



TUGAS AKHIR - RM184831

# PENGGUNAAN DATA SAR-MODE CRYOSAT-2 UNTUK PENENTUAN INLAND WATER LEVEL (STUDI KASUS: DANAU TOWUTI, SULAWESI SELATAN)

AHMAD SAIFUDIN  
NRP 03311640000046

Dosen Pembimbing  
Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA  
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020



**TUGAS AKHIR - RM184831**

**PENGGUNAAN DATA SAR-MODE CRYOSAT-2  
UNTUK PENENTUAN INLAND WATER LEVEL  
(STUDI KASUS: DANAU TOWUTI, SULAWESI  
SELATAN)**

AHMAD SAIFUDIN  
NRP 0331164000046

Dosen Pembimbing  
Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA  
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**UNDERGRADUATED THESIS - RM184831**

**APPLICATION OF CRYOSAT-2 SAR-MODE FOR  
DETERMINATION OF INLAND WATER LEVEL  
(CASE STUDY: LAKE TOWUTI, SOUTH  
SULAWESI)**

**AHMAD SAIFUDIN  
NRP 0331164000046**

**Supervisor  
Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.**

**GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Civil Planning and Geo Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# **PENGUNAAN DATA SAR-MODE CRYOSAT-2 UNTUK PENENTUAN INLAND WATER LEVEL (STUDI KASUS: DANAU TOWUTI, SULAWESI SELATAN)**

Nama : Ahmad Saifudin  
NRP : 0331164000046  
Departemen : Teknik Geomatika FTSPK-ITS  
Pembimbing : Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

Pengamatan terhadap *inland water level* dapat dilakukan secara langsung melalui pengamatan terhadap rambu ukur. Namun metode ini memiliki kelemahan yaitu perlu pengamatan secara langsung di lapangan dan biaya perawatan yang mahal. Oleh karena itu penelitian ini mencoba menggunakan data satelit altimetri yang pada umumnya digunakan untuk menentukan tinggi muka air laut guna menentukan tinggi muka air di daratan. Satelit altimetri yang digunakan dalam penelitian ini adalah CryoSat-2 dan studi kasus bertempat di Danau Towuti dengan rentang waktu pengukuran dari tahun 2011 hingga 2018, Sulawesi Selatan. Satelit CryoSat-2 dipilih karena memiliki *footprint* yang cukup kecil sekitar 300 meter. Data satelit altimetri yang didapat kemudian dibandingkan dengan data pengukuran *in-situ*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan satelit altimetri CryoSat-2 SAR-Mode Level 2 guna menentukan *inland water level* dapat dilakukan. Namun dalam penggunaannya perlu dilakukan pemilihan data sehingga hasil penentuan *water level* dapat diterima.

Kata Kunci: *inland water level*, CryoSat-2, Danau Towuti

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**APPLICATION OF CRYOSAT-2 SAR-MODE FOR  
DETERMINATION OF INLAND WATER LEVEL (CASE  
STUDY: LAKE TOWUTI, SOUTH SULAWESI)**

Name : Ahmad Saifudin  
NRP : 0331164000046  
Department : Geomatics Engineering FTSPK-ITS  
Supervisor : Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.

**ABSTRACT**

*Observation of inland water level can be done directly through the observation of the tide-gauge measurement. However, this method has a weakness that needs direct observation in the field and expensive maintenance costs. Therefore, this research tries to use satellite altimetry data which is commonly used to determine sea level surface. However, this study discusses the use of satellite altimetry data to determine inland water level. The satellite altimetry used in this study were CryoSat-2 and case studies were located at Lake Towuti, South Sulawesi with measurement ranges from 2011 to 2018. The satellite CryoSat-2 was chosen because it had a fairly small footprint of about 300 meters. Satellite altimetry data obtained later compared with in-situ measurement data. The results showed that the application of satellite altimetry CryoSat-2 SAR-Mode Level 2 to determine inland water levels was possible. But the use of data needs to be done so that the result of determination of water level is acceptable.*

*Keywords: inland water level, CryoSat-2, Lake Towuti*



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGUNAAN DATA SAR-MODE CRYOSAT-2 UNTUK PENENTUAN *INLAND WATER LEVEL* (Studi Kasus: Danau Towuti, Sulawesi Selatan)

#### TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Geomatika  
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**AHMAD SAIFUDIN**  
NRP. 0331164000046

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T.  
NIP. 19740727 200003 1 001



( *eko yuli* )

**SURABAYA, 4 AGUSTUS 2020**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT, berkat taufiq dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir (TA) dengan judul “**Penggunaan Data SAR-Mode CryoSat-2 untuk Penentuan *Inland Water Level* (Studi Kasus: Danau Towuti, Sulawesi Selatan)**”.

Penulis menyadari dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dukungan, doa serta saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang selalu memberikan dukungan, doa serta biaya sejak lahir;
2. Bapak Dr. Eko Yuli Handoko, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing, beserta Bapak/Ibu dosen yang telah mendidik saya selama perkuliahan;
3. Teman-teman mahasiswa Teknik Geomatika ITS yang telah membantu penulis selama perkuliahan, terutama kepada Andin, Anzhari, Hafidz, Harrino, Ilham, Ismail dan Nahdi yang saling mendukung satu sama lain, dan;
4. Semua pihak yang telah membantu kami baik secara langsung maupun tidak langsung yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan sehingga diharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari berbagai pihak diperlukan untuk penulisan laporan selanjutnya. Dengan adanya laporan ini, semoga dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Penulis

Surabaya, Juni 2020

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1. Satelit Altimetri .....	5
2.2. Prinsip Radar Altimetri.....	5
2.3. Dry Tropospheric Correction (DTC).....	8
2.4. <i>Wet Tropospheric Correction</i> (WTC) .....	9
2.5. CryoSat-2.....	11
2.5.1. Sensor pada CryoSat-2 .....	11
2.5.2. Struktur Data CryoSat-2.....	14
2.6. Danau.....	22
2.6.1. Danau Towuti.....	22
2.7. <i>Inland Water Level</i> .....	23
2.8. Penelitian Sebelumnya .....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	27
3.1 Lokasi Penelitian .....	27
3.2 Data dan Peralatan.....	28

3.2.1	Data.....	28
3.2.2	Peralatan .....	29
3.3	Metodologi Pekerjaan.....	29
3.3.1	Tahap Pelaksanaan .....	29
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1.	Ekstraksi Data CryoSat-2 .....	37
4.2.	Subset Data CryoSat-2.....	38
4.3.	Perhitungan <i>Water level</i> .....	39
4.4.	Perbandingan Data <i>In-situ</i> terhadap CryoSat-2 .....	44
4.5.	<i>Time-Series Water Level</i> .....	47
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	51
5.1.	Kesimpulan.....	51
5.2.	Saran .....	51
DAFTAR	PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN	.....	57
BIODATA	PENULIS.....	105

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	<i>Geographical Mode Mask</i> dari CryoSat-2 (Bouzinac 2012).....	36
<b>Gambar 3.1</b>	Lokasi Penelitian disertai dengan lintasan.....	27
<b>Gambar 3.2</b>	Diagram Alir Penelitian.....	30
<b>Gambar 3.3</b>	Diagram Alir Pengolahan Data.....	32
<b>Gambar 3.4</b>	Penentuan tinggi muka air terhadap bidang referensi (Sumber: Wöppelmann dan Marcos 2016).....	35
<b>Gambar 4.1</b>	Jumlah <i>record</i> per bulan CryoSat-2 SAR <i>Intermediate Level 2</i> .....	38
<b>Gambar 4.2</b>	Gambar pengeplotan titik pengukuran CryoSat-2 (kiri: subset, tengah: subset+ <i>flag</i> , kanan: subset+ <i>flag</i> + <i>mask</i> ).....	39
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik <i>water level</i> yang memenuhi kriteria (hijau) dan data outlier (merah).....	40
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik <i>water level</i> tahun 2011-2018 hasil pengolahan data CryoSat-2 setelah data outlier dihilangkan.....	42
<b>Gambar 4.5</b>	Perbandingan <i>water level</i> antara data in-situ dengan CryoSat-2 terhadap waktu pengukuran yang sama.....	44
<b>Gambar 4.6</b>	Hubungan <i>water level</i> antara data in-situ terhadap data CryoSat-2.....	45
<b>Gambar 4.7</b>	Perbandingan <i>water level</i> antara data in-situ dengan CryoSat-2 terkoreksi.....	46
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik <i>time-series water level</i> Danau Towuti.....	48



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Spesifikasi Satelit CryoSat-2 (Bouzinac 2012).....	11
<b>Tabel 2.2</b>	Tabel Karakteristik SIRAL (Bouzinac 2012) .....	12
<b>Tabel 2.3</b>	Struktur data CryoSat-2 dalam sub <i>Location Group</i> (Sumber: Advanced Computer Systems 2015).....	15
<b>Tabel 2.4</b>	Struktur data CryoSat-2 dalam sub <i>Measurements Group</i> (Sumber: Advanced Computer Systems 2015).....	16
<b>Tabel 2.5</b>	Struktur data CryoSat-2 dalam sub <i>Auxiliary Measurements Group</i> (Sumber: Advanced Computer Systems 2015).....	19
<b>Tabel 2.6</b>	Struktur data CryoSat-2 dalam sub <i>External Corrections Group</i> (Sumber: Advanced Computer Systems 2015).....	20
<b>Tabel 2.7</b>	Struktur data CryoSat-2 dalam sub <i>Internal Corrections Group</i> (Sumber: Advanced Computer Systems 2015).....	21
<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi Komputer.....	29
<b>Tabel 3.2</b>	Parameter koreksi pada CryoSat-2 SAR <i>Intermediate Level 2</i> .....	33
<b>Tabel 4.1</b>	Tabel hasil perhitungan <i>water level per along-track</i> .	42
<b>Tabel 4.2</b>	Perhitungan kesalahan bias data CryoSat-2 .....	46
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil pengolahan <i>mean water level</i> data CryoSat-2 ..	48

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Danau merupakan genangan air di dalam cekungan di atas permukaan tanah yang terbentuk secara alami maupun buatan (Purcell 2016). Pengamatan terhadap kenaikan air di darat yang menggunakan rambu ukur pada dasarnya memberikan informasi mengenai level permukaan air berdasarkan satu dimensi atau titik yang bergantung pada situasi saat itu. Pengamatan terhadap rambu ukur memiliki kelemahan yaitu perlu pengamatan secara langsung di lapangan dan biaya perawatan yang mahal. Bahkan beberapa tempat yang terdapat pengukur ketinggian muka air yang legal dan institusional terdapat pembatasan akses data untuk penelitian (Als Dorf, Ernesto Rodri' guez, dan Lettenmaier 2007).

Alternatif lain pengukuran muka air danau dapat memanfaatkan teknologi penginderaan jauh. Satelit altimetri dapat digunakan untuk mengukur ketinggian muka air yang dapat diakses secara bebas, kapanpun dan dimanapun terutama di daerah terpencil dan terisolasi meskipun tidak melakukan pengamatan secara langsung di lapangan (Huang dkk. 2018). Prinsip kerja dari satelit altimetri sangat sederhana yaitu mengukur jarak antara permukaan air dengan satelit (Barbosa 2012). Salah satu satelit altimetri yaitu CryoSat-2.

CryoSat-2 merupakan satelit altimetri yang memiliki muatan utama berupa SAR *Interferometer Radar Altimeter* (SIRAL) yang dirancang memiliki tiga mode operasional, yaitu *Low Resolution Mode* (LRM), *Synthetic Aperture Radar* (SAR), dan *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

(InSAR) dengan data 1 Hz dan 20 Hz (Moore dkk. 2018). Misi utama dari satelit ini yaitu mengukur ketebalan lapisan es baik di darat maupun di laut. CryoSat-2 (SAR dan LRM) telah memberikan kontribusi dalam bidang altimetri sejak 2010 dengan menutup kesenjangan data antara akhir misi Envisat pada 2010 dan peluncuran SARAL pada 2013 (Boergens, Dettmering, dan Seitz 2019). Namun satelit ini tidak memiliki *microwave radiometer* sehingga nilai *tropospheric correction* didapatkan dengan menggunakan model.

Seiring dilakukannya penelitian, diketahui bahwa satelit altimeter tidak hanya mampu mengukur permukaan air laut tetapi juga dapat mengukur permukaan air darat, misalnya danau dan sungai (Villadsen dkk. 2015). Penggunaan satelit altimetri untuk pengukuran muka air darat bisa digunakan apabila tidak adanya stasiun pasut di danau atau sungai, area yang susah dijangkau atau data pasut yang bersifat rahasia. Namun, banyak danau hanya dilalui oleh satu atau dua satelit altimetri disebabkan altimeter radar *Ku-band* memiliki *footprint* yang relatif besar dengan diameter 15-20 km, menyebabkan topografi sekitarnya mempengaruhi bentuk gelombang sinyal balik dari altimeter (Kleinherenbrink, Ditmar, dan Lindenbergh 2014).

Masalah pemrosesan data altimetri untuk penentuan *inland water level* sangat mirip dengan penentuan zona pantai lautan yaitu adanya distorsi sinyal telemetri ketika gelombang dipantulkan dari permukaan tanah dan objek di pesisir perairan (Troitskaya dkk. 2012). Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan menggunakan data CryoSat-2 Level 2 *Intermediate SAR-mode* untuk menentukan nilai *water level* Danau Towuti.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan maka batas kajian pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana aplikasi satelit altimetri untuk pengukuran *inland water level*?
2. Bagaimana melakukan analisis nilai *water level* di Danau Towuti dari tahun 2011 sampai dengan tahun 2018?
3. Berapa deviasi nilai *water level* antara hasil pengukuran menggunakan satelit altimetri dengan hasil pengukuran *in-situ*?

## 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Wilayah yang dijadikan objek penelitian yaitu Danau Towuti dengan koordinat  $2^{\circ}45'0''\text{LS } 121^{\circ}30'0''\text{BT}$  dan luas danau mencapai  $562 \text{ km}^2$ ;
2. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data CryoSat-2 Level 2 *Intermediate* SAR-mode dan data pengukuran pasut Danau Towuti;
3. Dataset berupa data satelit diambil dari server CryoSat-2 melalui *CryoSat User Toolbox* (CUT) dengan rentang waktu tahun 2011-2018, sedangkan untuk data pengukuran muka air Danau Towuti pada Stasiun Pasut Timampu ( $2^{\circ}39'36''\text{LS } 121^{\circ}25'48''\text{BT}$ ) didapatkan dari PT Vale Indonesia Tbk.

## 1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, berikut tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu

1. Menerapkan aplikasi satelit altimetri untuk pengukuran *water level* pada danau, khususnya Danau Towuti;
2. Menganalisa perbandingan nilai *water level* antara data SAR-mode CryoSat-2 dari tahun 2011-2018 dengan hasil pengukuran *in-situ*;
3. Menghitung besar deviasi nilai *water level* yang didapatkan dari data SAR-mode CryoSat-2 terhadap data pengukuran *in-situ*.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian ini antara lain:

1. Sebagai referensi dalam menentukan *water level* Danau Towuti menggunakan satelit altimetri CryoSat-2 Level 2 *Intermediate* SAR-Mode;
2. Tersedianya kajian mengenai *inland water level* di Indonesia sebagai referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya;
3. Dapat menambah wawasan di bidang altimetri, khususnya untuk studi tentang *inland water level*.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### 2.1. Satelit Altimetri

Satelit altimetri merupakan salah satu satelit penginderaan jauh guna mengukur ketinggian muka air laut terhadap bidang referensi. Satelit ini berperan membantu dalam penelitian terhadap tingkat permukaan laut dan topografi laut. Secara singkat, altimeter bekerja dengan prinsip radar sederhana, yaitu sinyal dikirim ke permukaan laut dan gema yang dipantulkan akan diterima kembali oleh satelit dalam seri waktu yang disebut "bentuk gelombang" (Passaro dkk. 2016).

#### 2.2. Prinsip Radar Altimetri

Andersen dan Scharroo (2011) menjelaskan konsep kerja satelit altimetri. Satelit altimetri mentransmisikan pulsa gelombang mikro dengan daya yang diketahui ke permukaan laut, kemudian dipantulkan kembali oleh permukaan laut dan sebagian dari sinyal diterima oleh altimeter. Penentuan ketinggian permukaan laut dari pengukuran jarak altimeter ke permukaan laut ditentukan dari hasil perkalian antara koefisien kecepatan sinyal radar dengan waktu tempuh sinyal dikirimkan dan diterima kembali, dengan melibatkan sejumlah koreksi yang mengekspresikan perilaku pulsa radar saat melalui atmosfer, dan koreksi dari kondisi laut serta pengaruh geofisika lainnya. Sejumlah koreksi ini perlu perhatian khusus di dekat pantai dan di wilayah perairan dangkal.

Koreksi untuk pengukuran altimetri dibagi menjadi dua kelompok, yaitu koreksi jarak (*range correction*) dan koreksi



geofisikal (*geophysical correction*). Koreksi jarak berhubungan dengan perubahan kecepatan radar dan hamburan dari pulsa radar saat pulsa ditransmisikan. Koreksi geofisikal menyesuaikan ketinggian permukaan laut yang diamati untuk kontribusi variabel waktu terbesar, seperti pasang laut dan tekanan atmosfer untuk memisahkan kontributor ketinggian laut yang dinamis terhadap variasi ketinggian permukaan laut. Tinggi permukaan air  $h$  di atas elipsoid referensi menjadi seperti berikut:

$$h = h_{orbit} - R_{corrected} \quad (2.1)$$

dengan:

$h_{orbit}$  = tinggi satelit pada orbit (m),

$R_{corrected}$  = jarak altimeter terkoreksi di atas permukaan air (m).

Menurut Fernandes dkk. (2014), jarak altimeter terkoreksi untuk perairan darat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$R_{corrected} = R_{obs} - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{iono} - \Delta R_{tides} \quad (2.2)$$

dengan:

$R_{obs} = \frac{c \cdot t}{2}$  = jarak observasi yang didapatkan dari kecepatan pulsa (c) dikali waktu tempuh (t) dibagi dua (m),

$\Delta R_{dry}$  = koreksi komponen kering troposfer (m),

$\Delta R_{wet}$  = koreksi komponen basah troposfer (m),

$\Delta R_{iono}$  = koreksi ionosfer (m),

$\Delta R_{tides}$  = koreksi pasang surut (m).

Dalam penentuan *inland water level*, koreksi atmosfer dinamis ( $\Delta R_{DAC}$ ) tidak diterapkan, karena danau atau waduk merupakan sistem tertutup. Koreksi SSB ( $\Delta R_{SSB}$ ) juga tidak diterapkan, karena efek angin pada danau atau waduk cenderung dirata-ratakan di sepanjang lintasan.

Menurut Andersen dan Scharroo (2011), penentuan koreksi pasang surut perlu dihitung dikarenakan memmpengaruhi permukaan air dan tinggi badan air. Koreksi ini meliputi *solid earth tide*, *ocean loading tide*, *ocean tide* dan *pole tide* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta R_{tides} = \Delta R_{solid} + \Delta R_{polar} + \Delta R_{ocean\ load} + \Delta R_{ocean\ tide} \quad (2.3)$$

dengan:

$$\begin{aligned} \Delta R_{solid} &= \text{koreksi } solid\ earth\ tide, \\ \Delta R_{polar} &= \text{koreksi } geocentric\ polar\ tide, \\ \Delta R_{ocean\ load} &= \text{koreksi } ocean\ loading\ tide, \\ \Delta R_{ocean\ tide} &= \text{koreksi } ocean\ tide. \end{aligned}$$

Koreksi *solid earth tide* menghilangkan efek deformasi bumi yang diakibatkan oleh gaya tarik-menarik bulan dan matahari terhadap bumi. Koreksi *geocentric polar tide* menghilangkan distorsi periode panjang yang disebabkan oleh gaya sentrifugal akibat rotasi bumi. Koreksi *ocean loading tide* menghilangkan deformasi kerak bumi akibat muatan air di permukaan bumi. Koreksi *ocean tide* menghilangkan efek pasang surut lokal yang dipengaruhi oleh bulan.

Persamaan untuk tinggi permukaan air  $H$  di atas geoid yaitu:

$$H = h - N \quad (2.4)$$

dengan:

$h$  = tinggi permukaan air di atas ellipsoid referensi (m),  
 $N$  = undulasi geoid (m).

### 2.3. Dry Tropospheric Correction (DTC)

Jalur sinyal radar yang melalui atmosfer akan terhambat oleh gas – gas (nitrogen, oksigen, dll) yang berada di lapisan troposfer. Keterlambatan sinyal tersebut berdampak pada hasil pengukuran jarak yang lebih panjang, sehingga perlu adanya koreksi DTC (Vieira, Fernandes, dan Lázaro 2018). Terdapat dua jenis model yang sering digunakan untuk DTC, yakni: *European Centre for Medium-Range Forecasts (ECMWF)* dan *U.S. National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*. Keduanya menyajikan grid reguler pada interval reguler dan tekanan permukaan akan diinterpolasi dari grid ini.

Model Saastamoinen modifikasi (Saastamoinen J. 1972) dituliskan sebagai berikut:

$$DTC = \frac{0,0022768p_s}{1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,28 \times 10^{-6}h_s} \quad (2.5)$$

dengan:

$DTC$  = koreksi troposfer kering (meter),  
 $p_s$  = tekanan permukaan (hPa),  
 $\varphi$  = lintang geodetik (derajat),  
 $h_s$  = ketinggian permukaan di atas geoid (meter).

Tekanan permukaan dapat dihitung dari *sea level pressure* ( $p_0$ ) dengan persamaan berikut:

$$p_s = p_0 \exp\left(-\frac{g_m(h_s - h_0)}{RT_m}\right) \quad (2.6)$$

dengan:

- $p_s$  = tekanan permukaan (hPa),
- $p_0$  = *sea level pressure* (hPa),
- $R$  = konstanta gas universal (J/mol.K),
- $T_m$  = nilai rata-rata temperatur pada lapisan antara  $h_0$  dengan  $h_s$  (Kelvin),
- $h_s$  = tinggi permukaan di atas geoid (meter),
- $h_0$  = *sea level* (meter) = 0,
- $g_m$  = nilai rata-rata gaya berat (m/s<sup>2</sup>).

$$g_m(\varphi, h_s) = g_0 \times f(\varphi, h) \\ = 9,784 \times (1 - 0,00266 \cos(2\varphi) - 0,28 \times 10^{-6} h_s) \quad (2.7)$$

dengan:

- $g_0$  = nilai gaya berat standar (m/s<sup>2</sup>)
- $f(\varphi, h)$  = fungsi variasi dari nilai gaya berat terhadap lintang ( $\varphi$ ) dan tinggi permukaan di atas geoid ( $h$ )

#### 2.4. Wet Tropospheric Correction (WTC)

Refraksi akibat *wet troposphere* terkait dengan keberadaan uap air di lapisan troposfer, dan kandungan air di dalam awan. Keterlambatan akibat refraksi ini dapat dikoreksi menggunakan WTC. Meskipun lebih kecil dari DTC, koreksi

ini lebih rumit kerana tingginya variasi temporal dalam ruang dan waktu yang cepat. Koreksi WTC digunakan dalam estimasi permukaan laut dari satelit altimetri biasanya dihitung dari pengukuran yang diperoleh melalui pengukuran *onboard microwave radiometer* (MWR) pada satelit (Vieira, Lázaro, dan Fernandes 2019).

Namun untuk penentuan *inland water level* penggunaan koreksi troposfer basah dari pengukuran MWR tidak valid dikarenakan kontaminasi sinyal yang diakibatkan lebarnya *footprint* (Joana Fernandes dkk. 2015). Karena tidak adanya pengukuran WTC atau MWR yang diturunkan dari pengamatan GNSS pada satelit CryoSat-2 maka WTC dapat dihitung dari grid global dari dua parameter level tunggal yang disediakan oleh model atmosfer global, seperti ECMWF. Dua parameter ini yaitu *total column water vapour* (TCWV, dinyatakan dalam mm) dan  $T_0$  yang merupakan suhu udara pada permukaan (Fernandes dkk. 2013).

$$WTC = - \left( 0,101995 + \frac{1725,55}{T_m} \right) \frac{TCWV}{1000} \quad (2.8)$$

dengan:

$WTC$  = koreksi troposfer basah (meter),

$TCWV$  = *Total Column Water Vapour* (mm),

$T_m$  = nilai rata-rata temperatur troposfer (Kelvin),

$$T_m = 50,440 + 0,789T_0 \quad (2.9)$$

dengan:

$T_0$  = suhu udara pada permukaan (Kelvin).

## 2.5. CryoSat-2

CryoSat-2 merupakan satelit altimetri yang diluncurkan oleh ESA (*European Space Agency*) pada tanggal 8 April 2010 guna menggantikan misi satelit CryoSat yang hilang pada saat peluncuran pada tahun 2005. Misi utama satelit ini yaitu melakukan pengamatan lapisan es baik di darat maupun laut terhadap perubahan ketebalan lapisan es yang berdampak pada perubahan iklim. Misi radar altimetri yang terpasang pada satelit CryoSat-2 dirancang untuk beroperasi selama tiga tahun.

Tabel 2.1 Spesifikasi Satelit CryoSat-2 (Bouzinac 2012)

Peluncuran	8 April 2010 Baikonur <i>Cosmodrome</i> , Kazakhstan
Orbit	LEO, 717 meter ketinggian rerata Inklinasi orbit 92°, non <i>sun-synchronous</i> 369 hari <i>repeat cycle</i> dengan 30 hari <i>sub-cycle</i> 100 hari periode
Muatan	SIRAL ( <i>SAR Interferometric Radar Altimeter</i> ) DORIS <i>Receiver</i> Laser Retroreflektor <i>Star Tracker</i>
Massa	720 kg, termasuk 37 kg bahan bakar
Dimensi	4,6 x 2,4 x 2,2 meter

### 2.5.1. Sensor pada CryoSat-2

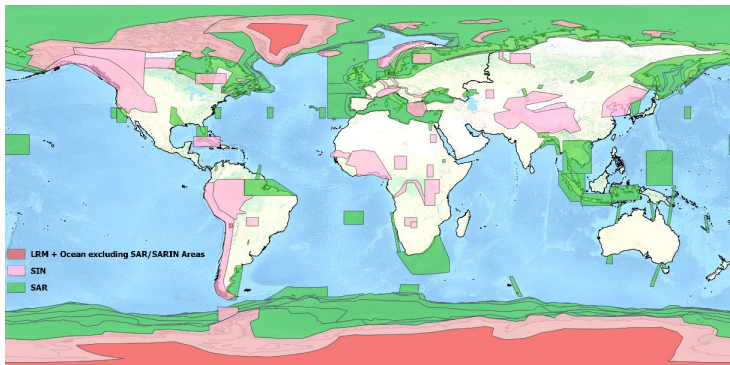
Satelit altimetri CryoSat-2 membawa muatan utama yaitu SAR *Interferometer Radar Altimeter* (SIRAL) yang dirancang memiliki tiga mode operasional, yaitu *Low Resolution Mode* (LRM), *Synthetic Aperture Radar* (SAR), dan *Interferometric*

*Synthetic Aperture Radar* (InSAR) dengan data 1 Hz dan 20 Hz (Moore dkk. 2018).

Tabel 2.2 Tabel Karakteristik SIRAL (Bouzinac 2012)

Frekuensi Radio	13,575 GHz (frekuensi <i>Ku-band</i> )
<i>Pulse Bandwidth</i>	320 MHz (40 MHz untuk <i>tracking</i> pada mode SIN)
PRF ( <i>Pulse Repetition Frequency</i> )	1,97 kHz pada LRM 18,181 kHz pada SAR dan SIN Transmisi pulsa koheren pada <i>Doppler processing</i>
Lebar pulsa terkompres	3,125 <i>nanosec</i>
Durasi pulsa	44,8 $\mu$ sec
<i>Timing</i>	Regular PRF pada LRM <i>Burst Mode</i> pada SAR dan SIN
Banyak sampel dalam <i>echo</i>	128 pada LRM dan SAR 512 pada SIN
Daya Puncak RF	25 Watt
Dimensi antenna	2 reflektor 1,2 x 1,1 meter, sejajar
Panjang <i>baseline</i> antenna	1167,6 mm
<i>Antenna Footprint</i>	15 km
<i>Range bin sample</i>	0,2342 meter untuk SAR dan SIN 0,4684 meter untuk LRM
<i>Data rate</i>	60 kbit/s untuk LRM 12 Mbit/s untuk SAR 2 x 12 Mbit/s untuk SIN
Massa Instrumen	90 kg redundan (dengan antenna)
Daya Instrumen	149 Watt
<i>Tracking Cycle</i>	47,17 msec
<i>Burst Repetition</i>	11,8 msec

Mode LRM aktif ketika satelit CryoSat-2 melewati lautan, daratan, dan lapisan es tipis dengan resolusi spasial sekitar 15 km. Sedangkan mode SAR aktif ketika satelit ini melewati es laut dan beberapa area pilihan seperti area pesisir laut. Mode InSAR aktif untuk daerah yang memiliki permukaan bergelombang. Baik mode SAR maupun InSAR memiliki resolusi yang sama sekitar 300 meter (Kleinherenbrink 2014). Namun, SAR *footprint* tetap hingga 15 km sepanjang *cross track*, yang menandakan bahwa beberapa bentuk gelombang akan terpengaruh adanya sinyal dari topografi sekitarnya (Nielsen 2015). Meskipun satelit CryoSat-2 dirancang untuk memonitoring es di permukaan bumi, satelit ini mampu digunakan untuk mengakuisisi *inland water level* (Roohi 2019). Dalam mengakuisisi data, CryoSat-2 akan beroperasi dalam mode yang berbeda berdasarkan pada status instrumen dan *geographical mode mask* operasional saat ini.



Gambar 2.1 Geographical Mode Mask dari CryoSat-2  
(Bouzinac 2012)



CryoSat-2 juga membawa penerima radio bernama *Doppler Orbit and Radio Positioning Integration by Satellite* (DORIS) untuk menentukan posisi absolut orbit satelit dan laser retroreflektor merupakan perangkat optik pasif tambahan untuk menjamin bahwa posisi CryoSat-2 berada pada orbit yang tepat. CryoSat-2 memiliki *full repeat cycle* selama 369 hari dengan kecepatan revolusi 7389 m/s menyebabkan satelit ini memiliki pergeseran *ground track*. Dampaknya satelit ini menawarkan *sampling* spasial yang sangat rapat yaitu sekitar 7,5 km untuk jarak antar *track* pada ekuator (Wingham dkk. 2006).

#### 2.5.2. Struktur Data CryoSat-2

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu CryoSat-2 SAR *Intermediate Level 2* didapatkan dari FTP yang disediakan oleh ESA berekstensi DBL dan HDR. Data ini menyediakan parameter dan indikator yang lebih banyak sehingga ukuran data menjadi lebih besar.

Parameter produk data berdasarkan fungsinya terbagi menjadi 5 sub-struktur sebagai berikut:

- 1) *Location Group* = memuat waktu dan orbit lokasi pengukuran;
- 2) *Measurements Group* = diturunkan dari parameter pengukuran instrument;
- 3) *Auxiliary Measurements Group* = data atau model tambahan yang didapatkan dari luar;
- 4) *External Corrections Group* = koreksi geofisika;
- 5) *Internal Corrections Group* = koreksi kalibrasi instrument.

Berikut ini perincian dari kelima parameter produk data CryoSat-2 SAR *Intermediate* Level 2 yang digunakan pada penelitian ini dengan parameter yang digunakan ditandai dengan warna merah:

Tabel 2.3 Struktur data CryoSat-2 dalam sub *Location Group*  
(Sumber: Advanced Computer Systems 2015)

Variabel	Keterangan	Unit
OPERATION_ MODE	Status mode pengoperasian	
Start_Time	Waktu memulai pengambilan data	
Baseline_ID	Identitas <i>baseline</i>	
TAI	Data Record Time (MDSR Time Stamp)	IAT
USO_Correctio n	USO Correction Factor (definition tbd)	(ratio)
MODE_ID	Informasi mode Instrumen	-
Source_Sequenc e_Counter	Source Sequence Counter (from telemetry)	-
Instrument_Con fig	Konfigurasi Instrumen (termasuk status <i>loop</i> )	-
Record_Counter	Surface Sample counter	-
LAT	Pengukuran lintang terkoreksi	$10^{-1} \mu$ - degree
LONG	Pengukuran bujur terkoreksi	$10^{-1} \mu$ - degree
H	Ketinggian COG di atas ellipsoid referensi (terinterpolasi)	mm
H_rate	Instantaneous altitude rate derived from orbit	mm/sec

Variabel	Keterangan	Unit
V	Satellite velocity vector[3] (in IERF)	mm/sec
Beam	Real beam direction vector[3] (in CRF)	$\mu\text{m}$
Baseline	Interferometer baseline vector[3] (in CRF)	$\mu\text{m}$
Star_Tracker_I D		
Spacecraft_Roll		
Spacecraft_Pitch		
Spacecraft_Yaw		
MCD_FLAG	Level 2 Measurement Confidence Data (flag word)	-
Serial_Sec_Num		
Elapsed_Time		

Tabel 2.4 Struktur data CryoSat-2 dalam sub *Measurements Group* (Sumber: Advanced Computer Systems 2015)

Variabel	Keterangan	Unit
beam_param		
Height_over_surface_r1	Tinggi permukaan terhadap ellipsoid	mm
Sigma0_r1	Sigma 0	dB/100
SWH	Sea Water Height	
Peakiness	Peakiness	1/100
Retracked_Range_r1	Koreksi jarak retracked	mm

Variabel	Keterangan	Unit
SAR_CHI_squa re_rl		
SAR_Retracker _Output_2	Retracker Output 2	Tbd
Power_Amplitu de_rl		
SAR_Sigma_Fit _rl		
SAR_Expon_Fit _rl		
OCOG_Position		
OCOG_Amplitu de		
OCOG_Width		
<b>Window_Delay</b>	Jarak <i>window delay</i>	mm
Power_Echo_Sh ape_Parameter	<i>Power echo shape parameter</i>	dB/100
Cross_Track_A ngle	<i>x-Track Angle (Interferometric angle computed at Retract Point)</i>	$\mu$ radians
Cross_Track_A ngle_Corr	<i>x-Track Angle Correction</i>	
Coherence	<i>Coherence (at Retract Point)</i>	1/1000
Interpolated_Oc ean_Height	<i>Interpolated Ocean Height (or MSS)</i>	mm
Freeboard	<i>Freeboard (initially=0)</i>	mm
Surface_Height _Anomaly	<i>Surface Height Anomaly</i>	mm
Interpolated_Se a_Surface_Heig ht_Anomaly	<i>Interpolated Sea Surface Height Anomaly</i>	mm

Variabel	Keterangan	Unit
Ocean_Height_Interpolation_Error	<i>Interpolation error for Ocean Height</i>	mm
Number_Interpolation_Point_Forward	<i>Number of interpolation points used -forward</i>	-
Number_Interpolation_Point_Backward	<i>Number of interpolation points used -backward</i>	-
Radius_Interpolation_Backward	<i>Radius of interpolation -forward (in time)</i>	ms
Radius_Interpolation_Forward	<i>Radius of interpolation -backward (in time)</i>	ms
Interpolation_Error_Flag	<i>Interpolation error (flag)</i>	-
MEA_Mode	Mode pengukuran (SAR / SARin / LRM )	-
MEA_Quality_Flag	Kualitas pengukuran (flag)	-
Retracker_Flag	Status perhitungan <i>retracker (flag)</i>	-
Height_Status_Flag	Status perhitungan <i>height (flag)</i>	-
SAR_Freeboard_Status_Flag	<i>SAR Freeboard Status Flags</i>	-
Number_Looks_Averaged	Banyaknya <i>echoes</i> yang dirata-rata	-

Tabel 2.5 Struktur data CryoSat-2 dalam sub *Auxiliary Measurements Group* (Sumber: Advanced Computer Systems 2015)

Variabel	Keterangan	Unit
Ice_Concentration	Parameter konsentrasi es	%/1000
Snow_Depth	Ketebalan salju	mm
Snow_Density	Densitas salju	
Discriminator_Result	<i>Discriminator result (enumerated type)</i>	-
SIN_Discriminator_Total_Power	<i>SARin Discriminator Parameter 1=total power</i>	1/1e15
SIN_Discriminator_Max_Power	<i>SARin Discriminator Parameter 2=max Power</i>	1/1e15
SIN_Discriminator_Mean_Power	<i>SARin Discriminator Parameter 3=mean Power</i>	1/1e15
SIN_Discriminator_Bin_with_Max_Power	<i>SARin Discriminator Par 4=bin of max power</i>	1/1000
SIN_Discriminator_Bin_of_Half_Max_Power	<i>SARin Discriminator Par5=bin of half max power</i>	1/1000
SIN_Discriminator_Max_Coherence	<i>SARin Discriminator Par 6=max Coherence</i>	1/1000
SIN_Discriminator_Bin_with_Max_Coherence	<i>SARin Discriminator Par 7=bin max Coherence</i>	1/1000
SIN_Discriminator_First_Power_Bin	<i>SARin Discriminator Par 8=first power bin</i>	1/1000

Variabel	Keterangan	Unit
SIN_Discriminator_Last_Power_Bin	<i>SARin Discriminator Par 9=last power bin</i>	1/1000
SIN_Discriminator_Reserved	<i>SARin Discriminator Parameter 10 - reserved</i>	tbd
SIN_Discriminator_Status_Flag	<i>Discriminator status flag</i>	-
Slope_Model_Correction_Attitude	Koreksi ketinggian <i>Slope model</i>	□deg
Slope_Model_Correction_Azimuth	Koreksi azimuth <i>Slope model</i>	□deg
Slope_Doppler_Correction	Koreksi <i>Slope Doppler</i>	
Uncorrected_Lat	Lintang tak terkoreksi	10 <sup>-1</sup> μ-degree
Uncorrected_Lon	Bujur tak terkoreksi	10 <sup>-1</sup> μ-degree
Ambiguity_Indicator_Flag	Indikator ambiguitas	-
MSS	MSS dari <i>ocean model</i>	mm
Geoid	Geoid dari <i>Geoid model</i>	mm
ODLE		
DEM	Elevasi DEM (terinterpolasi)	mm
DEM_ID	DEM identifier (khusus SARin)	-

Tabel 2.6 Struktur data CryoSat-2 dalam sub *External Corrections Group* (Sumber: Advanced Computer Systems 2015)

Variabel	Keterangan	Unit
Dry_Tropo	Koreksi <i>Dry Tropospheric</i>	mm
Wet_Tropo	Koreksi <i>Wet Tropospheric</i>	mm

Variabel	Keterangan	Unit
Inv_Baro	Koreksi <i>Inverse Barometric</i>	mm
DAC	<i>Dynamic Atmospheric Correction</i>	mm
GIM_Iono	Koreksi <i>DORIS Ionospheric</i>	mm
Model_Iono	Koreksi <i>Model Ionospheric</i>	mm
Ocean_Tide	<i>Ocean Tide</i>	mm
LPE_Ocean_Tide	<i>Long-period equilibrium Ocean Tide</i>	mm
Ocean>Loading_Tide	<i>Ocean Loading Tide</i>	mm
Solid_Earth_Tide	<i>Solid Earth Tide</i>	mm
Geoc_Polar_Tide	<i>Geocentric Polar Tide</i>	mm
SURF_TYPE	Tipe permukaan ( <i>Flag</i> )	-
COR_Status_Flag	Status penggunaan koreksi	-
COR_Error_Flag	<i>Flag</i> adanya <i>error</i> pada koreksi	-
SSB	<i>Sea State Bias</i> (EM Bias)	mm

Tabel 2.7 Struktur data CryoSat-2 dalam sub *Internal Corrections Group* (Sumber: Advanced Computer Systems 2015)

Variabel	Keterangan	Unit
Doppler_Range_Correction	Koreksi <i>Doppler range</i> (termasuk slope)	mm
Tx_Rx_Instrument_Range_Correction	<i>Instrument Range Correction, t-r antenna</i>	mm
Rx_Instrument_Range_Correction	<i>Instrument Range Correction, r only antenna</i>	mm
Tx_Rx_Instrument_Sigma0_Correction	<i>Instrument Sigma 0 correction, t-r antenna</i>	dB/100
Rx_Instrument_Sigma0_Correction	<i>Instrument Sigma 0 correction, r only antenna</i>	dB/100



Variabel	Keterangan	Unit
Internal_Phase_C orrection	Koreksi <i>Internal Phase</i>	mili- radians
External_Phase_C orrection	Koreksi <i>External Phase</i>	mili- radians
Noise_Power_Me asurement	Pengukuran daya <i>noise</i>	dB/100
Phase_Slope_Cor rection	Koreksi fase <i>slope</i>	

## 2.6. Danau

Danau merupakan cekungan besar di permukaan bumi yang digenangi oleh air yang relatif stagnan (Tescu 2009). Berdasarkan proses terbentuknya, danau dibedakan dalam dua kategori; danau alami dan danau buatan. Danau alami merupakan danau yang terbentuk hasil dari kegiatan alamiah, seperti pergerakan tektonik, kegiatan vulkanik, pecahan glasial, atau terbentuk akibat ledakan meteor. Sedangkan danau buatan adalah danau yang terbentuk oleh aktivitas manusia yang disengaja melalui pembuatan bendungan pada daerah dataran rendah untuk tujuan dan pemanfaatan tertentu, seperti pembangkit listrik, penampungan air dan pemasok air industri, transportasi, budidaya ikan, perikanan, pengendalian banjir dan lain sebagainya.

### 2.6.1. Danau Towuti

Danau Towuti adalah danau oligotrofik yang terletak di Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan, berjarak 354 km ke arah timur laut dari Kota Makassar sebagai ibukota provinsi. Secara geografis, Danau Towuti terletak pada

koordinat  $2^{\circ}45'0''\text{LS}$   $121^{\circ}30'0''\text{BT}$ . Danau Towuti memiliki kedalaman maksimum 206 mdpl dengan luas sekitar  $562 \text{ km}^2$ . Danau Towuti mendapatkan suplai air dari 26 sungai yang dialirkan melalui Sungai Larona dan bermuara ke Teluk Bone (Sulistioadi dkk. 2015). Habitat pantai memiliki karakter kedalaman relatif dangkal, subtrak berpasir atau berlumpur, ada-tidak ada tanaman air. Sedangkan habitat pulau memiliki karakter pantai yang lebih dalam, subtrak berpasir dan bebatuan/cadas, tidak terdapat tanaman air. Perairan Danau Towuti dimanfaatkan untuk air minum, PLTA taman wisata, perikanan, transportasi dan perairan umum.

### 2.7. *Inland Water Level*

*Inland water level* merupakan tinggi dari permukaan air pada badan air yang terletak di atas daratan relatif terhadap tinggi datum (Vuglinskiy 2009). *Water level* diukur terhadap bidang referensi nasional atau terhadap bidang referensi yang diadopsi (biasa disebut grafik “nol”). Alat ukur yang digunakan untuk mengukur *water level* biasanya terletak di antara hilir dan hulu untuk menghindari pengaruh *drawdown*. Alat ukur juga dapat ditemukan terletak di dekat dengan sumbu keseimbangan (*axis of equilibrium*) untuk memperhalus pengaruh fluktuasi level relatif pada perhitungan perubahan penyimpanan air danau atau waduk dalam periode waktu tertentu.

Dalam pengukuran *water level*, alat ukur yang digunakan terbagi dalam dua tipe:

- 1) *Non-recording gauges*: rambu pasut yang memerlukan operator untuk pencatatan *water level*. Contoh alat ukur yang digunakan:

- a) rambu ukur;
  - b) *ramp* atau pengukur miring; dan
  - c) pengukur yang menggunakan pelampung.
- 2) *Recording gauges*: rambu pasut yang secara otomatis merekam *water level* tiap interval waktu yang telah ditentukan. Instalasi yang biasa digunakan terdiri dari sumur yang didalamnya terdapat pipa dan pelampung yang terhubung dengan roda perekam melalui kawat manik-manik atau pita berlubang. Contoh alat lainnya:
- a) *hydrostatic gauges*;
  - b) *bubble gauges*; dan
  - c) *non-contact gauges* (radar dan ultrasonik).

Untuk menghindari pembacaan negatif, pengukur harus ditetapkan sehingga pembacaan nol di bawah level terendah yang diantisipasi. Penting untuk mempertahankan datum gauge yang sama sepanjang periode pencatatan. Jika memungkinkan, datum tolok ukur lokal harus dikaitkan dengan datum nasional atau regional.

## 2.8. Penelitian Sebelumnya

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan berdasarkan studi literatur terhadap penelitian sebelumnya yang terkait. Pertama, penelitian yang dilakukan oleh Fernandes dkk. (2014) yang berjudul *Atmospheric Corrections for Altimetry Studies over Inland Water*. Dalam penelitiannya dilakukan penggunaan data satelit altimetri multimisi yang digunakan untuk menentukan koreksi atmosferik guna mendapatkan *inland water level* secara presisi. Koreksi atmosferik tersebut berupa *wet tropospheric correction*, *dry tropospheric correction* dan *ionospheric correction* yang didapatkan dari

*Radar Altimeter Database System* (RADS). Peneliti tersebut menyatakan penggunaan koreksi *dynamic atmospheric correction* tidak diperlukan karena danau merupakan sistem tertutup dan koreksi *Sea State Bias* tidak diperlukan karena efek angin diasumsikan sama rata sepanjang *along track*.

Penelitian tersebut juga membandingkan koreksi WTC dari beberapa model diantaranya *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), dan pengukuran *Microwave Radiometer* (MWR). Dalam penelitian tersebut disimpulkan bahwa penggunaan MWR untuk koreksi WTC tidak valid untuk penentuan *inland water level* dikarenakan *footprint* terlalu lebar mengakibatkan data terkontaminasi pengukuran darat. Peneliti merekomendasikan penggunaan metode lain seperti penggunaan model atmosferik.

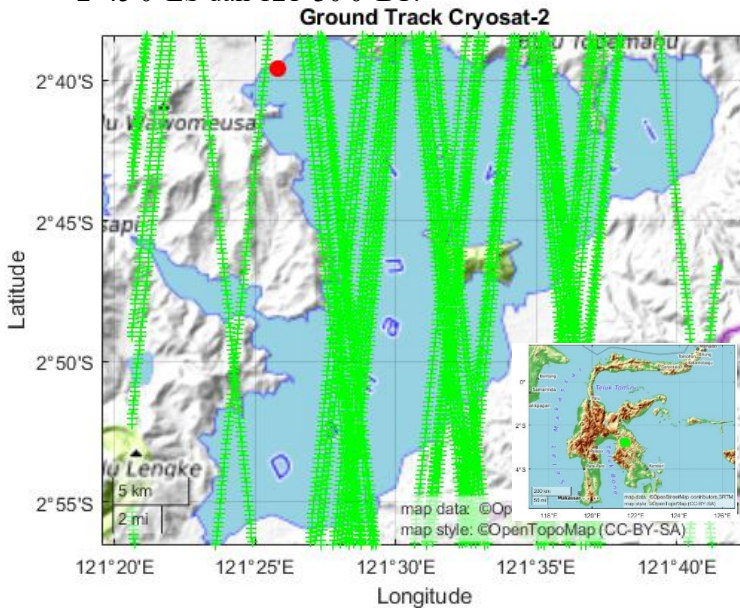
Kedua, penelitian oleh Sulistioadi (2015) dengan judul *Satellite Radar Altimetry for Monitoring Small River and Lakes in Indonesia*. Penelitian ini membahas penggunaan data Envisat Level 2 untuk menentukan nilai *water level* di Sungai Mahakam dan Sungai Karangmumus, Kalimantan Timur. Metode yang digunakan yaitu *empirical retracking*. Hasil dari penelitian ini tidak merekomendasikan klasifikasi sampel berdasarkan jarak ke tepi danau dikarenakan nilai yang dihasilkan tidak konsisten. Pengukuran *water level anomaly* dari satelit altimetri di Danau Matano menunjukkan RMS *error* yang lebih rendah dan koefisien korelasi yang lebih tinggi relatif terhadap *in-situ water level anomaly* dengan peningkatan jarak dari *footprint* satelit ke tepi danau, sedangkan pengukuran altimetri satelit di Danau Towuti menunjukkan sebaliknya.

Ketiga, penelitian yang dilakukan oleh Nielsen et al. (2015) dengan judul *Validation of CryoSat-2 SAR mode based Lake Levels*. Penelitian ini membandingkan *water level* dari lima danau (Skanderborg sø, Mossø, Arresø, Vänern dan Okeechobee) yang didapatkan dari satelit CryoSat-2 Level 1B dengan data pengamatan in-situ dan data satelit Envisat. Metode yang digunakan dalam penentuan *water level* menggunakan pencarian nilai median dari pengukuran *along-track* ketimbang nilai *mean*. Peneliti tersebut menyatakan bahwa penggunaan nilai mean berpotensi adanya nilai yang tidak berasal dari pengukuran tinggi muka air. Hasil didapatkan nilai *mean water level* yang didapatkan dari satelit CryoSat-2 memiliki presisi dalam satuan sentimeter sedangkan penggunaan satelit Envisat memiliki presisi antara 7 cm hingga 20 cm.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil studi kasus yang terletak di Danau Towuti, Provinsi Sulawesi Selatan dengan koordinat  $2^{\circ}45'0''\text{LS}$  dan  $121^{\circ}30'0''\text{BT}$ .



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian disertai dengan lintasan *along-track* CryoSat-2 (garis hijau) dan lokasi pengukuran in-situ (merah)

Daerah yang dijadikan lokasi penelitian ini dilalui oleh orbit satelit CryoSat-2 sebanyak 10 *Cycle* dengan nomor 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 dan 11.

### 3.2 Data dan Peralatan

#### 3.2.1 Data

- a. Data satelit CryoSat-2 Level 2 *Intermediate* SAR-mode tahun 2011-2018 yang diunduh melalui FTP (<ftp://science-pds.cryosat.esa.int>);
- b. Data pengukuran muka air Danau Towuti tahun 2011-2012 (Stasiun Pasut Timampu), yang didapatkan dari Divisi Operation Excellence, PT Vale Indonesia, dan;
- c. Data DEM yang didapatkan melalui Inageoportal. Berikut nama file DEM yang digunakan dalam penelitian ini:
  1. DEMNAS\_2113-321\_v1.0.tif
  2. DEMNAS\_2113-322\_v1.0.tif
  3. DEMNAS\_2113-323\_v1.0.tif
  4. DEMNAS\_2113-324\_v1.0.tif
  5. DEMNAS\_2113-341\_v1.0.tif
  6. DEMNAS\_2113-342\_v1.0.tif
  7. DEMNAS\_2113-343\_v1.0.tif
  8. DEMNAS\_2113-344\_v1.0.tif
  9. DEMNAS\_2213-111\_v1.0.tif
  10. DEMNAS\_2213-112\_v1.0.tif
  11. DEMNAS\_2213-113\_v1.0.tif
  12. DEMNAS\_2213-114\_v1.0.tif
  13. DEMNAS\_2213-131\_v1.0.tif
  14. DEMNAS\_2213-132\_v1.0.tif
  15. DEMNAS\_2213-133\_v1.0.tif
  16. DEMNAS\_2213-134\_v1.0.tif

### 3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan selama penelitian tugas akhir ini yaitu:

a. Perangkat keras

Komputer Desktop Lenovo T720m

Spesifikasi:

Tabel 3.1 Spesifikasi Komputer

Prosesor	Intel® Core™ i7-8700 3,20 GHz (4 Core/12 Thread)
RAM	16 GB DDR4 2666 MHz

b. Perangkat lunak

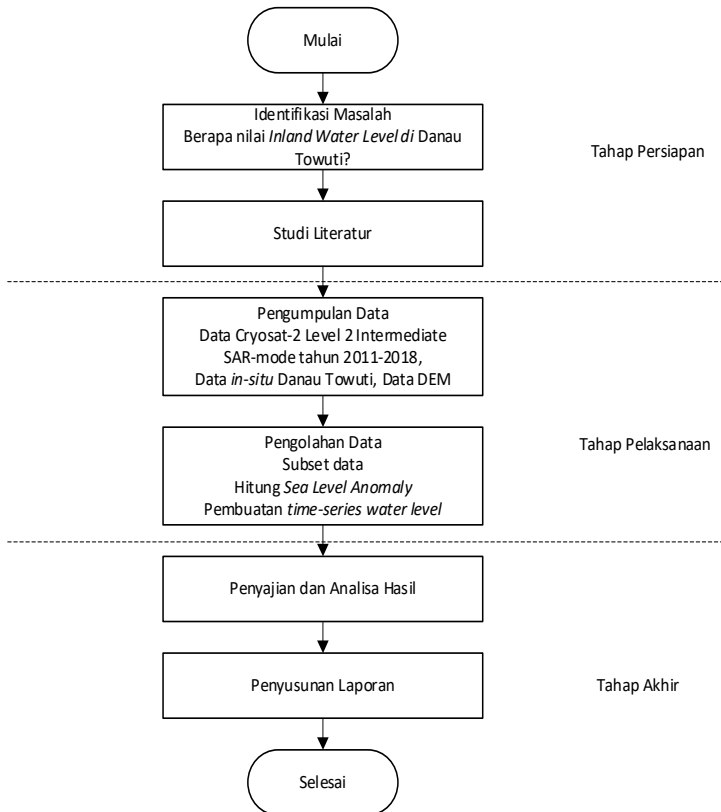
- Matlab R2019a, digunakan untuk pengolahan data CryoSat-2 dan data muka air danau;
- QGIS 3.6, digunakan untuk pembuatan ROI (*Region of Interest*) Danau Towuti.

### 3.3 Metodologi Pekerjaan

#### 3.3.1 Tahap Pelaksanaan

Adapun metodologi pelaksanaan penelitian ini sebagai berikut:





Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan diagram alir pelaksanaan:

1. Tahap Persiapan
  - 1.1 Identifikasi masalah

Identifikasi masalah bertujuan untuk mengenali permasalahan yang akan dibahas pada proses penelitian dan mengerucutkannya. Dalam penelitian ini, hal yang akan diteliti adalah *inland water level* Danau Towuti dengan menggunakan data satelit altimetri CryoSat-2.

## 1.2 Studi literatur

Studi literatur yang dilakukan berupa pengumpulan referensi yang akan menunjang pemahaman dalam memproses data satelit altimetri sehingga dapat ditentukan metode yang tepat untuk mengolah data sesuai dengan permasalahan yang telah ditentukan. Literatur juga digunakan sebagai bahan analisis pada tahap akhir terhadap hasil penelitian yang akan didapatkan.

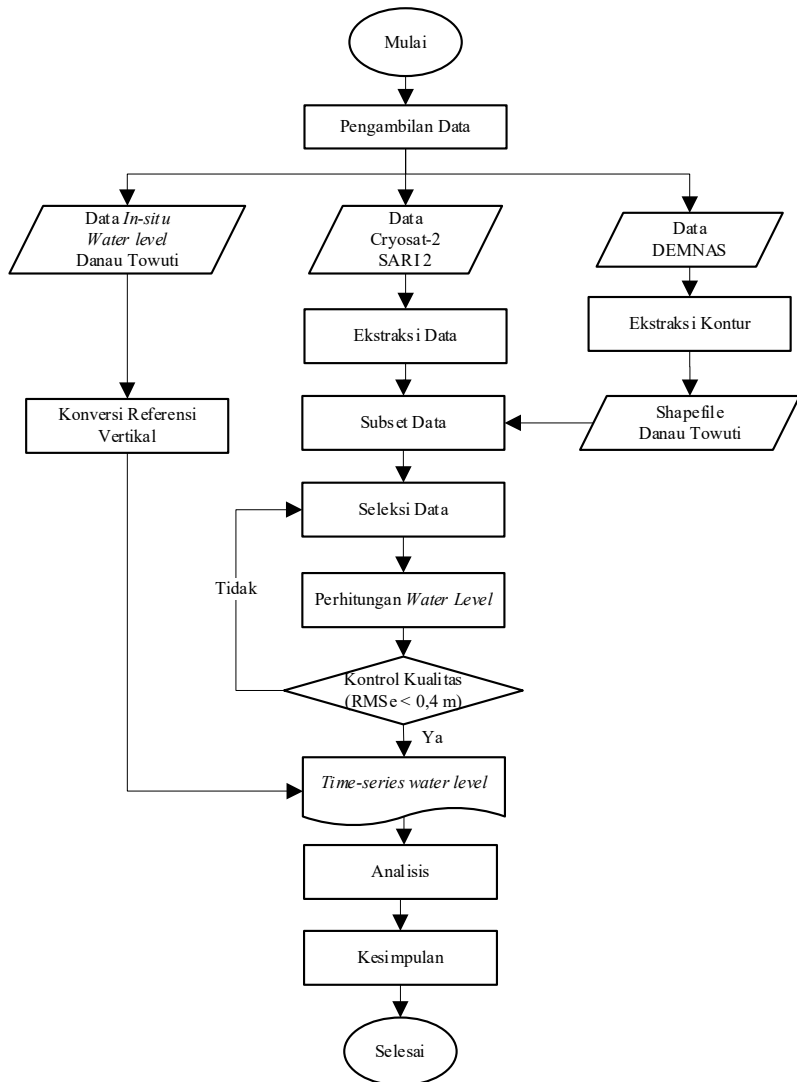
## 2. Tahap Pelaksanaan

### 2.1 Pengambilan data

Pengambilan data bertujuan untuk mengumpulkan data-data yang diperlukan untuk melakukan penelitian. Data yang diambil adalah data satelit altimetri CryoSat-2, data muka air Danau Towuti yang diperoleh dari PT. Vale Indonesia Tbk. dan data DEM yang didapatkan melalui Inageoportal.

### 2.2 Pengolahan data

Data yang telah tersedia akan dilakukan pengolahan data. Kemudian dari data tersebut akan digunakan untuk menghitung nilai *inland water level* Danau Towuti. Detail penelitian untuk proses pengolahan dapat ditunjukkan oleh diagram alir di laman berikutnya.



Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data

Penjelasan diagram alir pengolahan data sebagai berikut:

- 1) Pengambilan data CryoSat-2 SAR Mode Level 2 *Intermediate* tahun 2011-2018 sebagai data utama dan data muka air Danau Towuti sebagai data pembanding. Sedangkan data DEM digunakan sebagai pembuatan *Region of Interest* (ROI) berupa *shapefile* yang bertujuan untuk subset area.
- 2) Data CryoSat-2 dilakukan ekstraksi data untuk menseleksi data yang diperlukan. Komponen yang akan diambil yaitu lintang, bujur, waktu akuisisi, tinggi orbit satelit, *Range*, koreksi troposfer (kering dan basah), koreksi ionosfer, komponen pasut bumi (*ocean loading tide*, *ocean tide*, *geocentric polar tide* dan *solid earth tide*) dan *Geoid*.

Tabel 3.2 Parameter koreksi pada CryoSat-2 SAR  
*Intermediate Level 2*

Parameter	Didapatkan dari
<i>Dry Tropospheric</i>	Dihitung <i>processor</i> dengan input data ECMWF <i>surface pressure files</i>
<i>Wet Tropospheric</i>	ECMWF <i>analysed grid</i>
<i>Ionospheric</i>	1. DORIS 2. <i>Global Ionospheric Map</i> (GIM), Bent Model (alternatif)
<i>Dynamic Atmospheric Correction</i>	MOG2D
<i>Inverse Barometric</i>	Turunan dari data Meteo France

Parameter	Didapatkan dari
<i>Sea State Bias</i>	Diturunkan dari CLS dan ESA
<i>Solid Earth Tide</i>	<i>Cartwright</i> model
<i>Geocentric Polar Tide</i>	Turunan dari file <i>pole location</i>
<i>Ocean Loading Tide</i>	FES2004
<i>Ocean Tide</i>	FES2004
<i>Mean Sea Surface</i>	1. CNES-CLS11 MSS 2. DTU10 MSS
<i>Geoid</i>	EGM2008

- 3) Pemrosesan data DEMNAS dimulai dengan mencari elevasi yang mewakili ketinggian dari muka air danau pada data tersebut. Setelah didapatkan nilai elevasi yang mewakili bentuk dari Danau Towuti kemudian dilakukan ekstraksi kontur. Kontur tersebut dilakukan pemilihan bentuk dari Danau Towuti. Setelah didapatkan bentuk dari danau, kontur yang tidak membentuk danau dibuang. Kemudian kontur tersebut disimpan dalam format *shapefile* yang akan digunakan sebagai ROI untuk keperluan subset data.
- 4) Setelah dilakukan ekstraksi, data CryoSat-2 selanjutnya dilakukan pengecekan kriteria data berdasarkan buku panduan satelit CryoSat-2. Kriteria untuk subset data yang dipilih pada data altimetri yaitu perairan tertutup.
- 5) Selanjutnya dilakukan perhitungan *water level* menggunakan referensi vertikal geoid dengan parameter yang didapat dari data satelit. Data *water level* tersebut akan melalui proses kontrol kualitas. Berdasarkan artikel Fernandes (2014), kriteria yang digunakan yaitu nilai

*water level* hasil dari pemrosesan data satelit memiliki RMSE kurang dari 0,4 meter. Adapun bentuk matematis dari RMSE yang digunakan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (4.1)$$

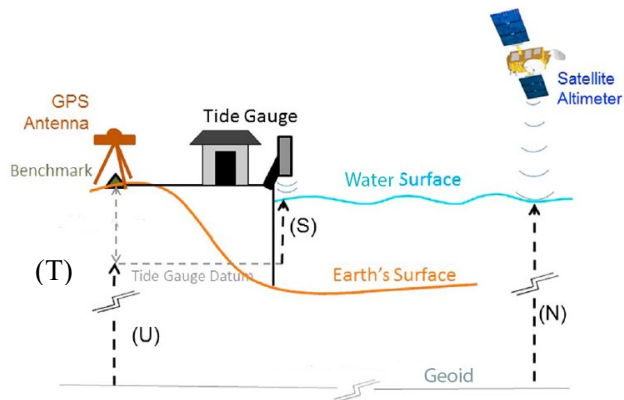
dengan:

$n$  = banyaknya *record* dalam satu *along-track*,

$x_i$  = *water level* pada hari ke- $i$ ,

$y_i$  = *mean water level* pada hari ke- $i$ .

- 6) Sebelum dilakukan perbandingan, *water level* yang ada pada data in-situ dilakukan transformasi referensi vertikal sesuai dengan referensi vertikal yang digunakan pada data altimetri.



Gambar 3.4 Penentuan tinggi muka air terhadap bidang referensi (Sumber: Wöppelmann dan Marcos 2016)

Pada Gambar 3.4, langkah-langkah dalam mentransformasikan referensi vertikal yaitu dengan mengetahui jarak dari nol rambu terhadap geoid (ditunjukkan dengan notasi  $U$ ). Cara mengetahui jarak tersebut dapat dicari melalui penentuan undulasi pada titik *benchmark* dengan pengukuran posisi dan tinggi ellipsoid menggunakan GPS pada *benchmark*. Setelah didapatkan koordinat dan tinggi ellipsoid, cari nilai undulasi titik *benchmark* tersebut melalui web SRGI (<http://srgi.big.go.id/peta/geoid.jsp>). Kemudian undulasi tersebut digunakan untuk menentukan tinggi titik *benchmark* terhadap geoid. Apabila *offset* antara nol rambu terhadap tinggi *benchmark* diketahui, maka tinggi nol rambu terhadap geoid dapat dicari.

- 7) Hasil dari pemrosesan data CryoSat-2 akan menghasilkan nilai *water level* yang akan dibandingkan dengan data pengukuran *water level* in-situ yang bertujuan untuk memvalidasi data altimetri. Kemudian data hasil pemrosesan CryoSat-2 tersebut disusun dalam bentuk grafik *water level* terhadap waktu.

### 3. Tahap Akhir

#### 3.1 Penyajian dan Analisa Hasil

Hasil penelitian ini berupa grafik *time-series water level* Danau Towuti yang diturunkan dari data CryoSat-2 tahun 2011-2018.

#### 3.2 Penyusunan Laporan

Setelah melakukan kegiatan penelitian tahap yang dilakukan adalah penyusunan laporan Tugas Akhir dimana format penyusunan laporan mengikuti aturan penyusunan laporan Tugas Akhir.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

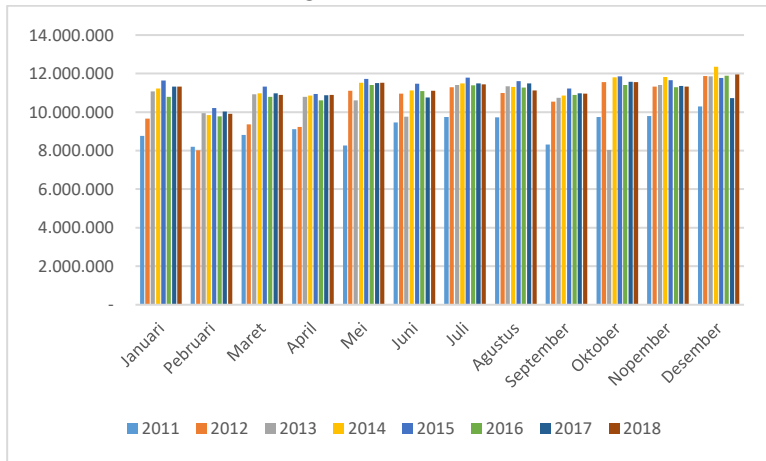
#### 4.1. Ekstraksi Data CryoSat-2

Tahap awal dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini yaitu pengambilan dan ekstraksi data. Data *binary* yang didapatkan dari FTP berformat ekstensi \*.dbf. File tersebut dibaca melalui Matlab menggunakan fungsi yang disediakan oleh *European Space Agency* (ESA). Dalam tahap ini dilakukan ekstraksi data untuk memperoleh parameter-parameter berikut ini:

1. *IAT second*
2. *IAT days*
3. *Cycle*
4. *Surface Type (Flag)*
5. *Latitude*
6. *Longitude*
7. *Satellite height*
8. *Retracked Range*
9. *Window Delay*
10. *Dry Tropospheric Correction*
11. *Wet Tropospheric Correction*
12. *Ionospheric Correction*
13. *Ocean Loading Tide*
14. *Ocean Tide*
15. *Geocentric Polar Tide*
16. *Solid Earth Tide*
17. *Geoid*



Karena waktu yang didapatkan berformat IAT, diperlukan konversi terlebih dahulu ke dalam format UTC. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menentukan tinggi muka air Danau Towuti yang disimpan dalam bentuk data berformat \*.mat yang memuat data selama satu bulan. Hasil dari proses ekstraksi data CryoSat-2 SAR *Intermediate Level 2* untuk tahun 2011-2018 menghasilkan 1.036.208.918 *record*.



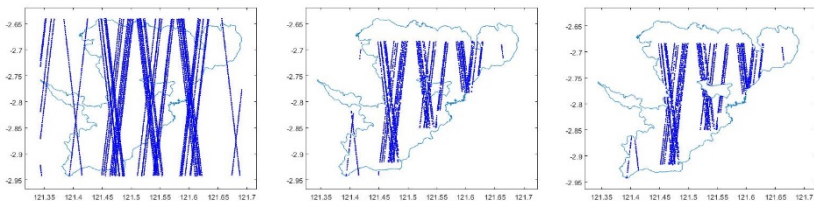
Gambar 4.1 Jumlah *record* per bulan CryoSat-2 SAR *Intermediate Level 2*

#### 4.2. Subset Data CryoSat-2

Setelah didapatkan data yang memuat parameter-parameter yang dibutuhkan, tahap selanjutnya yaitu proses subset data. Subset data diawali dengan mencari nilai koordinat maksimum dan minimum dari Danau Towuti. Subset tahap pertama ini masih menggunakan perpotongan persegi. Proses ini menghasilkan data sebanyak 5.427 *record*.

Setelah dilakukan subset tahap pertama, dilanjutkan dengan subset tahap kedua yang berdasarkan *indicator flag* dari *Surface Type* yang ada di dalam data. Dalam hal ini, nilai indikator yang dipilih adalah angka 1 (satu) yang menandakan laut tertutup atau danau. Hasilnya, didapatkan data sebanyak 2.334 *record*.

Karena hasil proses subset tahap kedua kurang memuaskan, maka dilanjutkan dengan proses subset tahap ketiga, *masking* menggunakan bentuk dari *shapefile*. *Shapefile* tersebut didapatkan dari hasil pemolesan data DEMNAS dengan cara membuat produk turunan berupa data vektor kontur. Kontur yang telah dibuat kemudian dipilih berdasarkan bentuk yang mewakili dari Danau Towuti. Proses ini menghasilkan data sebanyak 2.151 *record*.



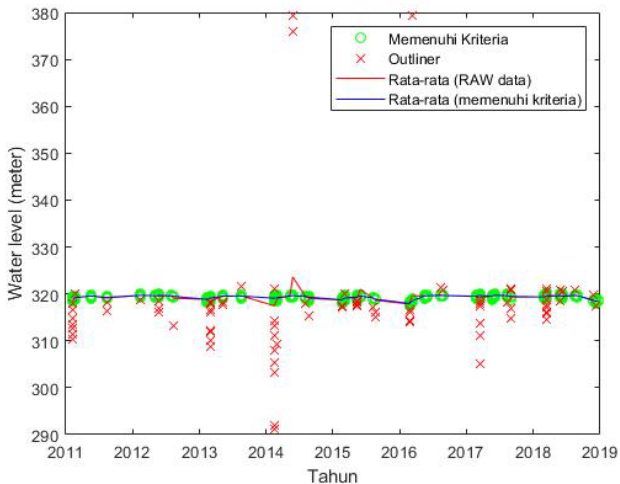
Gambar 4.2 Gambar pengeplotan titik pengukuran CryoSat-2 (kiri: subset, tengah: subset+*flag*, kanan: subset+*flag*+*mask*)

#### 4.3. Perhitungan *Water level*

Setelah data melalui proses subset, selanjutnya adalah proses perhitungan *water level*. Referensi tinggi yang digunakan dalam perhitungan *water level* dalam kasus ini menggunakan geoid EGM2008 yang terdapat di dalam data CryoSat-2. Perhitungan *inland water level* sama halnya

dengan penentuan *sea level anomaly*, namun tanpa adanya perhitungan koreksi atmosfer dinamis ( $\Delta R_{DAC}$ ) karena danau atau waduk merupakan sistem tertutup. Koreksi SSB ( $\Delta R_{SSB}$ ) juga tidak diterapkan, karena efek angin pada danau atau waduk cenderung dirata-ratakan di sepanjang lintasan. Referensi MSS diganti dengan geoid dikarenakan pemodelan MSS didapatkan dari rata-rata pengukuran SSH selama beberapa tahun sepanjang *fixed along-track* (Vignudelli dkk. 2019).

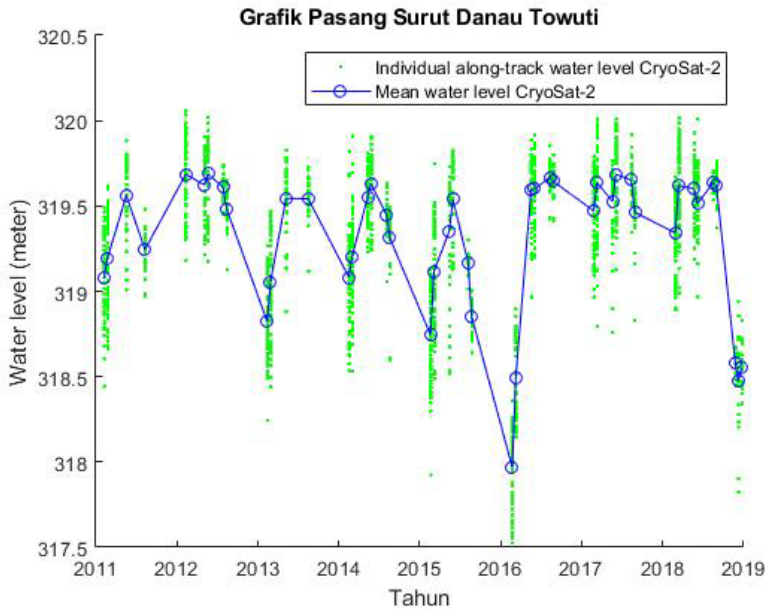
Sebelum dilakukan proses perhitungan *water level*, data dipisah berdasarkan waktu akuisisi yang terdapat dalam satu lintasan (*along track*). Setelah dilakukan pemisahan, dilakukan perhitungan nilai *water level* (tiap *record*), *mean water level* (tiap *along-track*) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) dari *mean water level* berdasarkan waktu akuisisi (harian) yang sama.



Gambar 4.3 Grafik *water level* yang memenuhi kriteria (hijau) dan data *outliner* (merah)

Kemudian, proses menghilangkan data *outliner* dilakukan dengan cara menghapus beberapa *record* yang memiliki kesalahan residu yang besar terhadap nilai *mean water level* hingga mendapatkan nilai RMSE di bawah 0,4 meter (Vieira dkk. 2018). Angka tersebut dipilih karena dianggap mengeliminasi data yang memiliki kesalahan terbesar dan apabila angka yang dipilih lebih kecil menyebabkan banyaknya data yang terbuang.

Berdasarkan penentuan *mean water level*, data *outliner* ini memiliki kesalahan tertinggi terhadap *mean water level* hingga puluhan meter (tepatnya di angka 50 meter). Hal ini terjadi karena adanya penerimaan sinyal dari daratan yang ada di tepi danau pada saat pengukuran oleh satelit. Apabila penentuan *mean water level* tidak melalui proses pemilihan data maka akurasi data menurun sehingga menghasilkan kesalahan penentuan *mean water level* dalam satuan meter (2 hingga 4 meter). Dari hasil proses pemilihan data, didapatkan sebanyak 2.052 *record* yang memenuhi syarat. Berikut ini merupakan hasil pengolahan data CryoSat-2 yang memenuhi syarat:



Gambar 4.4 Grafik *water level* tahun 2011-2018 hasil pengolahan data CryoSat-2 setelah data *outliner* dihilangkan

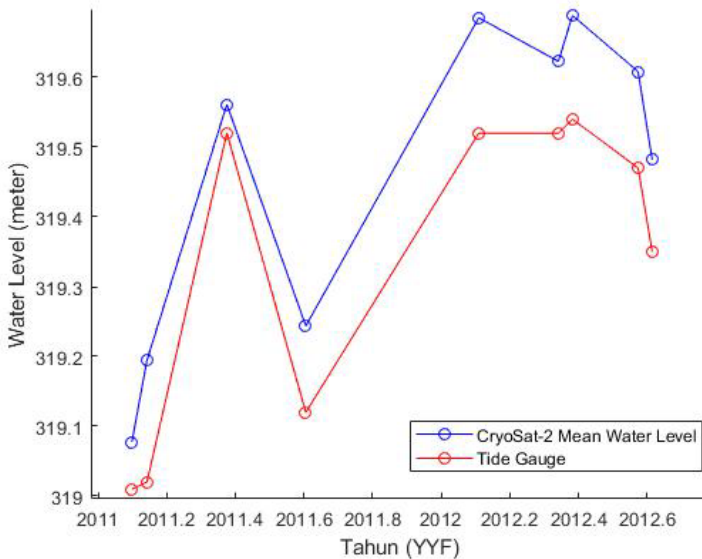
Tabel 4.1 Tabel hasil perhitungan *water level* per *along-track*

YYF	Jumlah <i>record</i> bersih	<i>water level</i> rata-rata (m)	RMSE (m)	<i>Cycle</i>
2011.09863	65 dari 73	319,077	0,246	2
2011.14247	67 dari 68	319,194	0,277	3
2011.37534	44 dari 44	319,561	0,230	3
2011.60548	30 dari 32	319,244	0,114	3
2012.10929	79 dari 80	319,685	0,217	4
2012.34153	50 dari 50	319,623	0,182	4
2012.38251	45 dari 48	319,689	0,231	4
2012.57377	25 dari 25	319,608	0,071	5
2012.61475	29 dari 31	319,482	0,106	5

YYF	Jumlah <i>record</i> bersih	<i>water level</i> rata-rata (m)	RMSE (m)	<i>Cycle</i>
2013.11507	66 dari 66	318,822	0,228	6
2013.15616	61 dari 69	319,056	0,292	6
2013.34795	41 dari 43	319,545	0,210	6
2013.62192	33 dari 34	319,542	0,115	6
2014.12329	69 dari 79	319,082	0,274	7
2014.16438	57 dari 58	319,204	0,286	7
2014.35616	45 dari 45	319,552	0,175	7
2014.39726	40 dari 43	319,629	0,205	7
2014.58904	29 dari 30	319,448	0,107	7
2014.63014	29 dari 31	319,312	0,217	7
2015.13151	73 dari 76	318,744	0,252	8
2015.17534	64 dari 65	319,117	0,303	8
2015.36438	44 dari 50	319,353	0,338	8
2015.40822	36 dari 37	319,538	0,237	8
2015.59726	21 dari 22	319,168	0,060	9
2015.63836	29 dari 31	318,855	0,092	9
2016.14208	74 dari 78	317,969	0,223	10
2016.18579	55 dari 56	318,495	0,231	10
2016.37432	51 dari 51	319,594	0,202	10
2016.41530	36 dari 36	319,600	0,198	10
2016.60656	22 dari 23	319,666	0,083	10
2016.64754	29 dari 30	319,644	0,095	10
2017.14795	79 dari 79	319,471	0,227	11
2017.18904	67 dari 73	319,635	0,278	11
2017.38082	40 dari 40	319,527	0,225	11
2017.42192	45 dari 45	319,685	0,223	11
2017.61096	21 dari 22	319,652	0,133	10
2017.65479	30 dari 34	319,463	0,156	10
2018.15616	80 dari 80	319,342	0,213	11
2018.19726	61 dari 74	319,620	0,286	11
2018.38904	50 dari 52	319,601	0,183	11
2018.43014	39 dari 42	319,513	0,207	11
2018.62192	24 dari 25	319,636	0,040	11
2018.66301	27 dari 27	319,620	0,093	11
2018.89589	9 dari 10	318,584	0,082	11
2018.93151	20 dari 22	318,473	0,283	11
2018.97534	22 dari 22	318,550	0,121	11

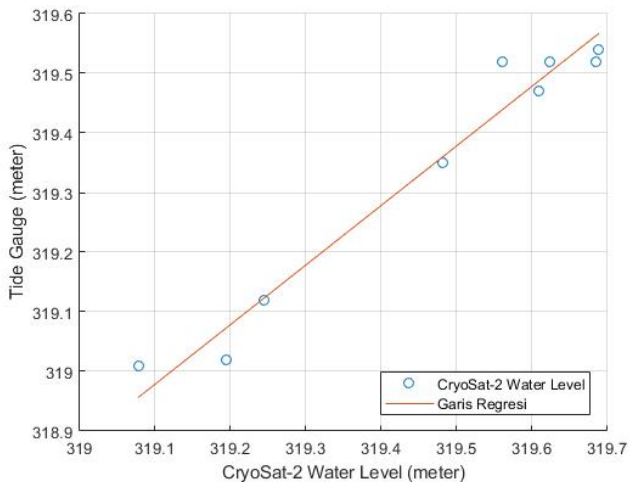
#### 4.4. Perbandingan Data *In-situ* terhadap CryoSat-2

Setelah didapatkan data yang bersih dari *outliner*, data kemudian dibandingkan dengan data muka air Danau Towuti. Perbandingan dilakukan untuk memvalidasi nilai *water level* yang didapatkan dari data altimetri menyerupai data *in-situ*. Dikarenakan keterbatasan data *in-situ* yang didapat, maka perbandingan data dilakukan untuk tahun 2011 hingga 2012. Sebelum perbandingan data, dilakukan pencarian tanggal yang sama antara data *in-situ* dengan data altimetri. Variabel yang dibandingkan yaitu *mean water level* yang didapatkan dari data altimetri terhadap data *in-situ water level* yang memiliki waktu akuisisi harian yang sama.



Gambar 4.5 Perbandingan *water level* antara data *in-situ* dengan CryoSat-2 terhadap waktu pengukuran yang sama

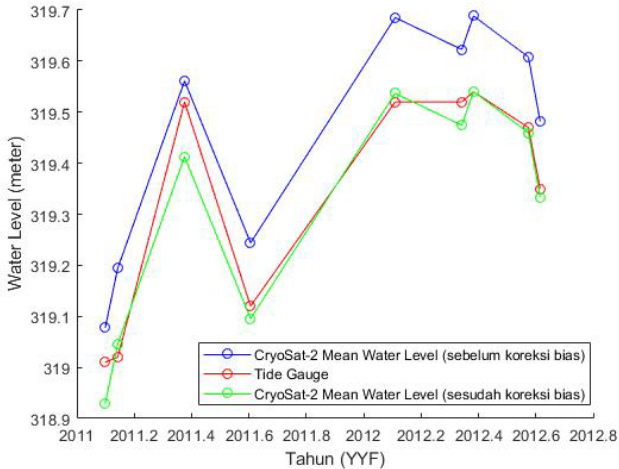
Pada Gambar 4.5 grafik menunjukkan warna merah menunjukkan pengukuran *in-situ* sedangkan warna biru menandakan *mean water level* yang didapatkan dari CryoSat-2. Dengan jumlah sampel (N) berjumlah 9, didapatkan hasil perbandingan *water level* Danau Towuti antara data CryoSat-2 dengan data *in-situ*, nilai koefisien korelasi sebesar 0,981 dan nilai RMSE sebesar 0,136 meter dengan *range* sebesar 0,611 meter. Menurut Asuero, Sayago, dan González (2006), nilai koefisien tersebut menunjukkan tingkat hubungan kedua data sangat tinggi. Hubungan antara CryoSat-2 *water level* dengan *in-situ water level* digambarkan dengan persamaan garis regresi linier  $Y = 0,9996 X - 4,7038 \times 10^{-6}$ . Hal ini menunjukkan bahwa data CryoSat-2 nilai *water level* yang dihasilkan dari pengolahan data CryoSat-2 memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi.



Gambar 4.6 Hubungan *water level* antara data *in-situ* terhadap data CryoSat-2



Perhitungan koreksi bias didapatkan melalui penjumlahan dari pengurangan nilai rata-rata *water level* CryoSat-2 terhadap nilai rata-rata *in-situ water level* berdasarkan waktu akuisisi data yang sama dikuadratkan (Nielsen dkk. 2015).



Gambar 4.7 Perbandingan *water level* antara data *in-situ* dengan CryoSat-2 terkoreksi

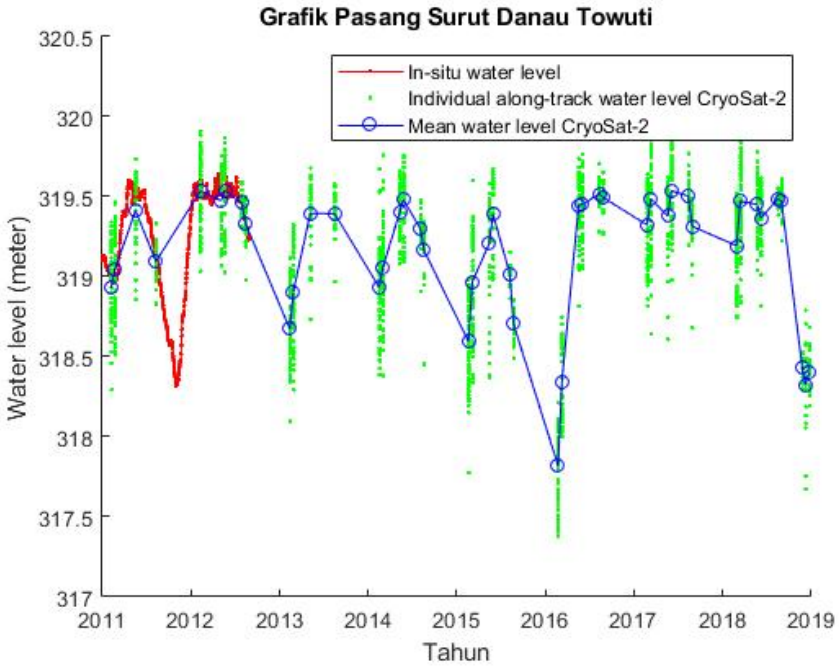
Tabel 4.2 Perhitungan kesalahan bias data CryoSat-2

YYF	<i>in-situ water level</i> (m)	CryoSat-2 <i>water level</i> (m)	CryoSat-insitu (m)	(CryoSat-insitu) <sup>2</sup> (m)
2011.09863	319,010	319,077	0,067	0,004
2011.14247	319,020	319,194	0,174	0,030
2011.37534	319,520	319,561	0,041	0,002
2011.60548	319,120	319,244	0,124	0,015
2012.10929	319,520	319,685	0,165	0,027
2012.34153	319,520	319,623	0,103	0,011
2012.38251	319,540	319,689	0,149	0,022
2012.57377	319,470	319,608	0,138	0,019
2012.61475	319,350	319,482	0,132	0,017
			Total	0,148

Pada Gambar 4.7 warna hijau menunjukkan *mean water level* dari data altimetri yang telah terkoreksi bias, warna biru menunjukkan *mean water level* dari data altimetri yang belum terkoreksi bias dan warna merah menunjukkan *mean water level* dari data in-situ. Pada Tabel 4.2 menunjukkan proses perhitungan deviasi *mean water level* dari data altimetri terhadap data in-situ dengan cara menghitung selisih *mean water level* antara data altimetri dengan data in-situ, kemudian dikuadratkan lalu semua hasil perhitungan tiap waktu pengukuran dijumlahkan. Dari hasil perhitungan tersebut didapatkan kesalahan bias (deviasi) sebesar 0,148 meter, dengan kesalahan bias tertinggi sebesar 0,174 meter sedangkan kesalahan bias terendah sebesar 0,041 meter. Bias yang tinggi terjadi karena adanya dua nilai *water level* yang memiliki frekuensi data yang tinggi sehingga menyebabkan pergeseran nilai *mean water level*. Selanjutnya koreksi bias diterapkan pada keseluruhan *mean water level* yang didapat dari hasil pengolahan data altimetri.

#### 4.5. Time-Series Water Level

*Time-series water level* didapatkan dari nilai *water level* rata-rata per *along-track* CryoSat-2 yang telah terkoreksi bias terhadap data in-situ. Berikut adalah grafik *time-series water level* Danau Towuti yang didapatkan dari hasil pengolahan data altimetri:



Gambar 4.8 Grafik *time-series water level* Danau Towuti

Tabel 4.3 Hasil pengolahan *mean water level* data CryoSat-2

YYF	<i>Water level</i> (m)	RMSE (m)	YYF	<i>Water level</i> (m)	RMSE (m)
2011.09863	318,929	0,246	2012.57377	319,460	0,071
2011.14247	319,046	0,277	2012.61475	319,334	0,106
2011.37534	319,413	0,230	2013.11507	318,674	0,228
2011.60548	319,095	0,114	2013.15616	318,908	0,292
2012.10929	319,537	0,217	2013.34795	319,396	0,210
2012.34153	319,474	0,182	2013.62192	319,394	0,115
2012.38251	319,540	0,231	2014.12329	318,934	0,274
			2014.16438	319,055	0,286

YYF	Water level (m)	RMSE (m)	YYF	Water level (m)	RMSE (m)
2014.35616	319,403	0,175	2017.14795	319,323	0,227
2014.39726	319,481	0,205	2017.18904	319,487	0,278
2014.58904	319,300	0,107	2017.38082	319,378	0,225
2014.63014	319,164	0,217	2017.42192	319,537	0,223
2015.13151	318,596	0,252	2017.61096	319,504	0,133
2015.17534	318,969	0,303	2017.65479	319,315	0,156
2015.36438	319,205	0,338	2018.15616	319,194	0,213
2015.40822	319,389	0,237	2018.19726	319,471	0,286
2015.59726	319,019	0,060	2018.38904	319,452	0,183
2015.63836	318,706	0,092	2018.43014	319,365	0,207
2016.14208	317,820	0,223	2018.62192	319,488	0,040
2016.18579	318,346	0,231	2018.66301	319,471	0,093
2016.37432	319,446	0,202	2018.89589	318,435	0,082
2016.41530	319,452	0,198	2018.93151	318,325	0,283
2016.60656	319,517	0,083	2018.97534	318,401	0,121
2016.64754	319,496	0,095			

Data yang didapatkan dari pengolahan CryoSat-2 SAR *Intermediate Level 2* tahun 2011-2018 untuk pengamatan *water level* Danau Towuti tercatat hanya 46 *record* dengan rincian tahun 2011 dan 2013 tercatat hanya 4 pengamatan, tahun 2012 tercatat hanya 5 pengamatan, tahun 2014 hingga 2017 tercatat hanya 6 pengamatan serta tahun 2018 tercatat 9 pengamatan. Danau Towuti tidak teramati oleh satelit CryoSat-2 pada bulan Januari, April, September dan Oktober untuk tahun 2011 hingga 2018. Karena terdapat waktu yang tidak teramati tersebut dan sedikitnya waktu akuisisi menyebabkan tidak dapat dilakukannya analisa pola musiman.

Berdasarkan hasil pengolahan data CryoSat-2, grafik pada Gambar 4.8 menunjukkan nilai *water level* terendah sebesar  $317,820 \pm 0,223$  meter terjadi pada tanggal 22 Pebruari 2016. Sedangkan nilai *water level* tertinggi sebesar  $319,540 \pm 0,231$  meter terjadi pada tanggal 20 Mei 2012. Penurunan *water level* secara signifikan terjadi antara tanggal 30 Mei 2015 hingga 22 Pebruari 2016 sebesar -1,199 meter. Kemudian terjadi peningkatan *water level* secara signifikan pada tanggal 22 Pebruari 2016 hingga tanggal 10 Agustus 2016 sebesar 1,697 meter.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa CryoSat-2 SAR Level 2 *Intermediate* mampu digunakan untuk mengamati *inland water level* pada danau dimana satelit CryoSat-2 melintas. Waktu tercepat CryoSat-2 mengamati kembali Danau Towuti selama 13 hari dan waktu terlama selama 184 hari. Hal ini terjadi dikarenakan satelit CryoSat-2 membutuhkan 369 hari untuk *full repeat cycle* sehingga mengalami pergeseran *ground track*. Dalam penentuan *inland water level* menggunakan data altimetri perlu dilakukan pemilihan data dari *outliner* dikarenakan sangat mempengaruhi nilai *water level* yang disebabkan kontaminasi daratan sekitar danau pada *footprint* satelit.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil pengolahan data, kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Aplikasi satelit altimetri pada pengukuran *inland water level* sama seperti pengukuran *sea level anomaly* pada permukaan laut, namun yang membedakan yaitu pada penentuan *inland water level* tidak adanya perhitungan *sea state bias*, *atmospheric pressure*, dan menggunakan referensi geoid ketimbang *mean sea surface*;
- b. Dalam melakukan analisis *inland water level* dengan data satelit altimetri, tahapan yang perlu dilakukan yaitu diawali dengan subset data sesuai area penelitian, mengeliminasi data *outliner*, kemudian membandingkan dengan data *in-situ* dan diakhiri dengan pembuatan *time-series water level*;
- c. Dengan waktu pengukuran yang sama, deviasi nilai *water level* Danau Towuti antara hasil pengukuran *in-situ* dengan hasil pengukuran menggunakan satelit CryoSat-2 sebesar 0,148 meter.

#### **5.2. Saran**

Saran yang dapat diberikan setelah pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini tidak dapat menghasilkan *time-series water level* secara kontinyu sehingga diharapkan untuk penelitian selanjutnya menggunakan satelit altimetri dengan *repeat orbit* yang cukup singkat;

- b. Karena satelit CryoSat-2 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan satelit altimetri SAR, maka penelitian selanjutnya dapat dilakukan perbandingan data terhadap satelit altimetri konvensional;
- c. Apabila *footprint* satelit altimetri yang digunakan lebih besar daripada objek penelitian, sebaiknya ganti studi kasus untuk menghindari salah interpretasi data.

## DAFTAR PUSTAKA

- Advanced Computer Systems. 2015. *CryoSat Ground Segment. Instrument Processing Facility L2. L2 Product Format Specification.*
- Alsdorf, Douglas E., Ernesto Rodríguez, dan Dennis P. Lettenmaier. 2007. "Measuring surface water from space." *Reviews of Geophysics* 45(2006):1–24.
- Andersen, O. B. dan R. Scharroo. 2011. "Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: And Implications for Mean Sea Surface Determination." Hal. 103–45 in *Coastal Altimetry.*
- Asuero, A. G., A. Sayago, dan A. G. González. 2006. "The correlation coefficient: An overview." *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 36(1):41–59.
- Barbosa, Susana M. 2012. "Atmospheric correction of satellite altimetry observations and sea-level variability in the NE Atlantic." *Advances in Space Research* 50(8):1077–84.
- Boergens, Eva, Denise Dettmering, dan Florian Seitz. 2019. "Observing water level extremes in the Mekong River Basin: The benefit of long-repeat orbit missions in a multi-mission satellite altimetry approach." *Journal of Hydrology* 570(June 2018):463–72.
- Bouzinac, C. 2012. *CryoSat Product Handbook.* Vol. DLFE-3605.
- Fernandes, M. Joana, Clara Lázaro, Alexandra L. Nunes, dan Remko Scharroo. 2014. "Atmospheric corrections for altimetry studies over inland water." *Remote Sensing* 6(6):4952–97.
- Fernandes, M. Joana, Nelson Pires, Clara Lázaro, dan Alexandra L. Nunes. 2013. "Tropospheric delays from GNSS for application in coastal altimetry." *Advances in Space Research* 51(8):1352–68.
- Huang, Qi, Di Long, Mingda Du, Chao Zeng, Xingdong Li, Aizhong Hou, dan Yang Hong. 2018. "An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels



- using retracked altimetry data.” *Remote Sensing of Environment* 211(April):112–28.
- Joana Fernandes, M., Clara Lázaro, Michaël Ablain, dan Nelson Pires. 2015. “Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions.” *Remote Sensing of Environment* 169:50–74.
- Kleinherenbrink, M., P. G. Ditmar, dan R. C. Lindenbergh. 2014. “Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction.” *Remote Sensing of Environment* 152:38–50.
- Moore, P., S. J. Birkinshaw, A. Ambrózio, M. Restano, dan J. Benveniste. 2018. “CryoSat-2 Full Bit Rate Level 1A processing and validation for inland water applications.” *Advances in Space Research* 62(6):1497–1515.
- Nielsen, Karina, Lars Stenseng, Ole B. Andersen, Heidi Villadsen, dan Per Knudsen. 2015. “Validation of CryoSat-2 SAR mode based lake levels.” *Remote Sensing of Environment* 171:162–70.
- Passaro, Marcello, Salvatore Dinardo, Graham D. Quartly, Helen M. Snaith, Jérôme Benveniste, Paolo Cipollini, dan Bruno Lucas. 2016. “Cross-calibrating ALES Envisat and CryoSat-2 Delay-Doppler: A coastal altimetry study in the Indonesian Seas.” *Advances in Space Research* 58(3):289–303.
- Purcell, Adam. 2016. “Lakes.” Diambil 10 Juni 2020 (<https://basicbiology.net/environment/freshwater/lakes>).
- Saastamoinen J. 1972. “Atmospheric corrections for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites.” *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysics Monograph Service* 15:274–251.
- Sulistioadi, Y. B., K. H. Tseng, C. K. Shum, H. Hidayat, M. Sumaryono, A. Suhardiman, F. Setiawan, dan S. Sunarso. 2015. “Satellite radar altimetry for monitoring small rivers and lakes in Indonesia.” *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1):341–59.
- Tescu, Petre G. Â. Ş. 2009. “Limnology , Lake Basins , Lake Waters.” *Lakes, reservoirs and ponds* 3(1):7–12.

- Troitskaya, Yu I., G. V. Rybushkina, I. A. Soustova, G. N. Balandina, S. A. Lebedev, A. G. Kostyanoi, A. A. Panyutin, dan L. V. Filina. 2012. "Satellite altimetry of inland water bodies." *Water Resources* 39(2):184–99.
- Vieira, Eliana, Clara Lázaro, dan M. Joana Fernandes. 2019. "Spatio-temporal variability of the wet component of the troposphere – Application to satellite altimetry." *Advances in Space Research* 63(5):1737–53.
- Vieira, Telmo, M. Joana Fernandes, dan Clara Lázaro. 2018. "Analysis and retrieval of tropospheric corrections for CryoSat-2 over inland waters." *Advances in Space Research* 62(6):1479–96.
- Vignudelli, Stefano, Andrea Scozzari, Ron Abileah, Jesús Gómez-Enri, Jérôme Benveniste, dan Paolo Cipollini. 2019. *Water surface elevation in coastal and inland waters using satellite radar altimetry*.
- Villadsen, Heidi, Ole B. Andersen, Lars Stenseng, Karina Nielsen, dan Per Knudsen. 2015. "CryoSat-2 altimetry for river level monitoring - Evaluation in the Ganges-Brahmaputra River basin." *Remote Sensing of Environment* 168:80–89.
- Vuglinskiy, Valery. 2009. "Water level in lakes and reservoirs, water storage" diedit oleh V. Vuglinskiy, M. Monteduro, R. Sessa, T. Gronskaya, dan J.-F. Cretaux. *Global Terrestrial Observing System* 26.
- Wingham, D. J., C. R. Francis, S. Baker, C. Bouzinac, D. Brockley, R. Cullen, P. de Chateau-Thierry, S. W. Laxon, U. Mallow, C. Mavrocordatos, L. Phalippou, G. Ratier, L. Rey, F. Rostan, P. Viau, dan D. W. Wallis. 2006. "CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields." *Advances in Space Research* 37(4):841–71.
- Wöppelmann, Guy dan Marta Marcos. 2016. "Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability." *Reviews of Geophysics* 54:64–92.

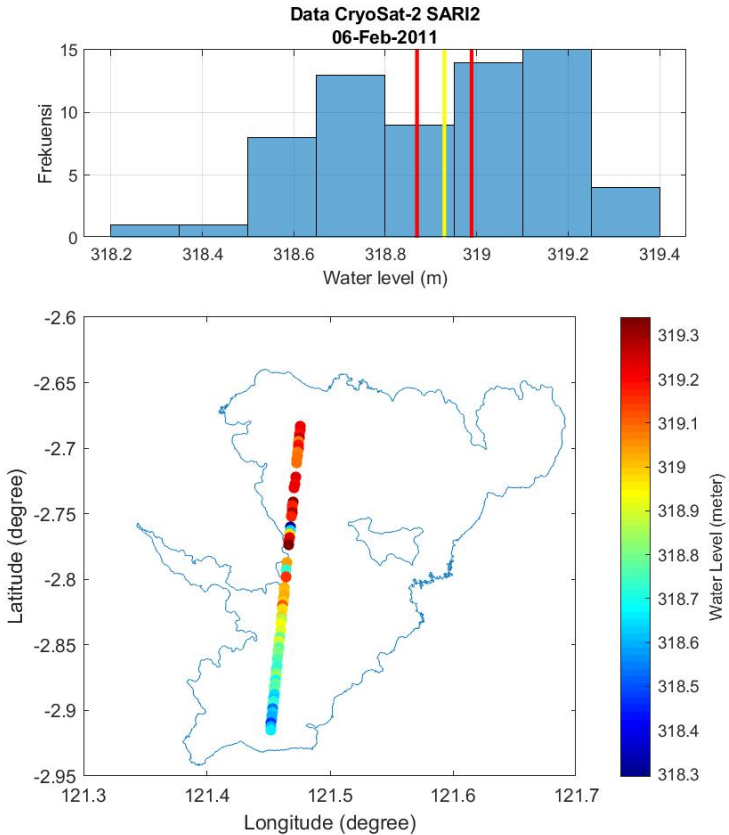
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

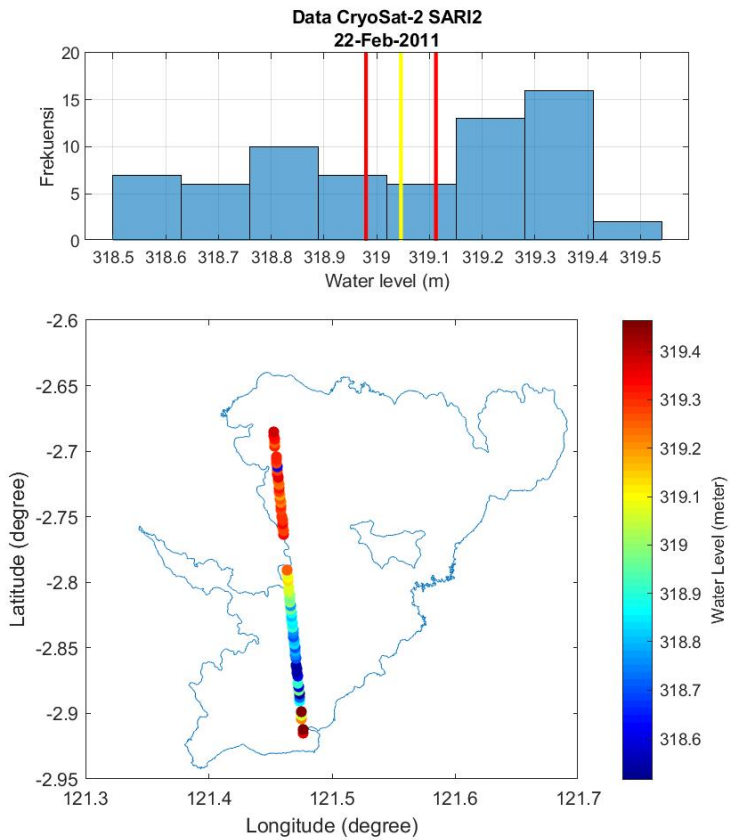
## LAMPIRAN

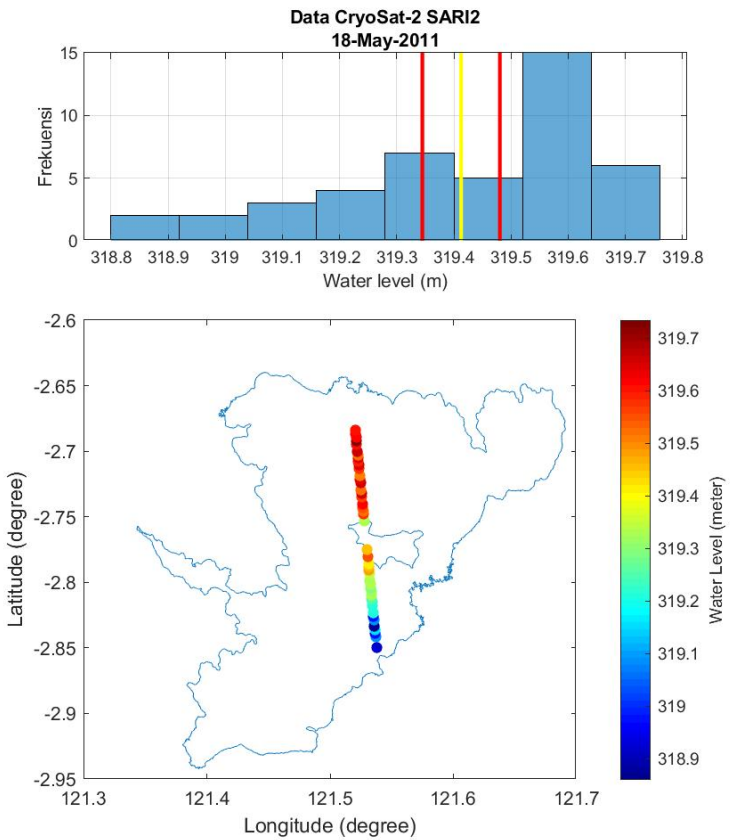
### Lampiran 1 Grafik data CryoSat-2 tiap *along-track* (2011-2018)

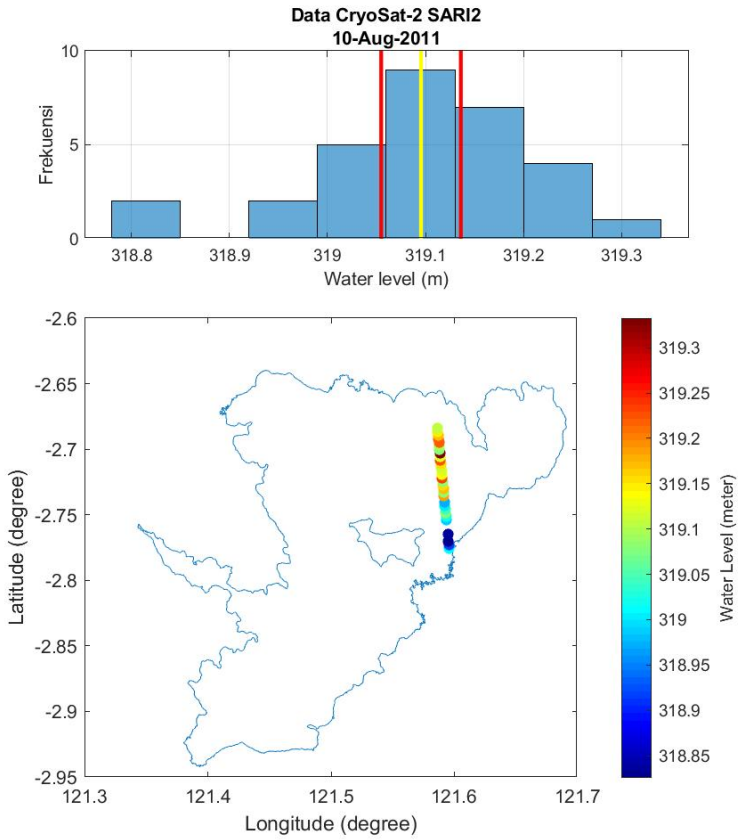
Keterangan: Garis kuning=*mean water level*

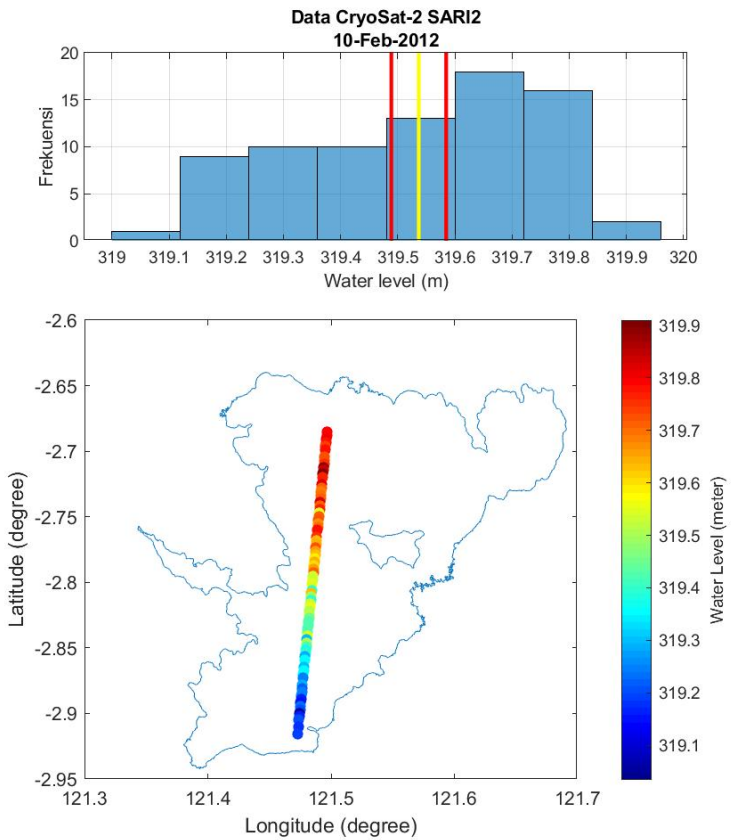
Garis merah=*limit 95% confidence interval*



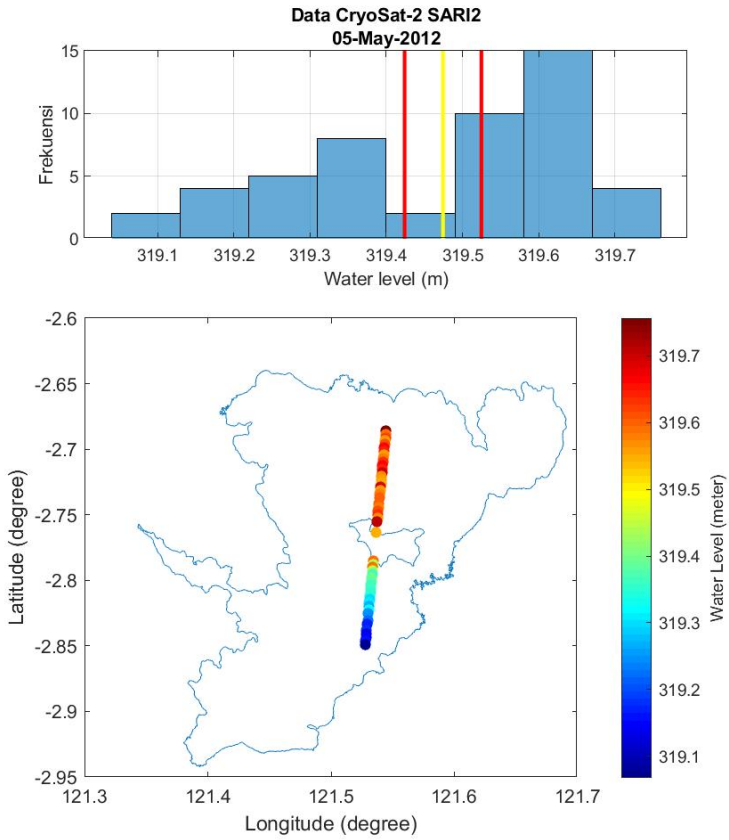


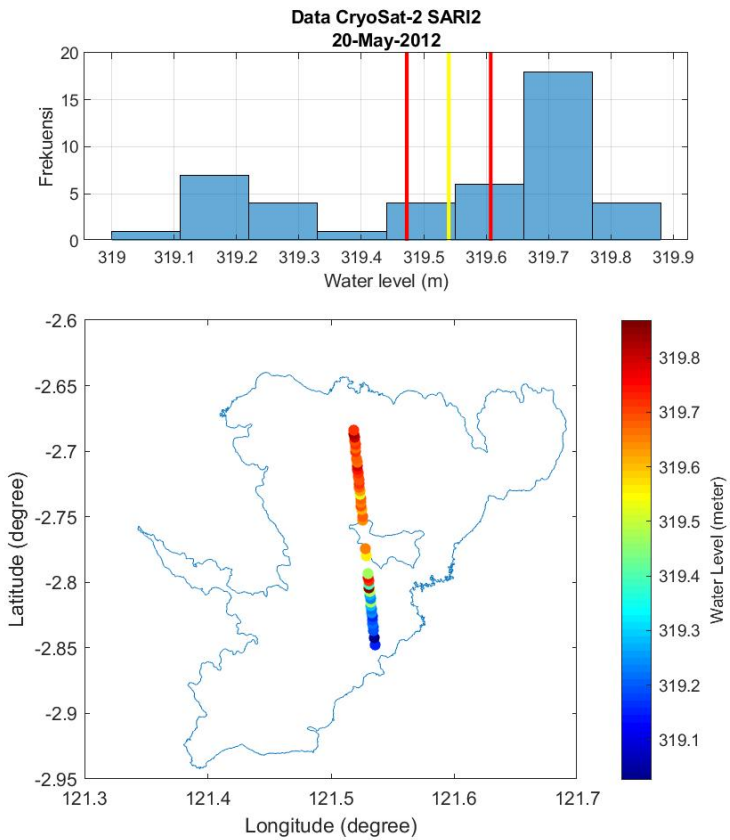


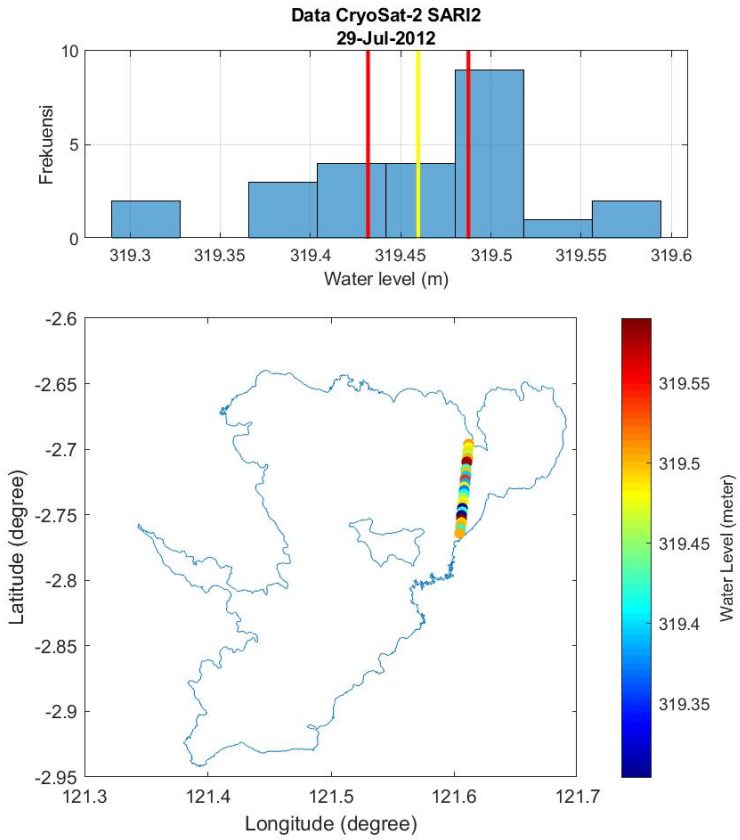


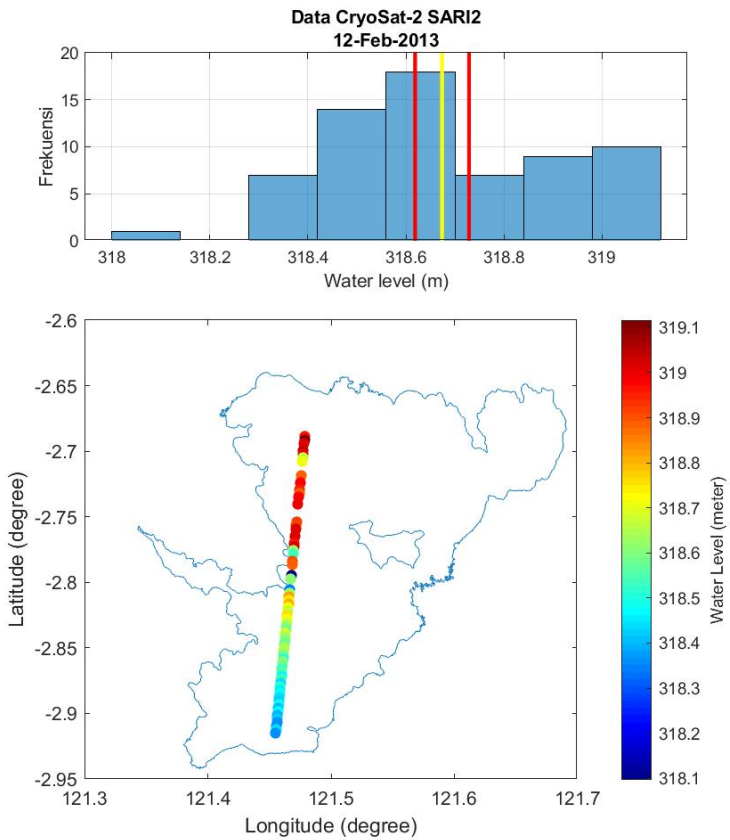


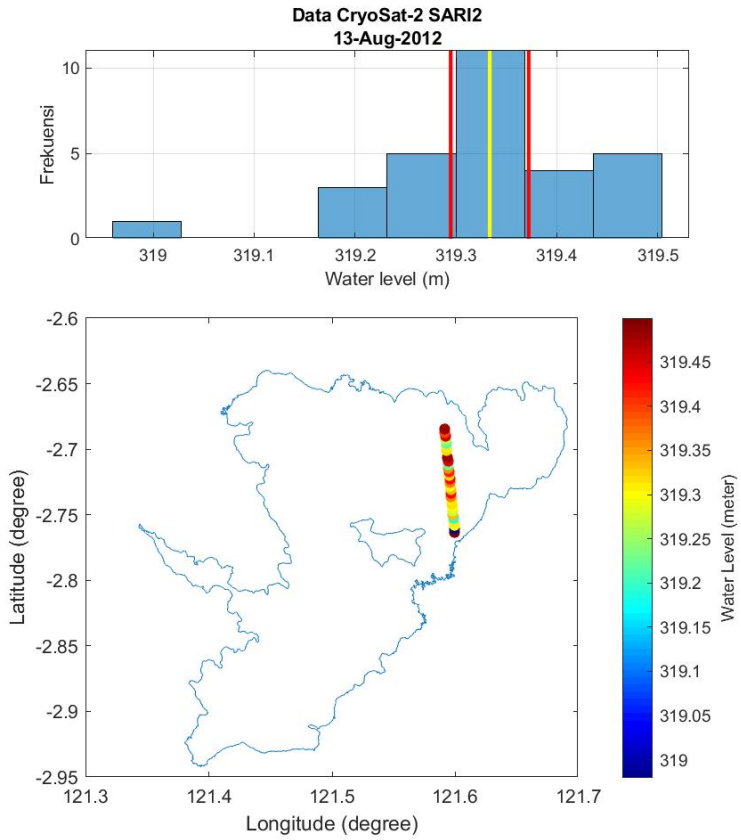


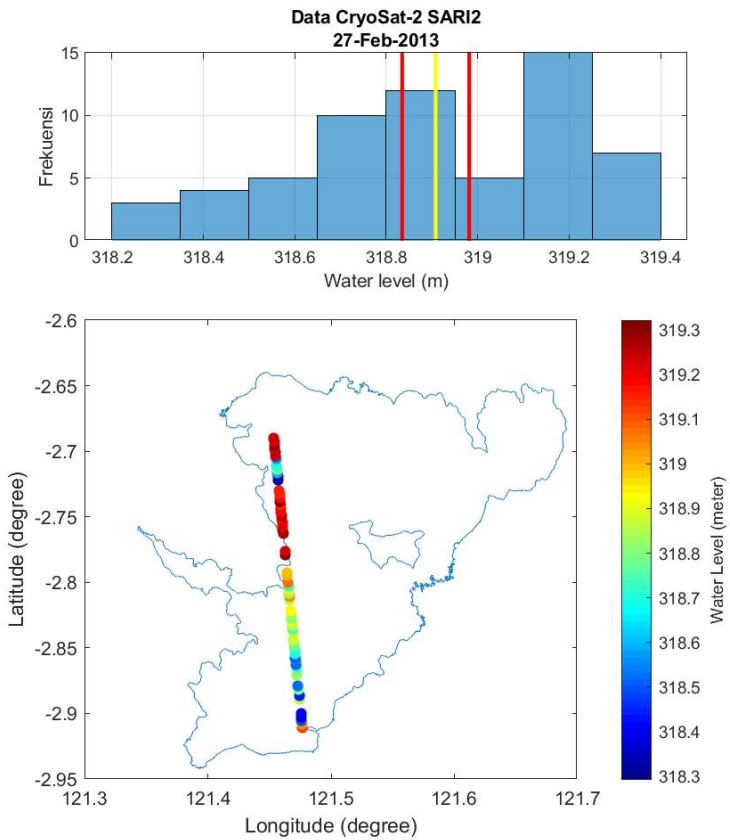


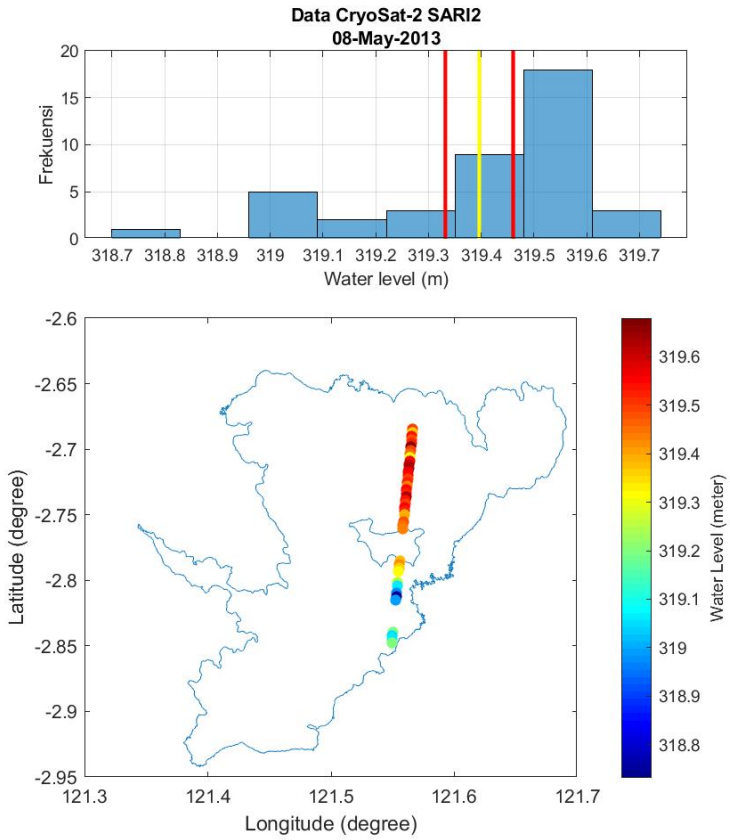


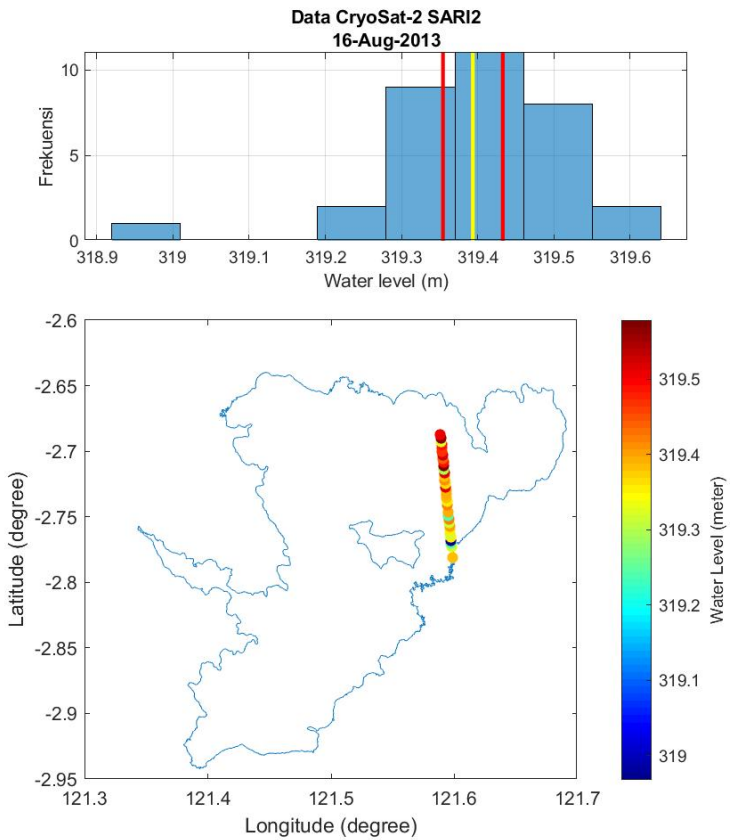




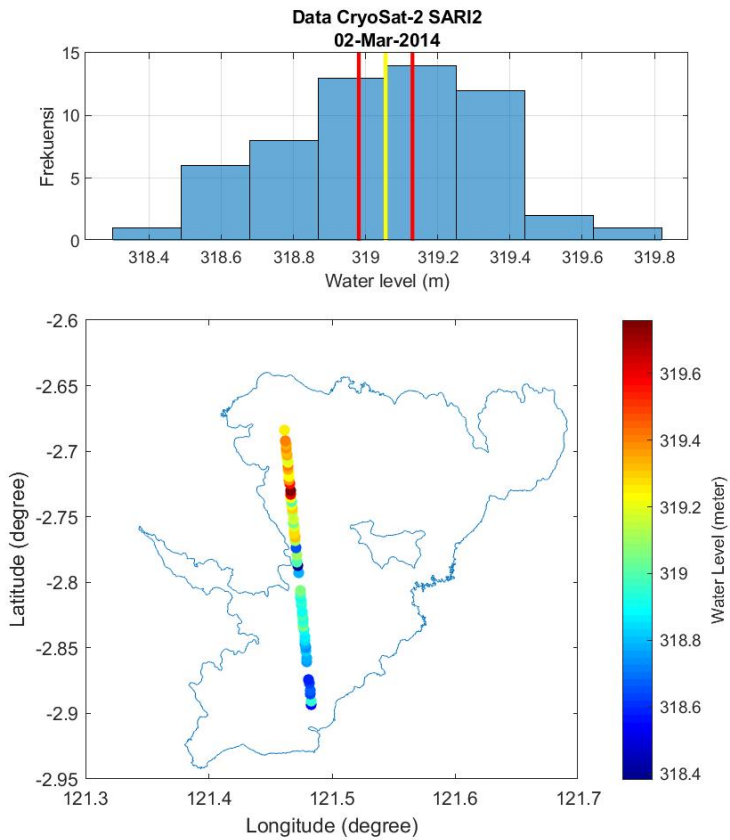


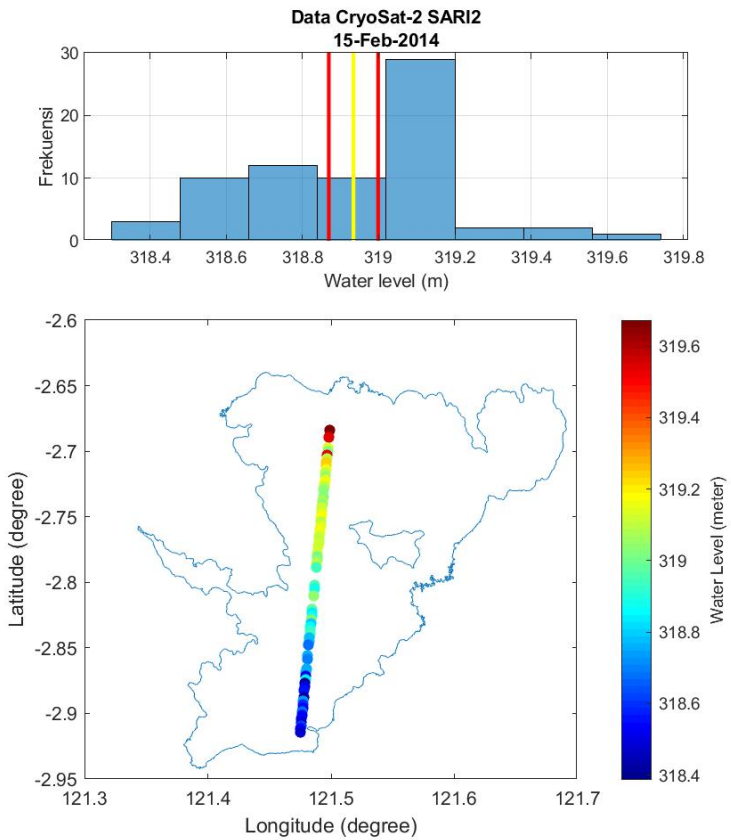


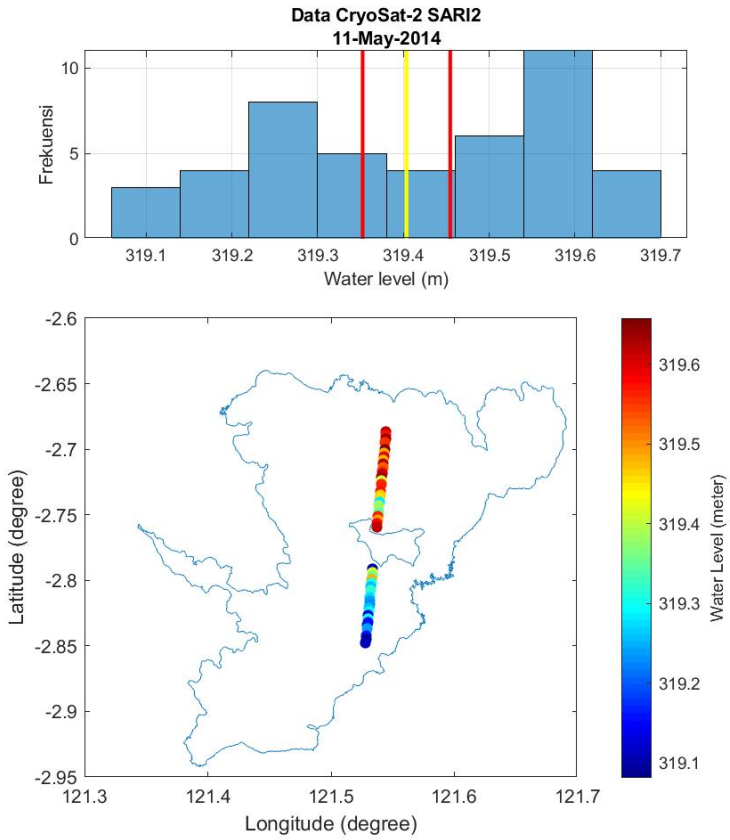


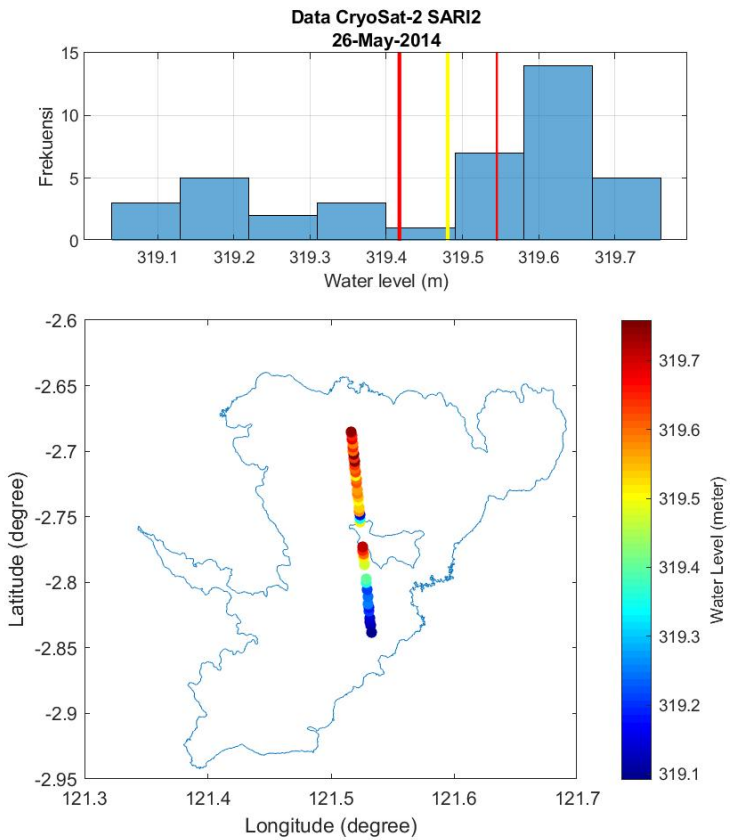


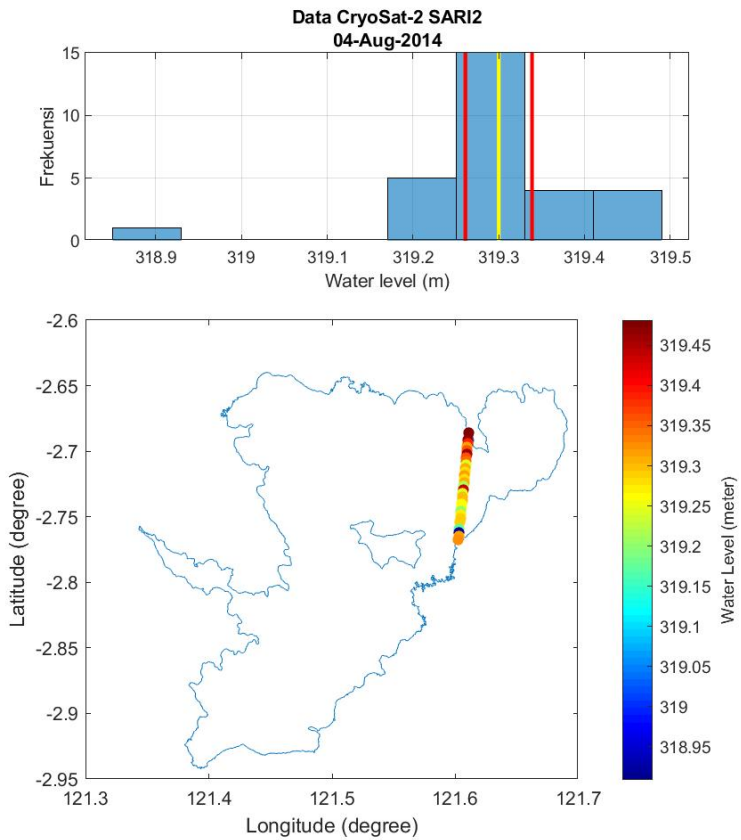


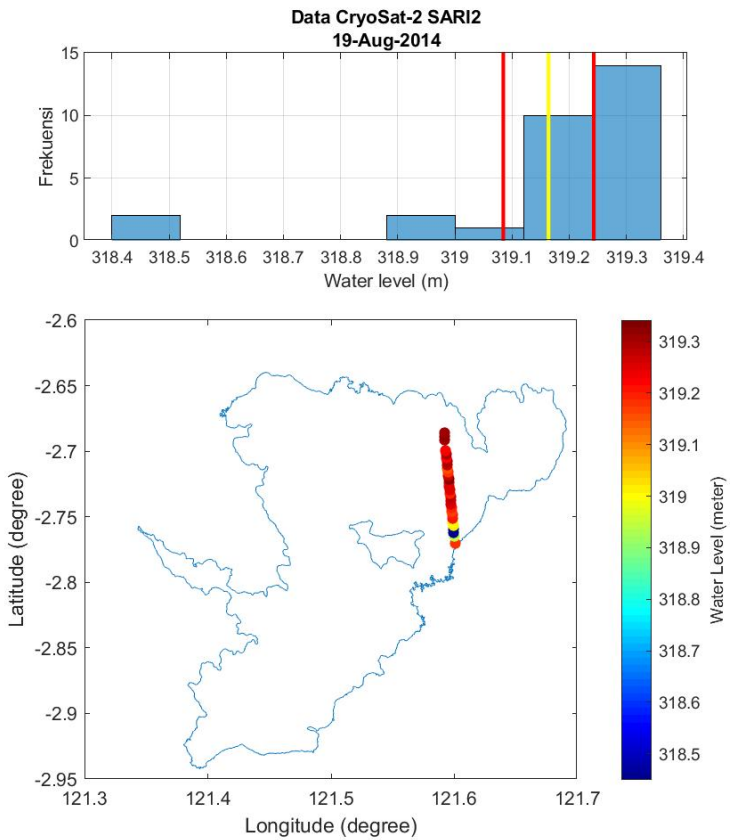


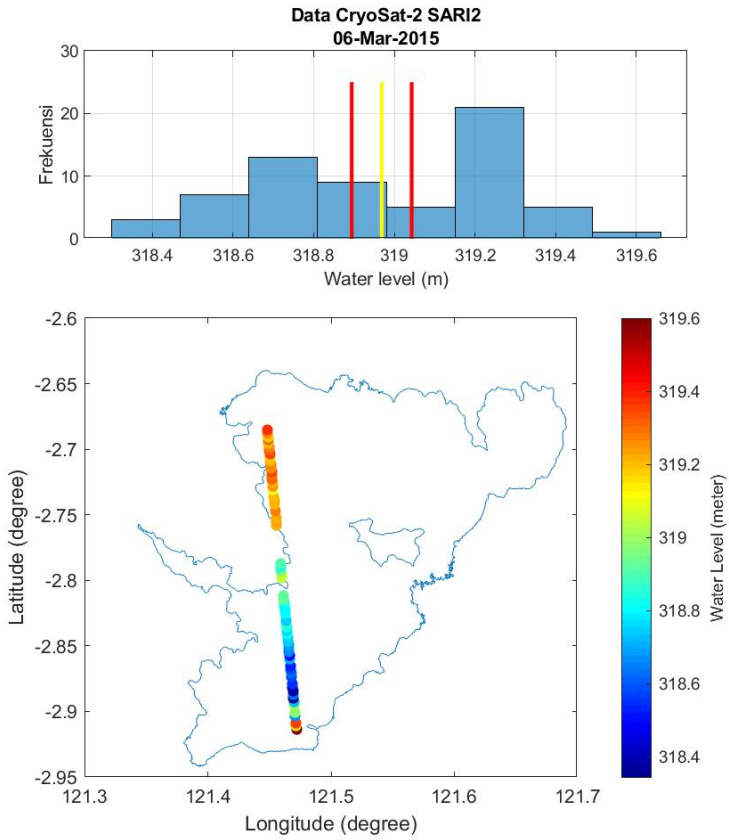


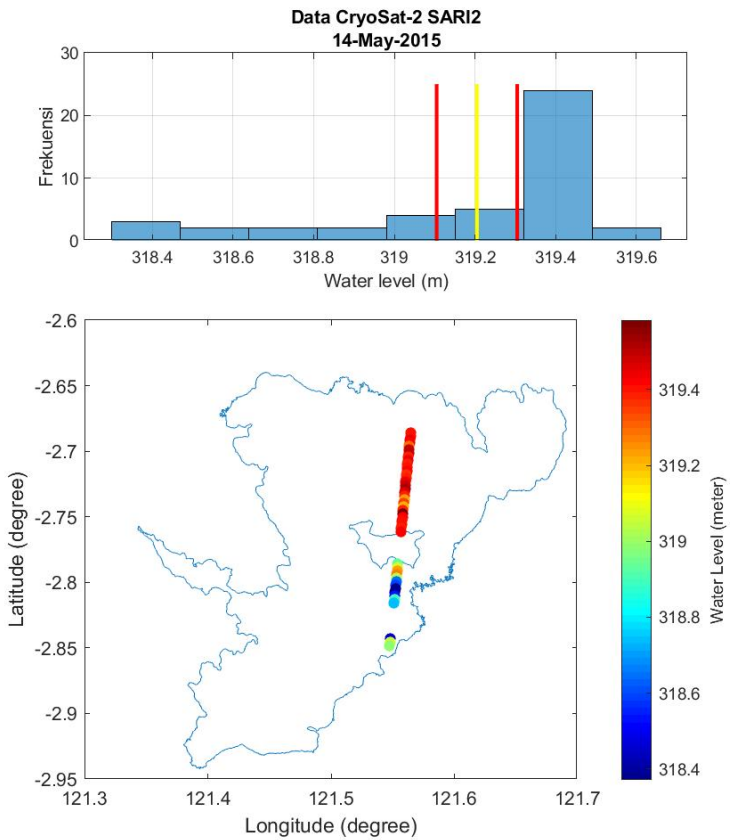




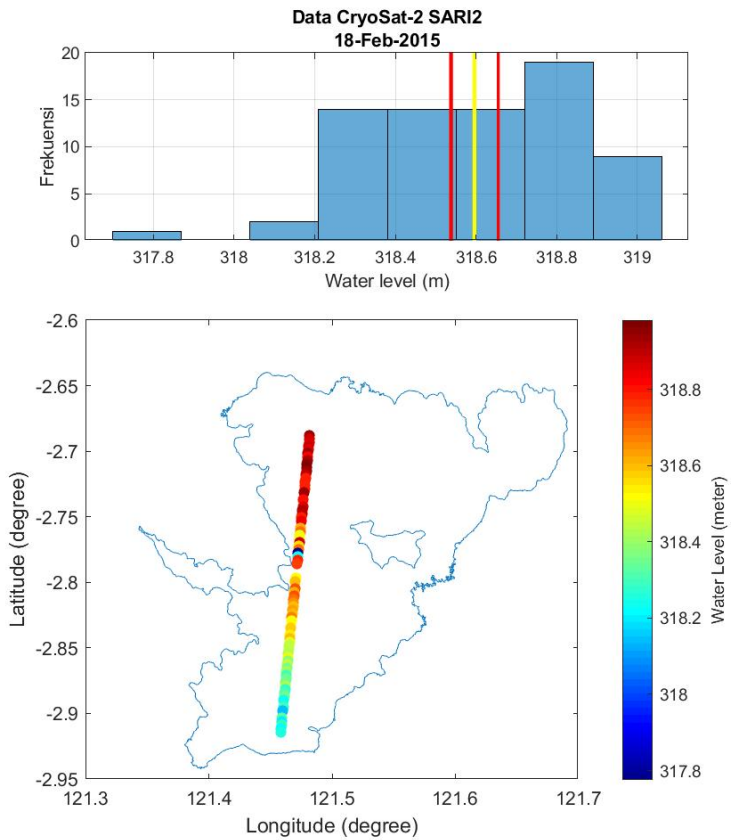


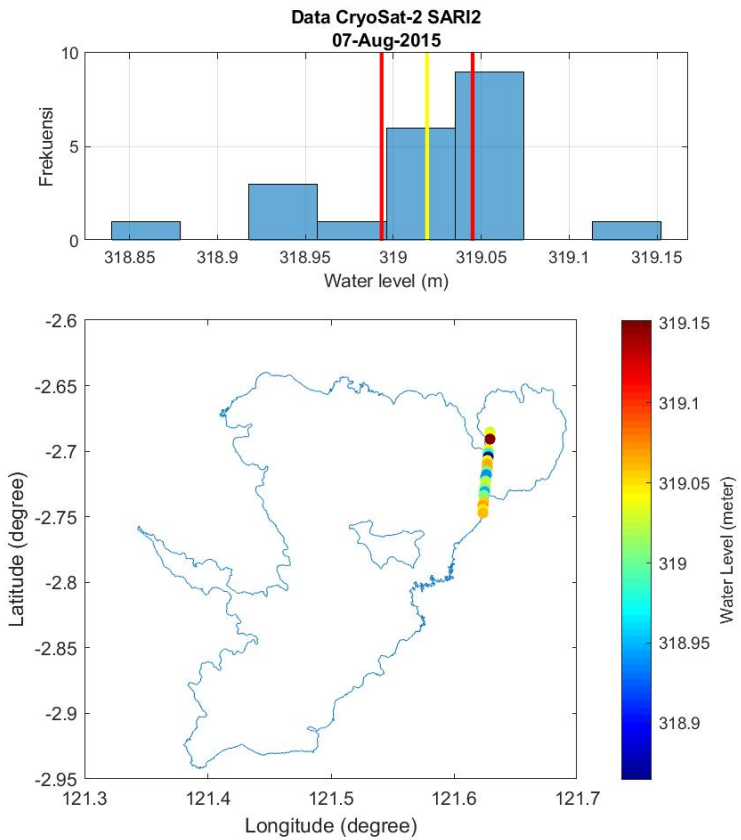


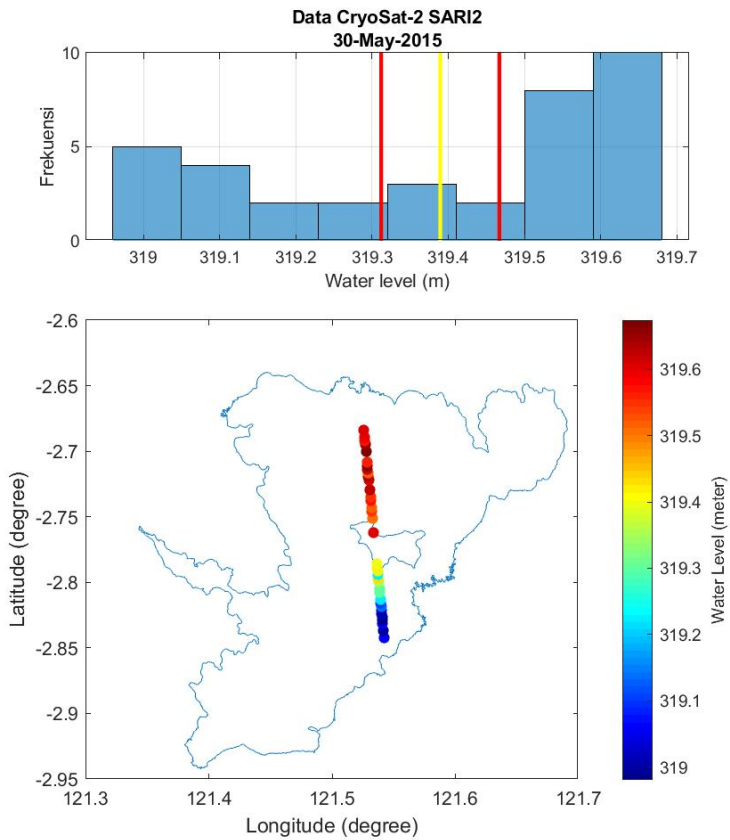


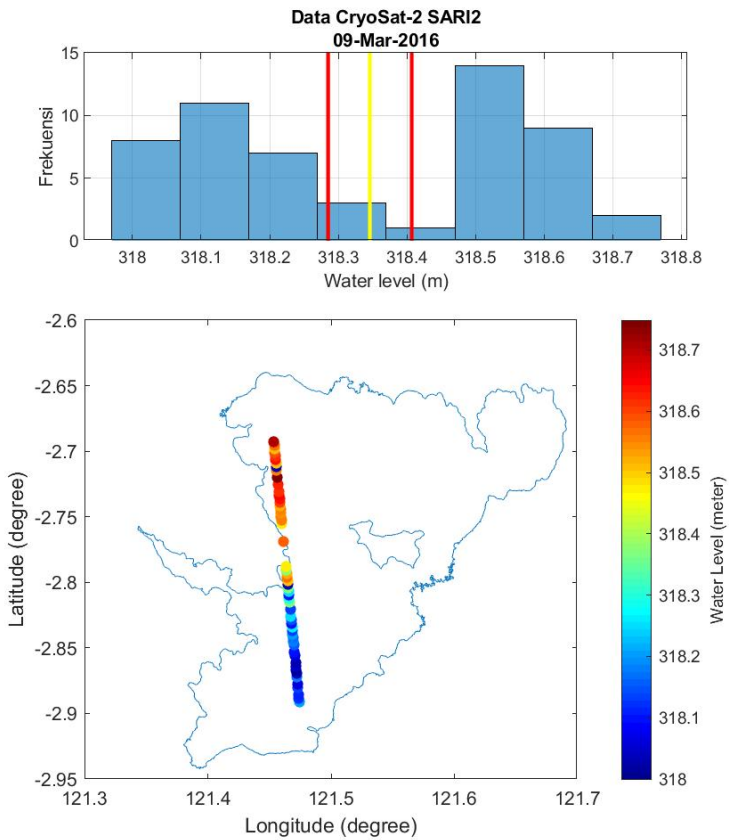


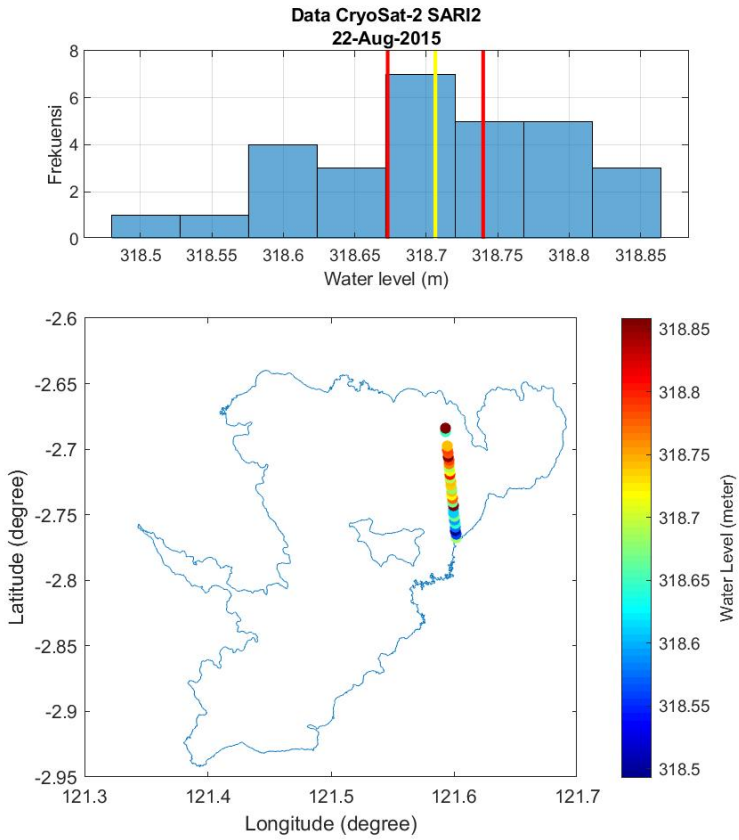


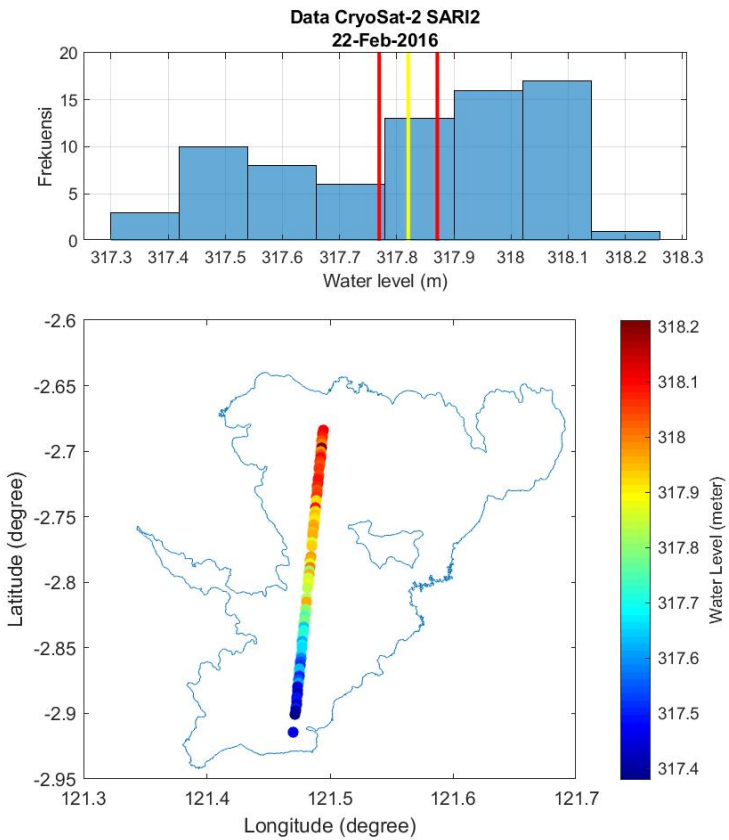


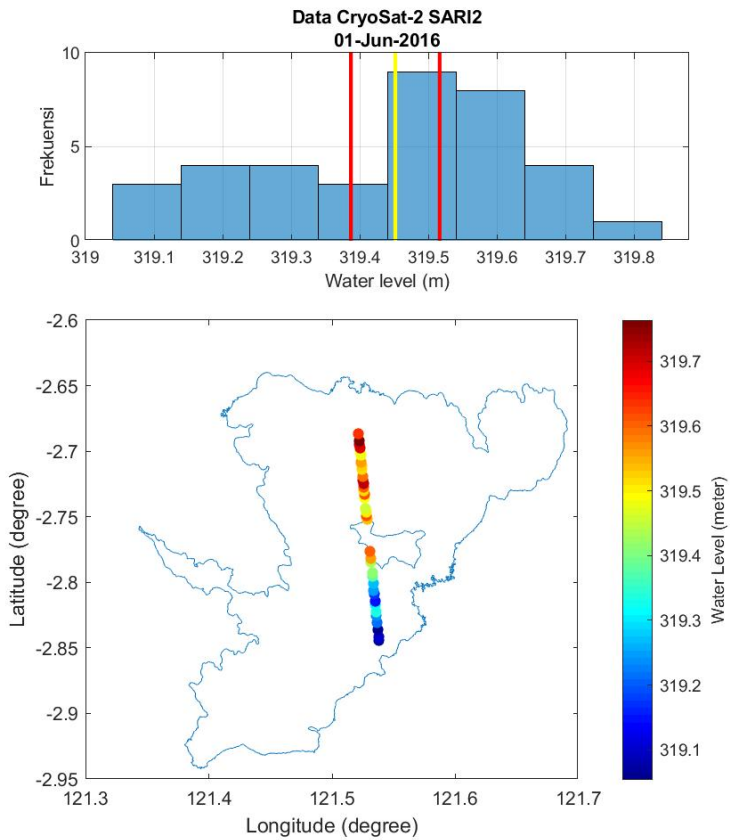


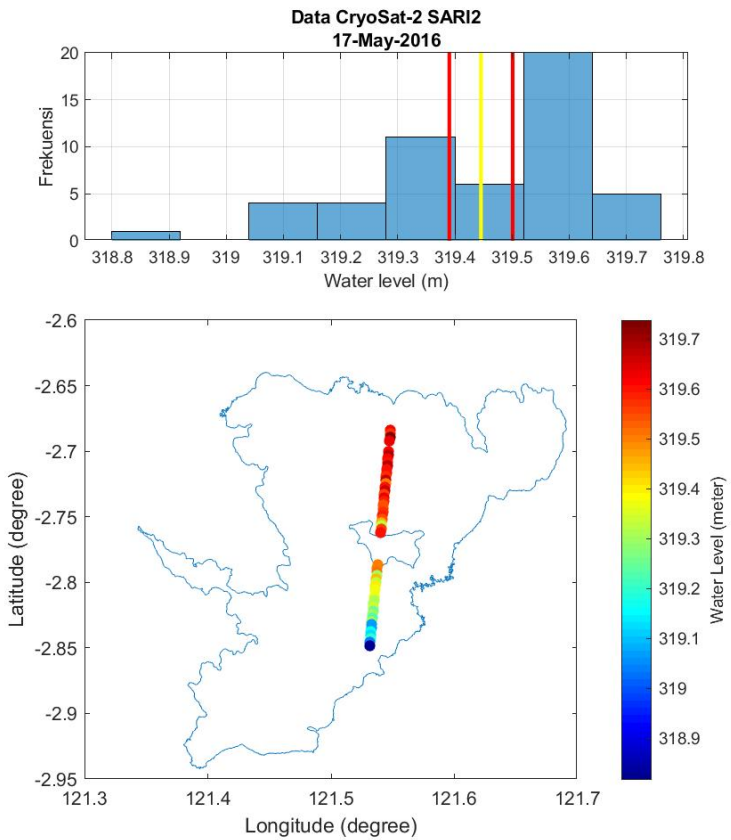




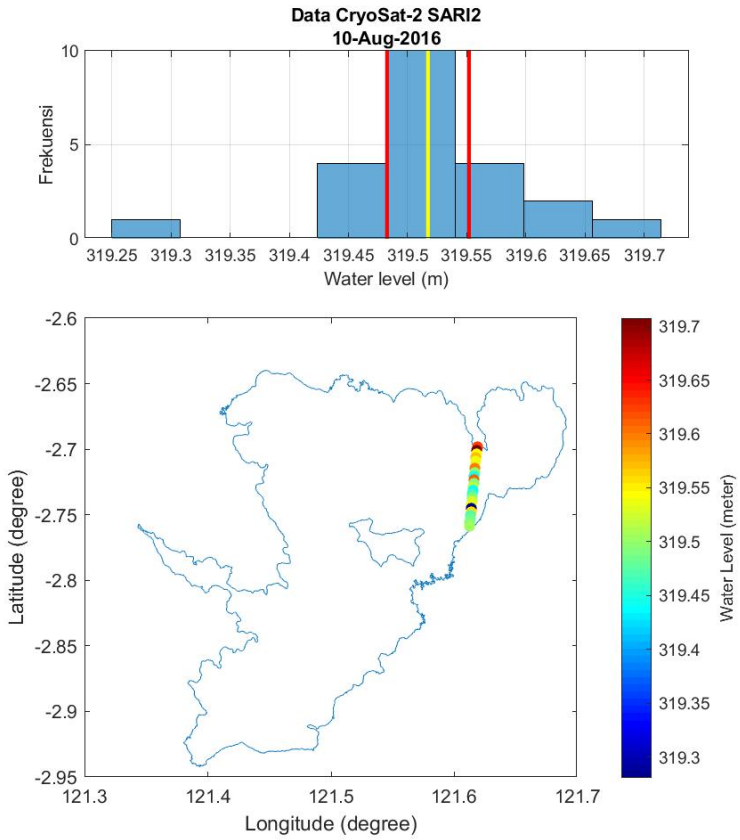


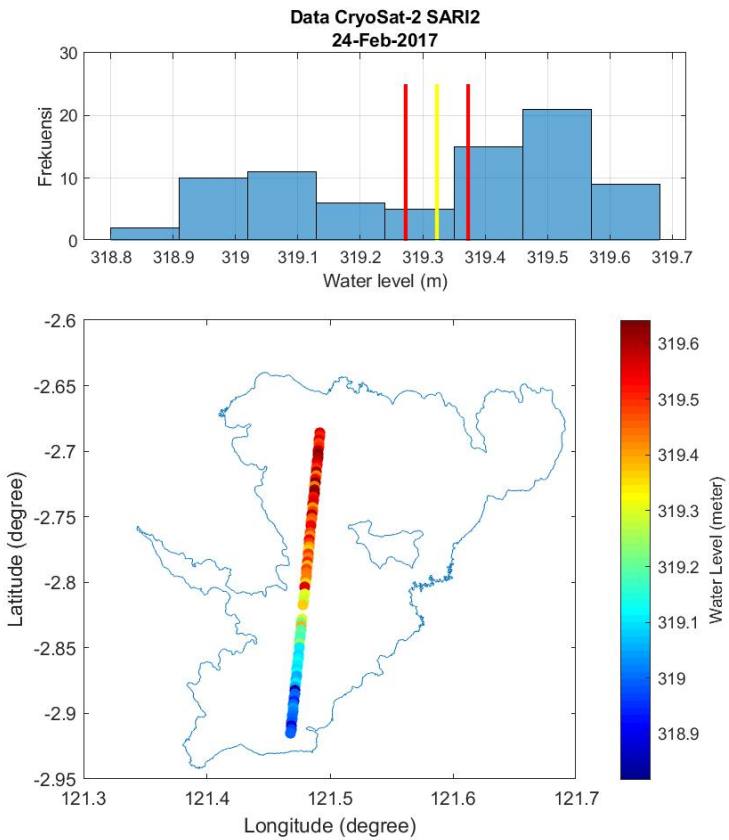


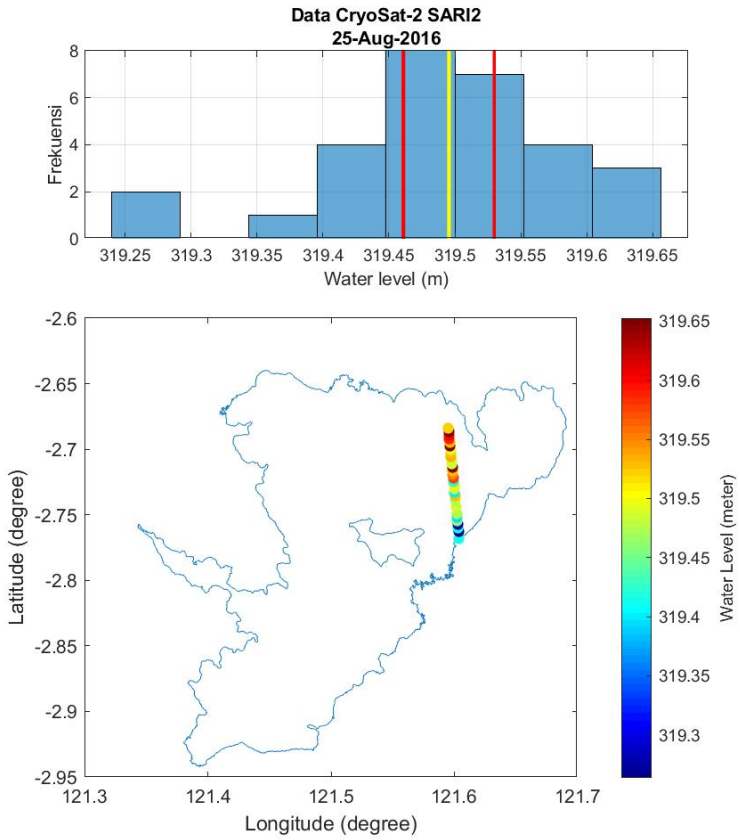


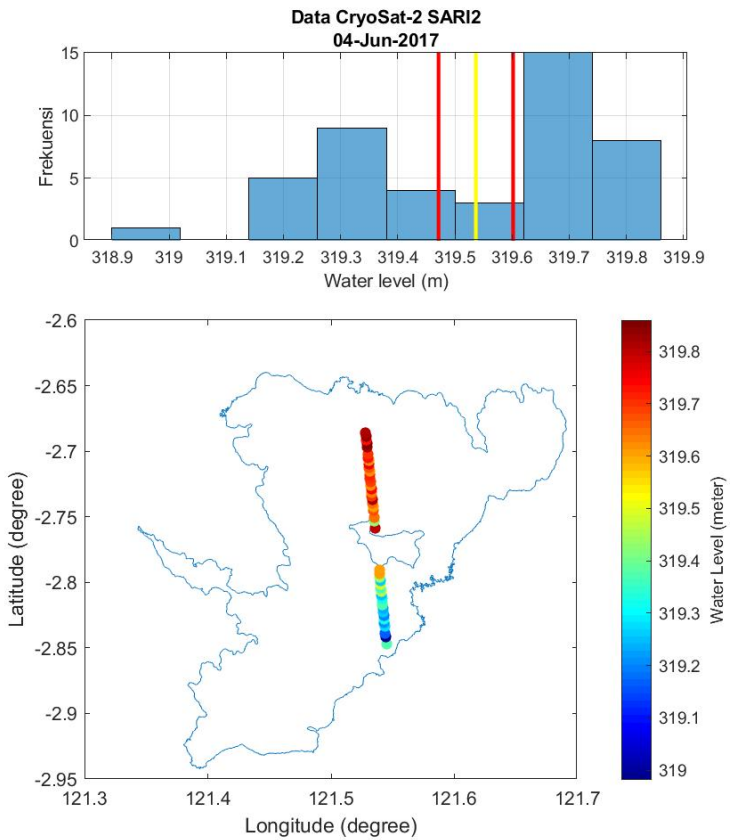


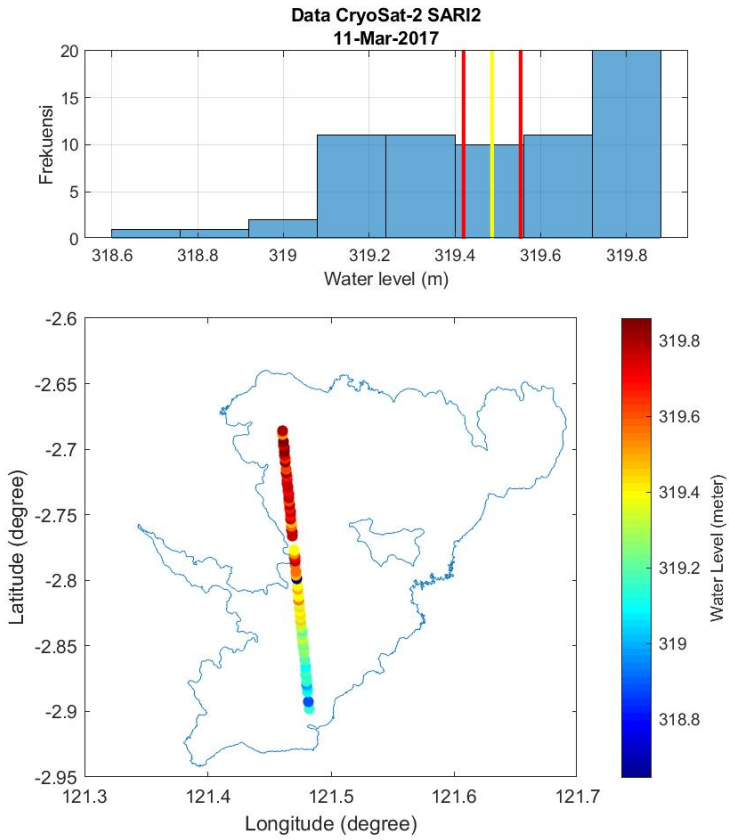


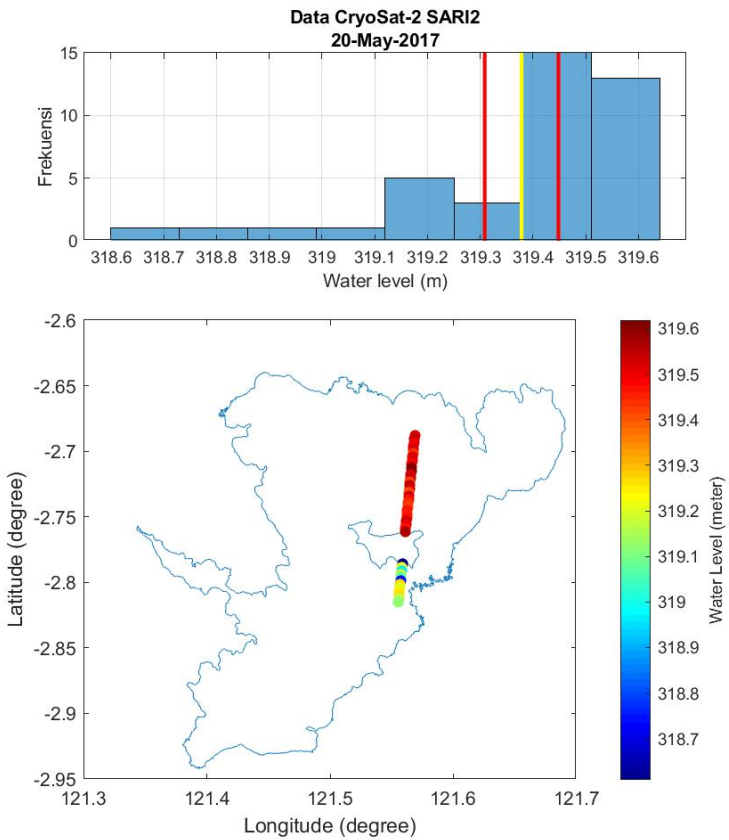


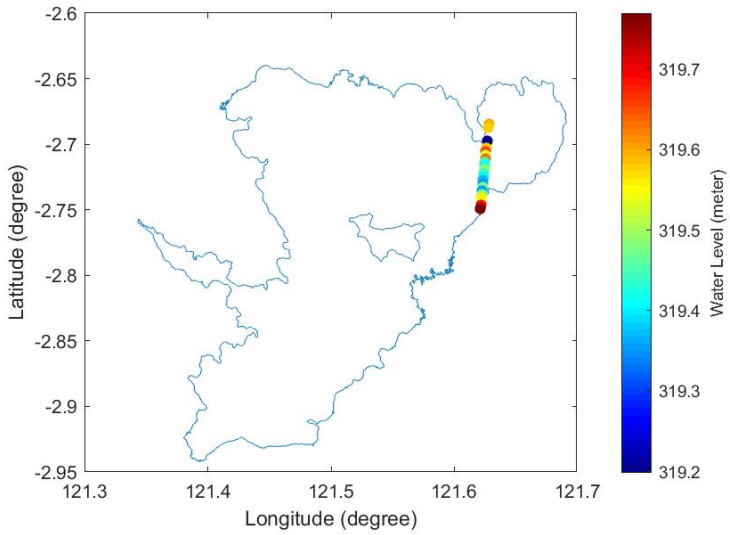
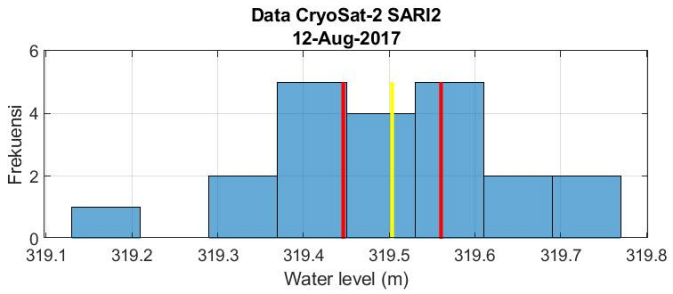


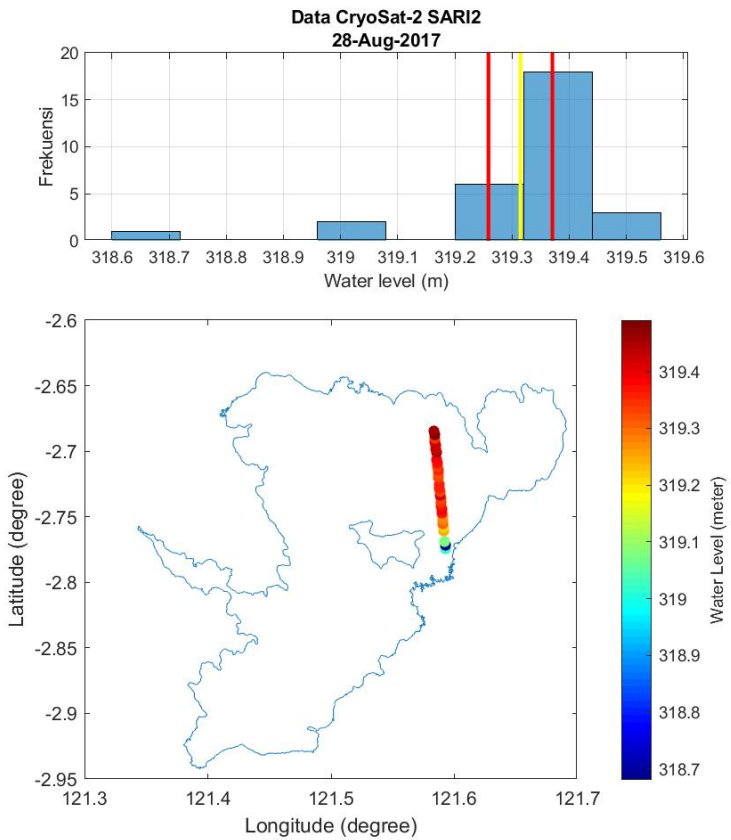




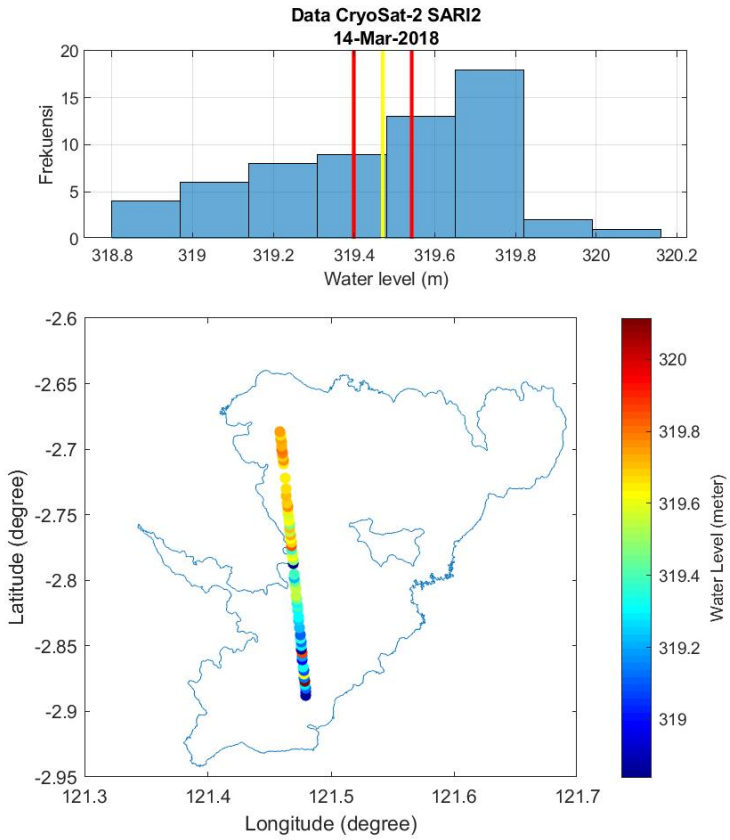


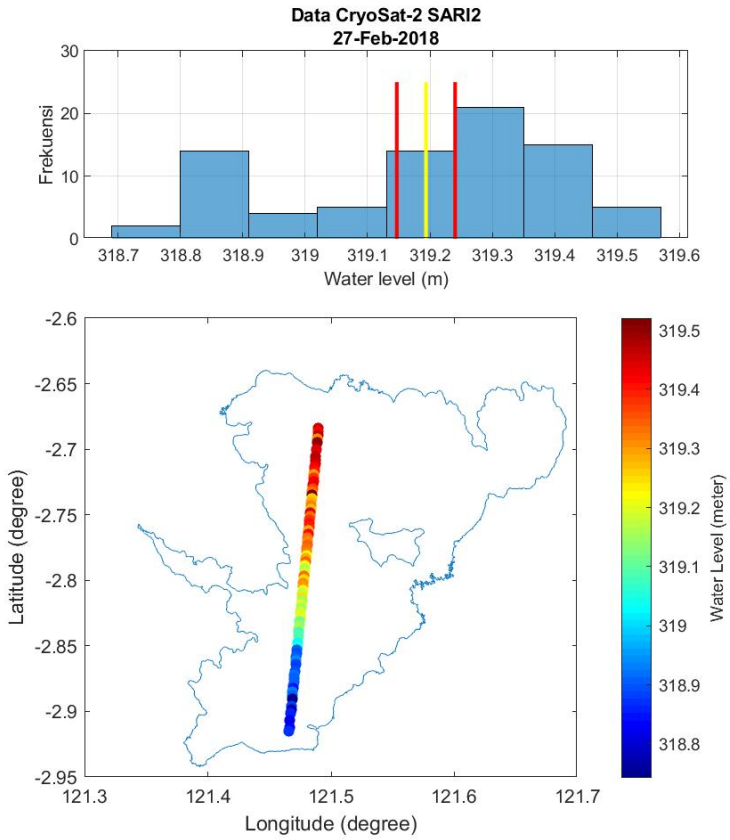


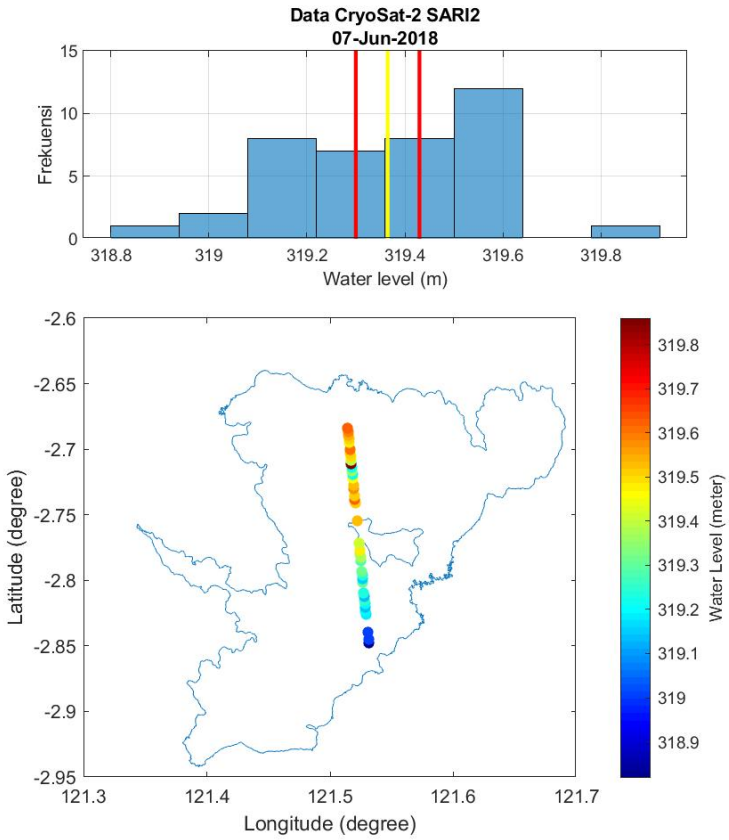


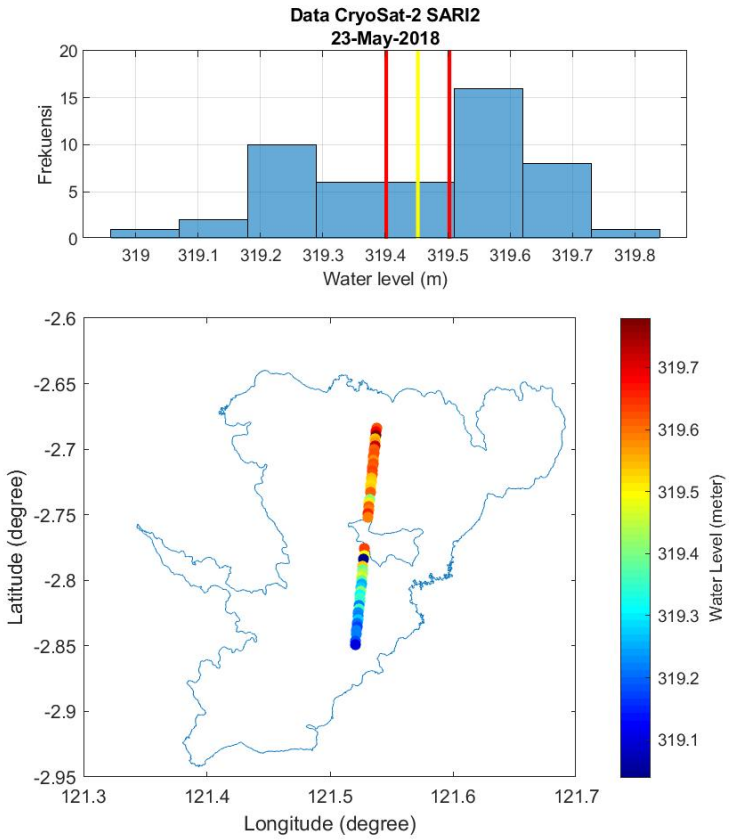


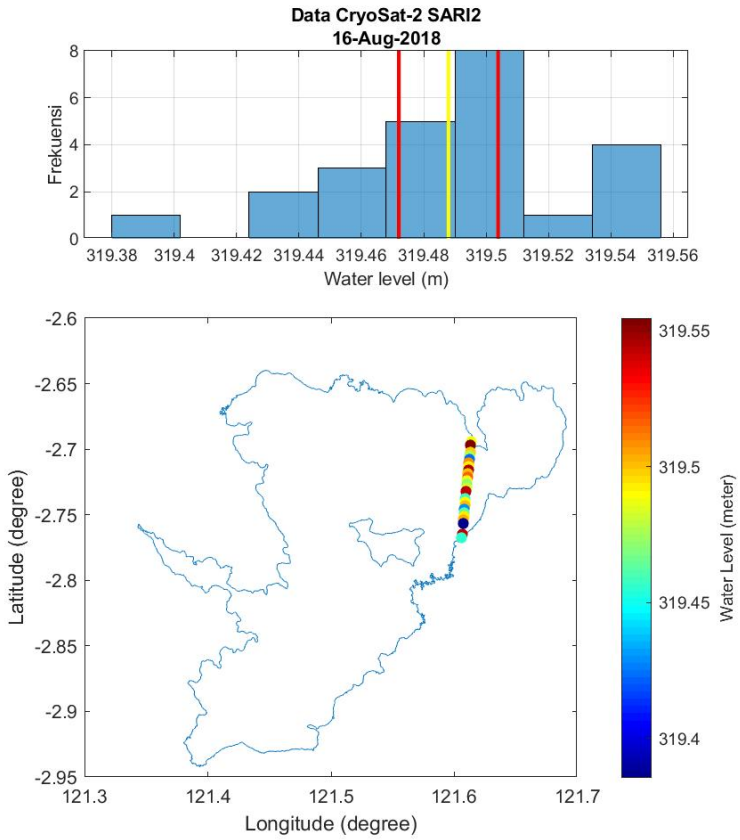


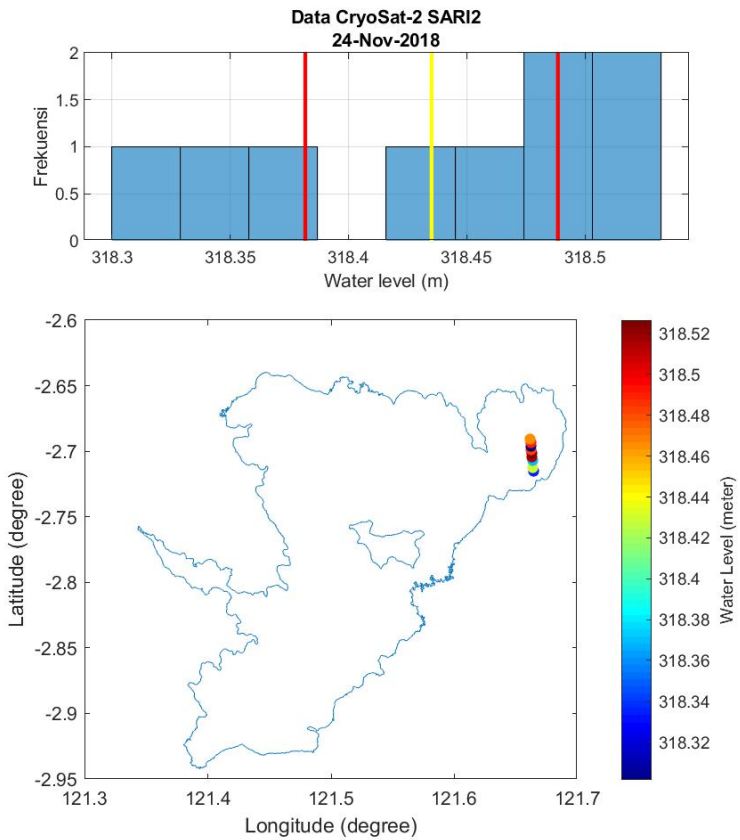


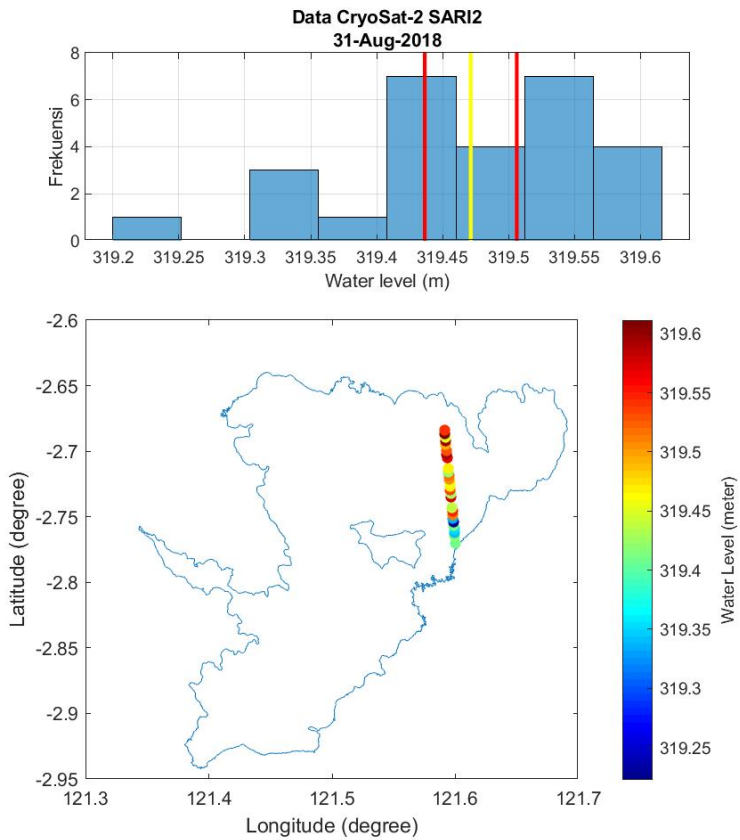


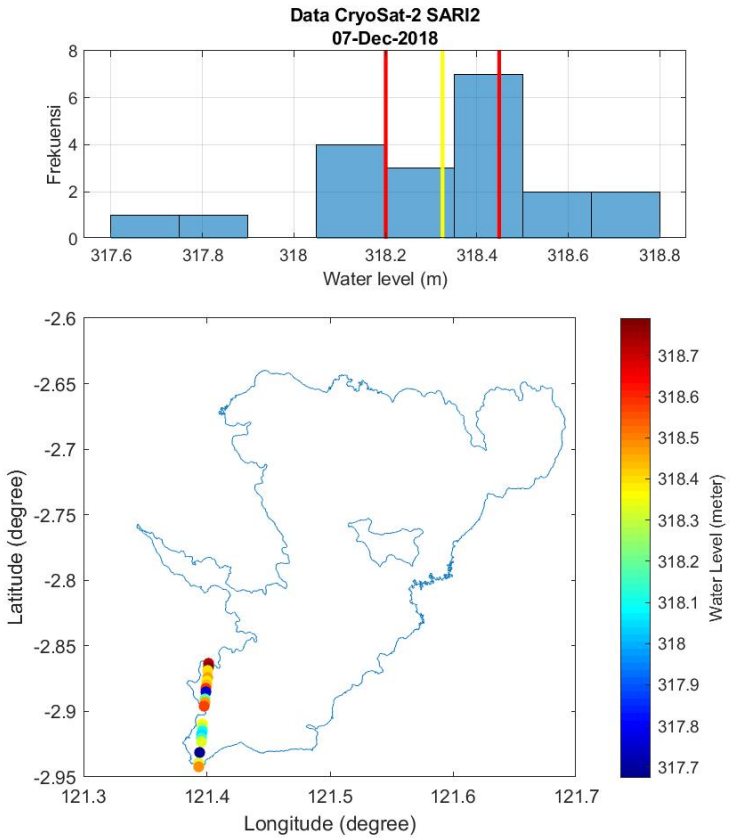






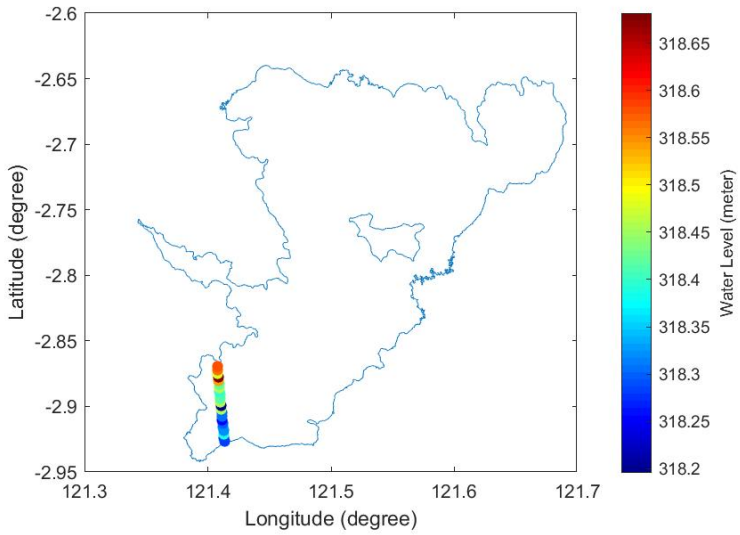
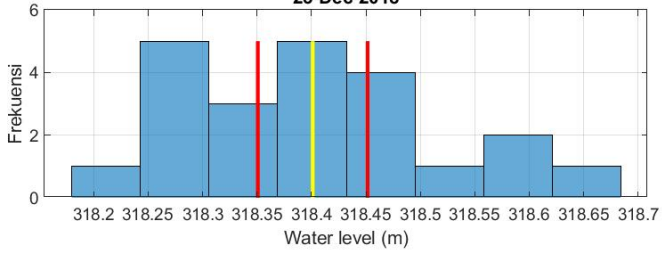




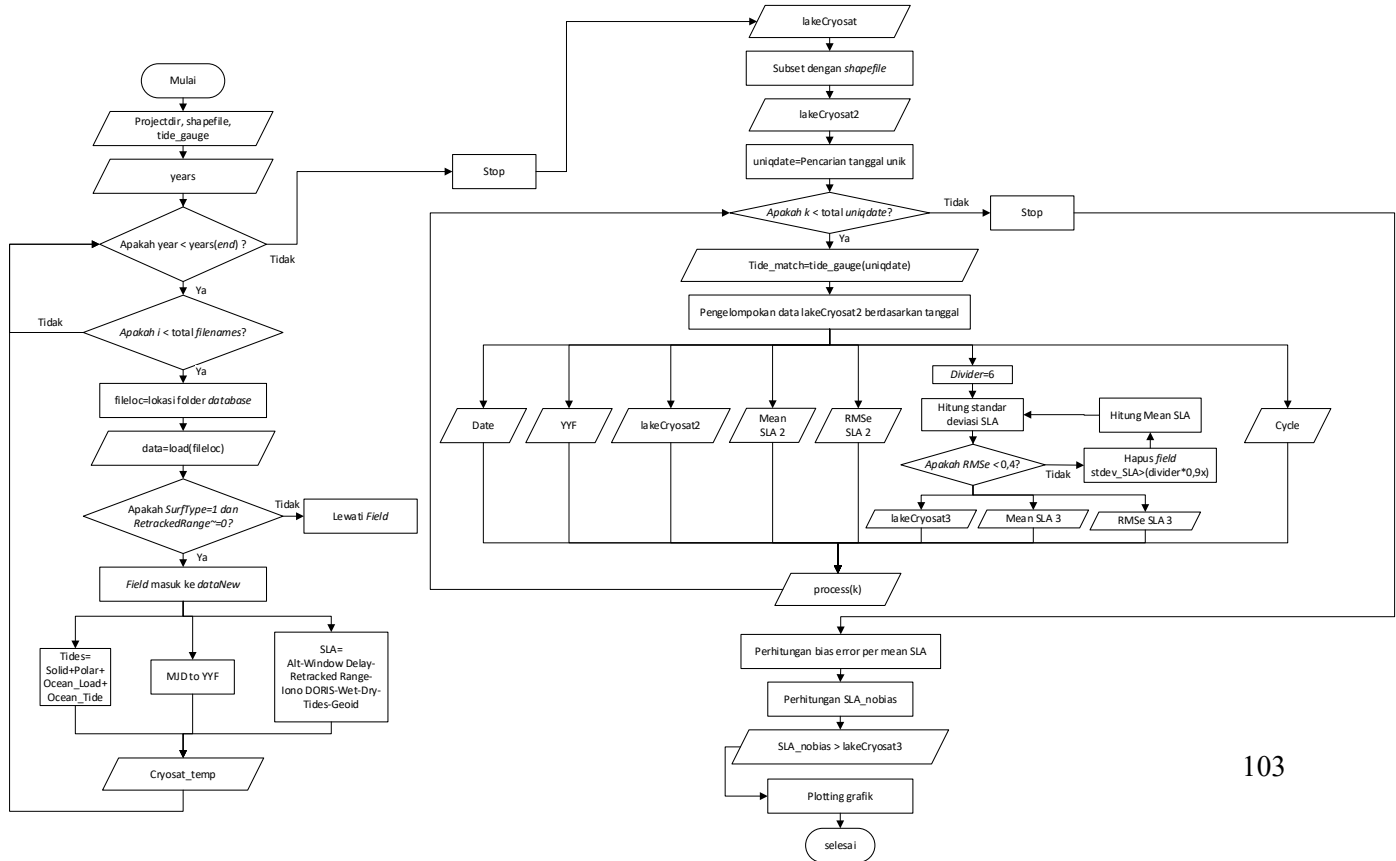




Data CryoSat-2 SARI2  
23-Dec-2018



## Lampiran 2 Diagram alir pengolahan data



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Ahmad Saifudin, lahir di Sidoarjo, 11 Agustus 1997. Merupakan anak kedua dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di TK Bina Insani, SD Negeri Wadungasih 2, SMP Negeri 2 Buduran, SMA Antartika Sidoarjo. Melanjutkan jenjang pendidikan melalui kuliah S-1 di Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil,

Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Tercatat sebagai mahasiswa mulai tahun 2016 dengan NRP 03311640000046. Selama perkuliahan, penulis mendalami bahasa pemrograman Matlab dan perangkat lunak CAD. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email berikut: [saisupen@live.com](mailto:saisupen@live.com).