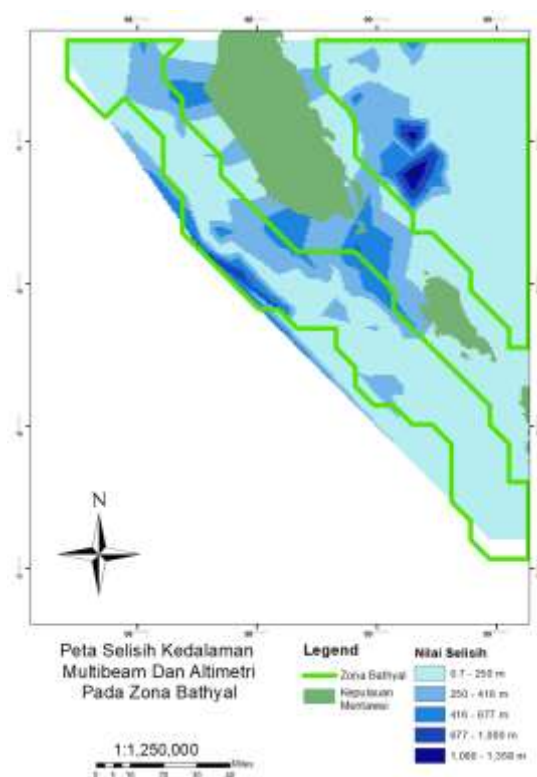


Gambar 4.21 Peta Selisih Kedalaman Zona Sangat Dalam (*Abisal*). a) Kotak Kuning adalah wilayah palung Sunda dan selisih kedalaman tertinggi, b) Garis Merah adalah wilayah Zona Abisal

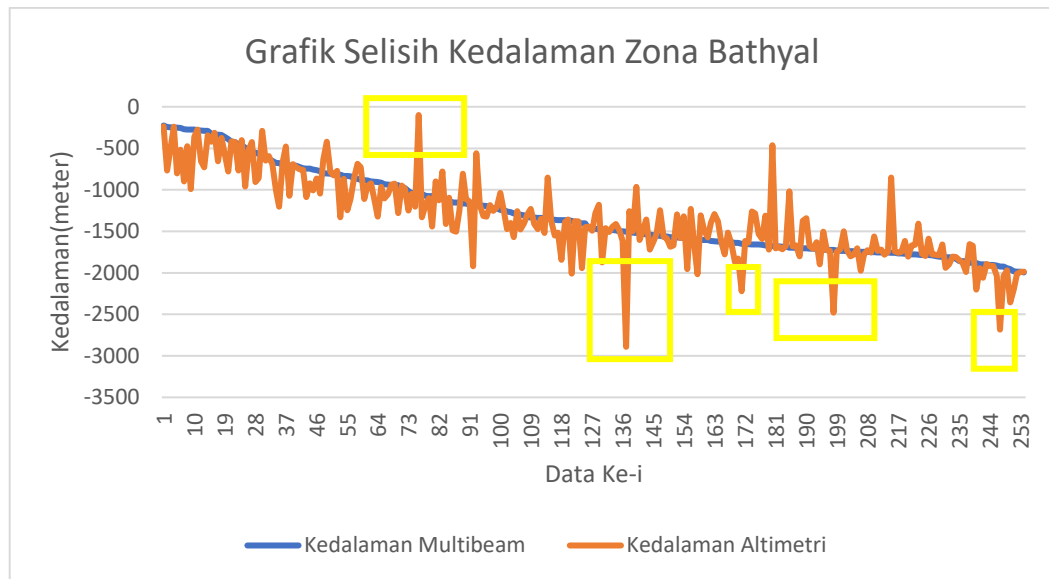


Gambar 4.22 Sampel Zona Sangat Dalam (*Abisal*). a) Kotak kuning adalah titik selisih kedalaman terbesar yang berada di wilayah Palung Sunda

Pada zona bathyal hasil estimasi yang diperoleh memiliki kualitas yang paling baik. Dari hasil perhitungan nilai selisih kedalaman rata-rata sebesar 175 meter. Dapat dilihat pada gambar 2.3 dan 2.4 bahwa terdapat perbedaan selisih kedalaman yang sangat signifikan. Hal tersebut disebabkan oleh pembagian zona kedalaman yang berefrensi kepada nilai kedalaman *Multibeam Echosounder*, sehingga terdapat beberapa titik kedalaman dari hasil estimasi batimetri satelit altimetri *Cryosat-2* yang seharusnya berada pada zona abisal atau zona neritik digolongkan menjadi zona bathyal. Dari gambar 4.24 pada grafik dijelaskan titik-titik mana saja yang seharusnya bukan berada pada zona bathyal.

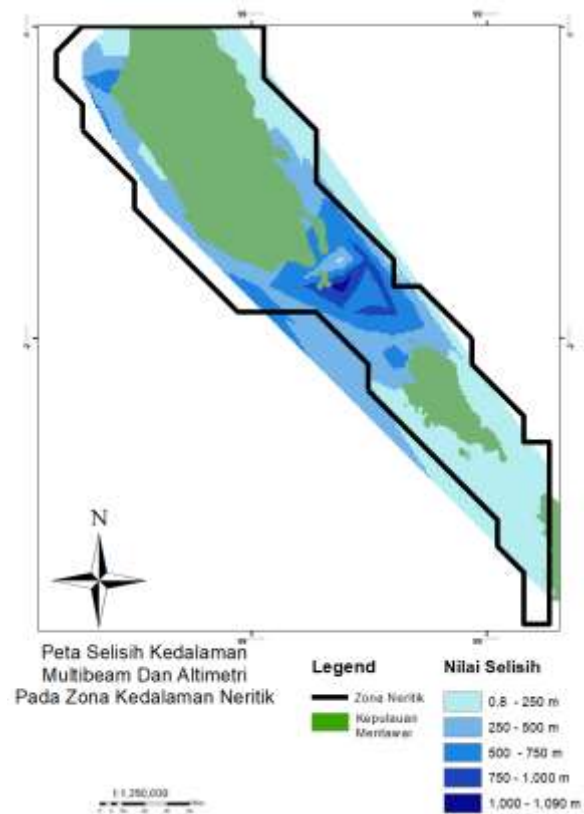


Gambar 4.23 Peta Selisih Kedalaman Zona Dalam (*Bathyal*)

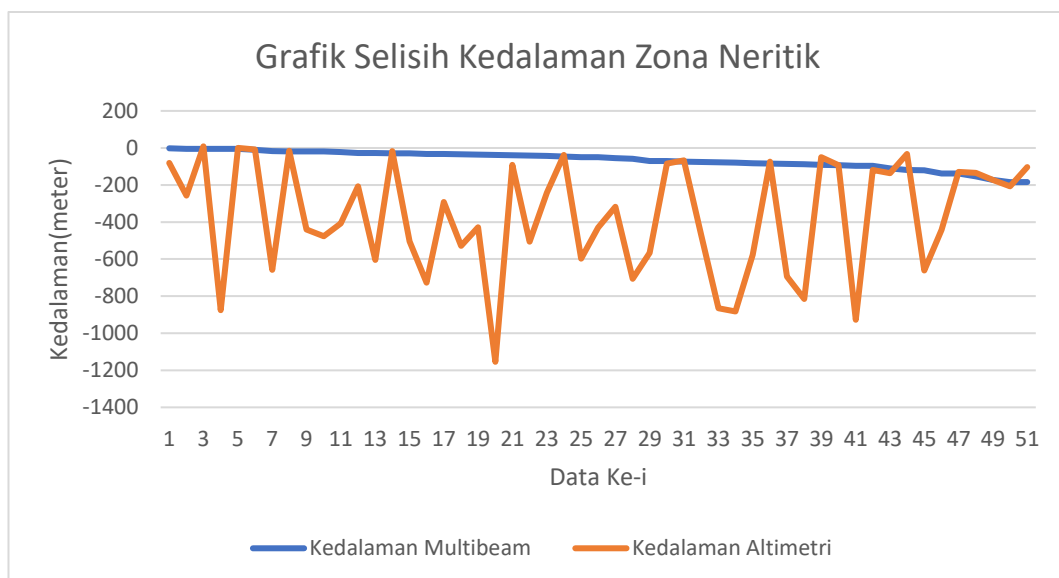


Gambar 4.24 Sampel Zona Dalam (*Bathyal*). a) Kotak kuning menjelaskan titik-titik kedalaman yang seharusnya bukan berada pada zona bathyal

Dari hasil perhitungan statistika dengan menggunakan metode deteksi outlier 2σ diperoleh hasil rata-rata selisih kedalaman sebesar 318 meter, dimana dapat dilihat dengan jelas rata-rata kedalaman pada zona neritic melebihi interval zona neritic yaitu 0 meter sampai 200 meter. Dijelaskan pada gambar 4.25 dan 4.26. Hal ini diakibatkan oleh *noise* yang disebabkan adanya gangguan daratan dan permukaan topografi yang kompleks, serta kedalaman perairan terhadap gelombang mikro yang dipantulkan kembali ke satelit [4]. Lokasi daratan yang dekat dengan laut pada wilayah neritik ini yang mengakibatkan kesulitan melakukan beberapa koreksi geofisika secara akurat [5][9][17].



Gambar 4.23 Peta Selisih Kedalaman Zona Dangkal (*Neritik*)



Gambar 4.24 Sampel Zona Dangkal (*Neritik*)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun beberapa hal yang dapat disimpulkan pada penelitian ini adalah:

1. Estimasi batimetri di laut bagian Barat Pulau Sumatera dapat dilakukan dengan menggunakan data satelit Cryosat-2. Hasil dari estimasi batimetri Satelit Cryosat-2 ini memiliki resolusi spasial 5 menit atau 9.25 kilometer dengan hasil estimasi kedalaman rata-rata adalah -3087 meter.
2. Dari hasil validasi estimasi batimetri yang diperoleh menggunakan metode penginderaan jauh satelit altimetri *Cryosat-2* dan metode akustik *Multibeam Echosounder*, berdasarkan metode statistik deteksi outlier 2σ pada zona abisal dan bathyal diperoleh hasil yang diperoleh memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan hasil estimasi di zona neritik dimana persentasi titik yang masuk pada zona abisal dan bathyal adalah 83% dan 90% dengan rata-rata selisih kedalaman masing-masing zona adalah 222 meter dan 175 meter, sedangkan pada zona neritik persentasi titik yang masuk kedalam rentang kepercayaan adalah 80% dengan rata-rata selisih kedalaman adalah 435 meter.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penggunaan Multimission Satelit Altimetri akan memberikan resolusi spasial yang lebih baik lagi dikarenakan akan lebih banyaknya data dari *sea surface height* yang digunakan dalam proses pengolahan.
2. Sebelum melakukan proses estimasi model batimetri sebaiknya untuk data satelit altimetri dilakukan proses *waveform retracking* yang bertujuan agar meningkatkan keakuratan data *sea surface height* terutama untuk wilayah laut zona dangkal.

3. Sebaiknya penelitian ini dapat diimplementasikan pada wilayah perairan yang berada jauh dari daerah palung atau daerah pertemuan dua lempeng tektonik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]Crocket, Christopher. Pencarian Untuk Melacak Asal Air Bumi Adalah Kekacauan total. (2015).
- [2]Djunarsah, E. dan Poerbandono. Survey Hidrografi. Bandung: Refika Aditama (2005).
- [3]Harianto, K., & Takwir, A. Pemetaan Batimetri Perairan Dangkal Menggunakan Algoritma Jupp Pada Citra SPOT-7 di Perairan Shallow Water Mapping Using Jupp Algorithm at SPOT-7 Image in Tanjung Tiram. 4(1), 1-12. (2019)
- [4]European Space Agency, & Mullar Space Science Laboratory. *CryoSat Product Handbook: Vol.DLFE3605*.https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=125272&name=DLFE-3605.pdf. (2012).
- [5]Drinkwater, M. R., Francis, R., Ratier, G., & Wingham, D. J. The European Space Agency's Earth Explorer Mission CryoSat: Measuring variability in the cryosphere. *Annals of Glaciology*, 39, 313-320. <https://doi.org/10.3189/172756404781814663>. (2004)
- [6]Yulia, M.SI. Zona Laut Berdasarkan Kedalamah<http://ilmugeografi.com/ilmu-bumi/laut/zona-laut>. (2015).
- [7]Widodo, A. A., & Satria, F. Status Pemanfaatan Dan Pengelolaan Sumber Daya Ikan Tuna Neritik di Samudera Hindia WPP 572 dan 573 The Exploitation And Management Status of Neritic Tna Resource In FMA 572 and 573, 23-28. (2014).
- [8]Seeber, G. Satellite Geodesy, Foundations, Methods and Applications. Walter de Gruyter. Berlin.(1993)
- [9]Mertz, F., Dumont, J. P., & Urien, S. Baseline-C CryoSat Ocean Processor. In *Baseline-C CryoSat Ocean Processor Ocean Product Handbook P*. (2017).

- [10]Hartanto, P., Huda, S., Putra, W., Variandy, E. D., Triarahmadhana, B., Pangastuti, D., Pahlevi, A. M., & Hwang, C. Estimation of marine gravity anomaly model from satellite altimetry data (Case Study : Kalimantan and Sulawesi Waters-Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 162(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/162/1/01203>.(2018)
- [11]Chelton D, Ries J, Bruce H, Fu L, Callahan P. Satellite Altimetry. Dalam L. Fu, & A. Cazenave, *Satellite Altimetry and Earth Sciences A Handbook of Techniques and Applications* (hal. 1-122). California: Academic Press. (2001).
- [12]Dumont J, Rosmorduc V, Picot N, Bronner E, Desai S, Bonekamp H, Figa J, LilibrigeJ,ScharrooR.OSTM/Jason-2ProductsHandbook. https://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/J2_handbook_v18_no_rev. (2011)
- [13]Andersen O dan Scharroo R. Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: And Implications for Mean Sea Surface Determination. Dalam Vignudelli A, Kostianoy P, Cipollini, dan Benveniste J, *Coastal Altimetry* (hal. 103-146). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (2011)
- [14]Fu, L.-L., & Cazenave, A. *Satellite Altimetry and Earth Sciences - Part 2*. (2001).
- [15]Dixon, T. H., Naraghi, M., McNutt, M. K., & Smith, S. M. Bathymetric Prediction From SEASAT Altimeter Data by poorly atmospheric • Now at Department of Earth Science , Massachusetts. *Journal of Geophysical Research*, 88, 1563–1571. (1983).
- [16]Heiskanen W and Moritz H. *Physical Geodesy* (San Fransisco: W.H. Freeman and Co) p 92. (1967)
- [17]Pope A. The statistics of residuals and the detection of outliers NOAA Technical Report U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Survey (Rockville, MD : Geodetic Research and Development Laboratory).. (1976).

- [18]Sandwell, D. T. Geophysical applications of satellite altimetry. Rev. Geophys. Suppl., 29, 132-137. (1991).
- [19]Nadzir, Z. *Coastal Sea State Bias: Correcting Coastal Sea Level by Studying the Relation between Wind, Waves, and the Radar Signals*. (2017).
- [20]Hsiao, Y. S., Hwang, C., Cheng, Y. S., Chen, L. C., Hsu, H. J., Tsai, J. H., Liu, C. L., Wang, C. C., Liu, Y. C., & Kao, Y. C. High-resolution depth and coastline over major atolls of South China Sea from satellite altimetry and imagery. *RemoteSensingofEnvironment*,176,69–83.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.016>. (2016).
- [21] Hwang, C., and Parsons, B. An optimal procedure for deriving marine gravity from multi-satellite altimetry. J. Geophys. Int., 125, 705- 719. (1996).
- [22]Yulia, M.SI. Zona Laut Berdasarkan Kedalaman<http://ilmugeografi.com/ilmu-bumi/laut/zona-laut>. (2015)
- [23]Djunarsah, E. dan Poerbandono. Survey Hidrografi. Bandung: Refika Aditama (2005).
- [24]W. Street, “Multibeam Sonar Theory of Operation L-3 Communications SeaBeam Instruments,” (2000)
- [25] A. Jannah, “Analisis perbandingan metode filter gaussian, mean dan median terhadap reduksi noise salt and peppers,”(2008)
- [26]Walpole, R.E. Pengantar Statistika Edisi Ke 3. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. (1995)
- [27]Pukelsheim, F. The Three Sigma Rule. American Statistician.48:88-91 JSTOR 2684253. (1994)
- [28]Heiskanen W and Moritz H. Physical Geodesy (San Fransisco: W.H. Freeman and Co) p 92. (1967)
- [29]Hancock, D.W.I. and D.W. Lockwood. Effects of island in the Geosat footprint. J. Geophys. Res., 95(C3):2849-2855. (1990).

- [30]Elmotaal, H. A., Makhloof, A., Ashry, M. Comparison among Three Methods on the Best Combination of the Gravity Field Wavelengths in Geoid Determination in Egypt. Geodetic Week 2015, Stuttgart. (2015).
- [31]Merry, C.L. DEM-induced errors in developing a quasi-geoid model for Africa. *Journal of Geodesy*. 77, 537-542. (2003).
- [32]Tocho C., Font G., Sideris M. Gravimetric Geoid Determination in the Andes. In: Sansò F. (eds) *A Window on the Future of Geodesy*. International Association of Geodesy Symposia, vol 128. Springer, Berlin, Heidelberg.(2005).
- [33]Pahlevi, A. M., Sofian, I., Pangastuti, D., & Wijanarto, A. B. Updating Model Geoid Indonesia (Updating The Indonesian Geoid Model). *Seminar Nasional Geomatika 2018: Penggunaan Dan Pengembangan Produk Informasi Geospasial Mendukung Daya Saing Nasional Penyelenggaraan*, 1–11. (2018).
- [34]Priyatna, K. Pengembangan Model Pengkombinasian Data Gayaberat dengan Model Geopotensial Global untuk Penentuan Geoid Regional Wilayah Indonesia. Disertasi Doktor Institut Teknologi Bandung.(2010).

LAMPIRAN A

SCRIPT PENGOLAHAN SATELIT ALTIMETRI CRYOSAT-2 MENJADI BATIMETRI

- Memperoleh Residual Geoid Gradien

```
debug\resgeoid_cryosat -Megm08_ Undulasi.grd3 -Fnama_file_SSH.txt  
-GResidual_Geoid_Gradien -T25 -Ooutlier -N10 -Irio_05_mdt.grd3
```

- Memperoleh Residual Gravity Anomali (*Least Square Collocation*)

```
debug\collocg -Ccoevicent_egm08(2160).txt -W40 -R98/100/-4/-1 -I1/1  
-SResidual_Gravity_Anomali.grd3 -AResidual_Geoid_Gradien -D0.1 >alt24.out
```

- Memperoleh Gravity Anomali

```
debug\gridadd -AResidual_Geoid_Gradien.grd3 -Begm08_Gravity_Anomali.grd3  
-GGravity_Anomali.grd3
```

- Proses *Filtering*

```
grdfilter Gravity_Anomali.grd -GHasil_Filtering.grd -Fg30 -D4 -R98/100/-4/-1 -  
I1m -V
```

- Proses *Cutting ETOPO1*

```
grdcut etopo1_indonesia.grd -Getopo1_cutting.grd -R98/100/-4/-1 -V
```

- Filtering Data *Cutting ETOPO1*

```
grdfilter etopo1_cutting.grd -D4 -Fg10 -R98/100/-4/-1 -I1m -V  
-Getopo1_Filtering.grd
```

- Memperoleh *Longwave Gravity Anomali*

```
grav2depth\glongbath -Aegm08_Gravity_Anomali.grd3 -Betopo1_Filtering.grd3  
-D11000 -Glongwave_Gravity_Anomali.grd3
```

- Memperoleh Shortwave Gravity Anomali

grav2depth\gshortbath -AHasil_Filtering.grd3 -

Blongwave_Gravity_Anomali.grd3 -Gshortwave_Gravity_Anomali.grd3

- Memperoleh Model Batimetri

grav2depth\gravtodepth.exe -Ashortwave_Gravity_Anomali.grd3 -D11000

-GModel_Estimasi_batimetri.grd3

Untuk Script-script beserta folder-folder pengolahan yang tertera di atas penulis cantumkan pada alamat website ini https://drive.google.com/file/d/1J6_RGu-HJelB7P_xqg8A1K-i91sxx7m8/view?usp=drivesdk

LAMPIRAN B

DATA KEDALAMAN ALTIMETRI DAN MULTIBEAM ECHOSOUNDER

ZONA LAUT SANGAT DALAM (ABISAL)					
Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Multibeam (meter)	Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Altimetri (meter)
99.25	-2.417	-2016	99.25	-2.417	-2049
98.417	-1.417	-2060	98.417	-1.417	-2049
98.25	-1.25	-2063	98.25	-1.25	-2177
99.167	-2.417	-2089	99.167	-2.417	-2225
99.5	-2.667	-2097	99.5	-2.667	-1930
99.583	-2.667	-2098	99.583	-2.667	-2037
99.417	-2.583	-2108	99.417	-2.583	-1902
98.5	-1.833	-2115	98.5	-1.833	-2893
99.167	-2.25	-2142	99.167	-2.25	-2214
99.75	-3.083	-2144	99.75	-3.083	-2122
99.5	-2.75	-2160	99.5	-2.75	-2214
99.167	-2.333	-2166	99.167	-2.333	-2364
99.5	-2.833	-2170	99.5	-2.833	-2143
99.417	-2.75	-2204	99.417	-2.75	-1931
99.667	-2.75	-2206	99.667	-2.75	-2200
98.333	-1.333	-2224	98.333	-1.333	-2549
98.75	-2.083	-2234	98.75	-2.083	-2687
99.667	-3	-2238	99.667	-3	-2232
99.917	-3.25	-2245	99.917	-3.25	-2212
99.083	-2.25	-2263	99.083	-2.25	-2227
98.417	-1.5	-2269	98.417	-1.5	-2392
98.667	-2	-2271	98.667	-2	-2780
99.417	-2.667	-2309	99.417	-2.667	-2447
98.833	-2.167	-2334	98.833	-2.167	-2284

99.25	-2.5	-2353	99.25	-2.5	-2460
98.25	-1.333	-2358	98.25	-1.333	-2458
99.583	-2.75	-2367	99.583	-2.75	-2383
98.5	-1.75	-2375	98.5	-1.75	-2385
99.167	-2.5	-2412	99.167	-2.5	-2332
98.5	-1.667	-2413	98.5	-1.667	-2451
98.083	-1.25	-2420	98.083	-1.25	-2416
99.083	-2.333	-2461	99.083	-2.333	-2481
100	-3.25	-2463	100	-3.25	-2424
99	-2.333	-2496	99	-2.333	-2758
98	-1.167	-2499	98	-1.167	-2471
98.917	-2.25	-2499	98.917	-2.25	-2308
99.833	-3.25	-2500	99.833	-3.25	-2453
99.417	-2.833	-2502	99.417	-2.833	-2925
99.583	-2.917	-2505	99.583	-2.917	-2582
99.083	-2.417	-2509	99.083	-2.417	-2382
99.083	-2.5	-2510	99.083	-2.5	-3044
99.667	-2.917	-2520	99.667	-2.917	-2511
99.75	-3.167	-2534	99.75	-3.167	-2510
99.583	-3	-2568	99.583	-3	-2494
98.167	-1.333	-2588	98.167	-1.333	-2633
99.5	-2.917	-2607	99.5	-2.917	-2522
98.667	-2.083	-2630	98.667	-2.083	-2705
99.333	-2.583	-2644	99.333	-2.583	-2390
98.5	-1.917	-2657	98.5	-1.917	-3340
100	-3.417	-2661	100	-3.417	-2623
99.583	-2.833	-2676	99.583	-2.833	-2708
98.333	-1.417	-2683	98.333	-1.417	-2723
99.333	-2.667	-2704	99.333	-2.667	-2618
98.917	-2.333	-2706	98.917	-2.333	-3189
98.583	-2	-2742	98.583	-2	-3063

ZONA LAUT DALAM (BATHIAL)					
Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Multibeam (meter)	Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Altimetri (meter)
99.91667	-2.33333	-225	99.91667	-2.33333	-234
99.33333	-2	-245	99.33333	-2	-769
98.66667	-1.5	-247	98.66667	-1.5	-518
99.91667	-2.75	-250	99.91667	-2.75	-242
98.5	-1.25	-251	98.5	-1.25	-804
99.5	-1.83333	-253	99.5	-1.83333	-516
98.91667	-1.83333	-269	98.91667	-1.83333	-901
99.25	-1.5	-273	99.25	-1.5	-475
99.25	-1.91667	-274	99.25	-1.91667	-992
98.5	-1	-275	98.5	-1	-363
99.91667	-2.83333	-287	99.91667	-2.83333	-274
99.41667	-2.08333	-288	99.41667	-2.08333	-655
99.5	-2.25	-290	99.5	-2.25	-728
98.58333	-1.41667	-292	98.58333	-1.41667	-344
99.58333	-2.33333	-323	99.58333	-2.33333	-420
99.83333	-2.58333	-337	99.83333	-2.58333	-313
98.83333	-1.75	-338	98.83333	-1.75	-656
99.75	-2.08333	-339	99.75	-2.08333	-376
98.75	-1.66667	-362	98.75	-1.66667	-566
99.08333	-1.16667	-389	99.08333	-1.16667	-780
99.66667	-2.41667	-419	99.66667	-2.41667	-416
99.58333	-1.91667	-423	99.58333	-1.91667	-426
99.08333	-1.91667	-456	99.08333	-1.91667	-769
99.41667	-1.66667	-461	99.41667	-1.66667	-400
99	-1.91667	-495	99	-1.91667	-963
100	-2.91667	-542	100	-2.91667	-515
99.08333	-1.08333	-551	99.08333	-1.08333	-424

99.16667	-1.91667	-552	99.16667	-1.91667	-907
98.5	-1.33333	-569	98.5	-1.33333	-862
99.33333	-1.58333	-603	99.33333	-1.58333	-288
100	-2.33333	-615	100	-2.33333	-647
99.58333	-2.41667	-629	99.58333	-2.41667	-593
99.83333	-2.16667	-651	99.83333	-2.16667	-694
98.91667	-1.91667	-675	98.91667	-1.91667	-1004
99.41667	-2.16667	-681	99.41667	-2.16667	-1203
99.75	-2.5	-699	99.75	-2.5	-666
99.25	-1.41667	-702	99.25	-1.41667	-480
98.41667	-1.16667	-708	98.41667	-1.16667	-1072
99.83333	-2.66667	-709	99.83333	-2.66667	-690
100	-1	-712	100	-1	-724
99.91667	-2.25	-725	99.91667	-2.25	-751
99.75	-2	-742	99.75	-2	-761
98.83333	-1.83333	-745	98.83333	-1.83333	-1089
98.66667	-1.58333	-745	98.66667	-1.58333	-921
98.58333	-1.5	-757	98.58333	-1.5	-1006
99.5	-2.33333	-763	99.5	-2.33333	-865
98.41667	-1.08333	-775	98.41667	-1.08333	-1047
99.08333	-1	-802	99.08333	-1	-638
99.25	-2	-804	99.25	-2	-420
99.91667	-2.91667	-807	99.91667	-2.91667	-783
100	-1.08333	-815	100	-1.08333	-827
99.66667	-1.91667	-816	99.66667	-1.91667	-773
99.33333	-2.08333	-818	99.33333	-2.08333	-1331
99.91667	-1	-833	99.91667	-1	-870
98.75	-1.75	-834	98.75	-1.75	-1245
99.5	-1.75	-839	99.5	-1.75	-1111
100	-1.16667	-864	100	-1.16667	-861
99.16667	-1.25	-869	99.16667	-1.25	-687

ZONA LAUT DANGKAL (NERITIK)					
Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Multibeam (meter)	Longitude (°)	Latitude (°)	Kedalaman Altimetri (meter)
99.58333	-2.25	-1.8	99.58333	-2.25	-82
98.75	-1.5	-4.2	98.75	-1.5	-257
100	-2.66667	-4.6	100	-2.66667	8.69
99.25	-1.83333	-5.5	99.25	-1.83333	-876
100	-2.75	-5.5	100	-2.75	1.12
100	-2.5	-9.5	100	-2.5	-8.4
98.58333	-1.16667	-16	98.58333	-1.16667	-658
99.83333	-2.41667	-19	99.83333	-2.41667	-15
98.58333	-1.25	-19	98.58333	-1.25	-440
99.25	-1.58333	-19	99.25	-1.58333	-477
98.83333	-1.66667	-22	98.83333	-1.66667	-407
99.33333	-1.75	-27	99.33333	-1.75	-206
99.5	-2.08333	-27	99.5	-2.08333	-604
100	-2.83333	-29	100	-2.83333	-17
99.5	-2	-29	99.5	-2	-504
99.33333	-1.91667	-32	99.33333	-1.91667	-728
98.66667	-1.41667	-33	98.66667	-1.41667	-292
99.16667	-1.41667	-35	99.16667	-1.41667	-528
98.91667	-1.75	-37	98.91667	-1.75	-428
99.33333	-1.83333	-37	99.33333	-1.83333	####
99.66667	-2.33333	-39	99.66667	-2.33333	-91
99.08333	-1.83333	-41	99.08333	-1.83333	-505
98.58333	-1.08333	-42	98.58333	-1.08333	-242
99.91667	-2.5	-47	99.91667	-2.5	-38
99.41667	-1.83333	-49	99.41667	-1.83333	-597
98.75	-1.58333	-50	98.75	-1.58333	-431
99.5	-2.16667	-56	99.5	-2.16667	-317

99	-1.83333	-59	99	-1.83333	-706
98.5	-1.16667	-70	98.5	-1.16667	-566
99	-1.08333	-71	99	-1.08333	-84
99.91667	-2.58333	-74	99.91667	-2.58333	-67
99.41667	-2	-76	99.41667	-2	-470
99.5	-1.91667	-77	99.5	-1.91667	-864
99.41667	-1.91667	-79	99.41667	-1.91667	-883
98.5	-1.08333	-83	98.5	-1.08333	-577
99.75	-2.41667	-84	99.75	-2.41667	-73
99.16667	-1.83333	-86	99.16667	-1.83333	-693
99.33333	-1.66667	-88	99.33333	-1.66667	-816
99.08333	-1.25	-92	99.08333	-1.25	-50
99.91667	-2.41667	-93	99.91667	-2.41667	-94
99.41667	-1.75	-97	99.41667	-1.75	-927
98.58333	-1	-97	98.58333	-1	-120
99.75	-2.16667	-110	99.75	-2.16667	-136
99	-1	-118	99	-1	-33
98.58333	-1.33333	-121	98.58333	-1.33333	-662
99.66667	-2	-137	99.66667	-2	-442
99.91667	-2.66667	-138	99.91667	-2.66667	-129
99.83333	-2.5	-153	99.83333	-2.5	-135
100	-2.41667	-172	100	-2.41667	-173
99.83333	-2.25	-184	99.83333	-2.25	-206
99.16667	-1.33333	-184	99.16667	-1.33333	-103
99.58333	-2.25	-1.8	99.58333	-2.25	-82
98.75	-1.5	-4.2	98.75	-1.5	-257
100	-2.66667	-4.6	100	-2.66667	8.69
99.25	-1.83333	-5.5	99.25	-1.83333	-876
100	-2.75	-5.5	100	-2.75	1.12
100	-2.5	-9.5	100	-2.5	-8.4

Data yang ditampilkan hanya sebagian dari data sampel pada setiap zona, untuk data lengkap dari hasil estimasi tersebut dapat dilihat pada halaman website ini https://drive.google.com/file/d/1gormHMmCm9-VvHOawuqRzyDK3P2Z_1yv/view?usp=drivesdk