

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penurunan muka tanah (*landsubsidence*) adalah bencana geologi yang dapat terjadi secara bertahap dan tiba-tiba sehingga dapat dianggap sebagai ancaman khususnya pada kota-kota berkembang. Hal ini dapat menimbulkan kerugian karena berdampak pada kerusakan infrastruktur wilayah permukiman, gangguan kehidupan sosial dan stabilitas ekonomi di wilayah tersebut. Bencana ini dapat dipicu oleh faktor alam maupun faktor buatan manusia. Faktor alam berasal dari kondisi geologi dan seismisitas sedangkan faktor buatan dapat berupa aktivitas pertambangan, pengambilan air tanah, ekstraksi minyak dan gas, konstruksi dan lain sebagainya (Bokhari dkk., 2023).

Kota Makassar merupakan kota terbesar kelima di Indonesia dan merupakan ibukota Provinsi Sulawesi Selatan yang berada di pesisir barat daya pulau Sulawesi. Memiliki luas wilayah 175,77 km² dan populasi lebih dari 1.4 juta jiwa (2023), maka kepadatan penduduk di Kota Makassar yaitu 8.388 jiwa/Km² (BPS, 2024). Kota ini merupakan kota yang sedang mengalami pertumbuhan dan perkembangan yang pesat sehingga semakin meningkatnya populasi, urbanisasi serta pembangunan infrastruktur. Semakin banyak bangunan dan permukiman akan mengakibatkan penggunaan air tanah yang berlebihan dan pembebanan pada tanah.

Selain itu, kondisi geologi batuan penyusun di kota Makassar dan sekitarnya berdasarkan Peta Geologi Lembar Ujungpandang, Benteng dan Sinjai, Sulawesi Selatan (Sukanto dan Supritna, 1982) tersusun dari perselingan endapan antar batuan hasil gunung api dan sedimen laut yang merupakan batuan dasar yang mempunyai sifat fisik keras dan padu. Diatas kedua macam batuan tersebut dijumpai endapan yang lebih muda seperti pasir pantai, endapan rawa dan endapan delta. Adanya endapan muda yang lebih lunak seperti pasir pantai dan rawa dapat menyebabkan ketidakstabilan jika terjadi ekstraksi air tanah yang berlebihan (Archenita dkk., 2015). Berdasarkan faktor alam dan buatan tersebut Kota Makassar memiliki potensi terjadinya fenomena penurunan muka tanah (*landsubsidence*).

Oleh karena itu, dibutuhkan suatu metode untuk mengidentifikasi dan memetakan wilayah yang rawan terjadi *subsidence*. Hal tersebut sebagai salah satu upaya mitigasi terhadap bencana geologi, sekaligus dapat memberikan



lam perencanaan pembangunan infrastruktur di wilayah at metode tradisional untuk pemantauan penurunan seperti survei *levelling* dan GNSS, akan tetapi dibatasi oleh ih, cakupan yang terbatas, dan biaya yang tinggi. Sebaliknya *metric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) merupakan solusi nginderaan jauh presisi tinggi dengan resolusi temporal dan . Keunggulan metode ini dapat mengukur deformasi tanah

dalam skala besar dan biaya yang rendah, dengan memanfaatkan informasi fase dari pancaran radar. Teknologi InSAR dapat memantau nilai deformasi permukaan tanah dalam skala sentimeter bahkan milimeter (Yang, 2024).

Penelitian terdahulu oleh Haris (2020) menemukan bahwa laju penurunan muka tanah Kota Makassar sebesar 0,73 cm/tahun dalam rentang tahun 2007 hingga 2011. Hasil dari penelitian tersebut mendapatkan penurunan muka tanah terjadi pada semua kecamatan di kota Makassar dengan variasi nilai *subsidence* dari 0,09- 5,8 cm (Haris, 2018). Namun, penelitian ini menggunakan citra ALOS Palsar yang berbayar. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan menggunakan citra sentinel-1 yang didapatkan secara gratis. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan studi penurunan muka tanah (*landsubsidence*) di Kota Makassar dengan memanfaatkan Metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) menggunakan citra radar SAR sentinel 1 tipe SLC band C.

1.2 Tujuan Dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan laju penurunan muka tanah Kota Makassar menggunakan metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR)
2. Menganalisis zona rawan *subsidence* berdasarkan hasil metode *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR)

1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Memberikan informasi kepada Pemerintah kota Makassar mengenai laju penurunan muka tanah atau *landsubsidence*
2. Menginformasikan wilayah paling rawan *subsidence* berdasarkan hasil Peta Penurunan Muka Tanah di Kota Makassar.

1.3 Landasan Teori

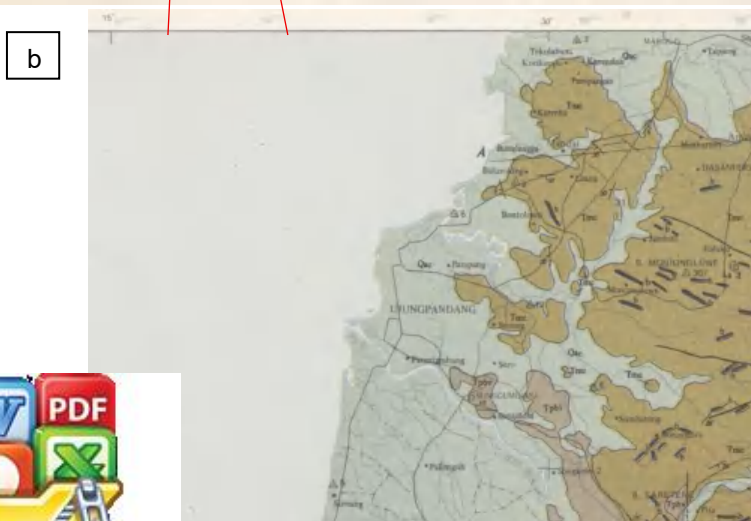
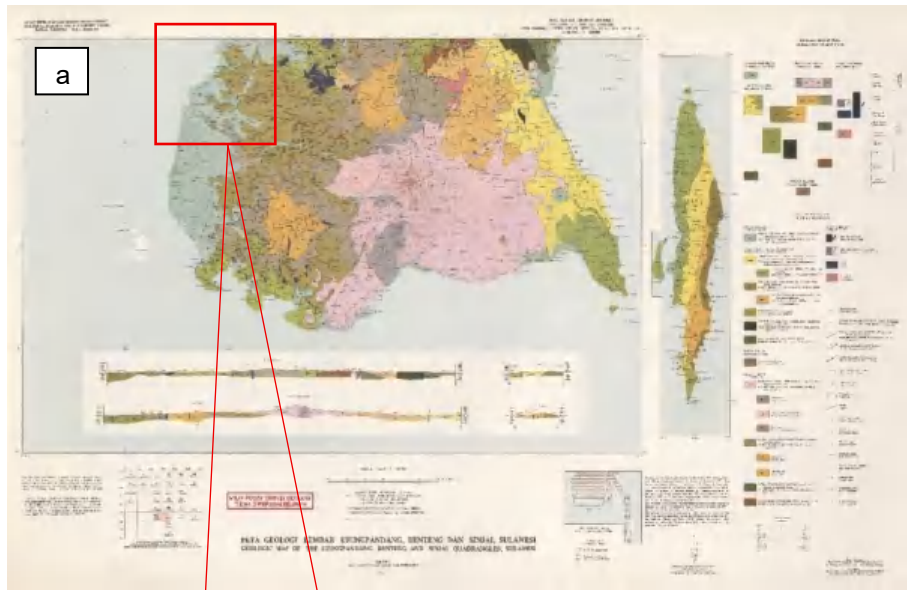
1.3.1 Bentang Alam Kota Makassar

Kota Makassar adalah ibukota Provinsi Sulawesi Selatan yang secara astronomi terletak antara 119°24'17'38" Bujur Timur dan 5°08'06'19" Lintang Selatan. Kota ini berbatasan dengan Kabupaten Maros di Utara dan Timur, Kabupaten Gowa di Selatan, serta Selat Makassar di Barat. Memiliki luas wilayah 175.77 km persegi yang meliputi 15 kecamatan. Jumlah penduduk Kota Makassar tercatat pada tahun 2023 tercatat sebanyak 1.474.393 jiwa, jika dibandingkan dengan kepadatan penduduk kota Makassar yaitu 8.388 jiwa per 3PS, 2024).



Kota Makassar terdiri dari tinggian berlereng landai, dataran tinggi dan limpah banjir. Daerah tinggian berlereng landai utara, timur, dan selatan Kota Makassar, meliputi daerah makukang, Sungguminasa, yang secara keseluruhan

menempati sekitar $\pm 30\%$ wilayah pusat dan pinggiran kota. Daerah dataran pantai di sebelah barat dan utara poros jalan utama Makassar-Maros, yang berbatasan langsung dengan dataran sungai dan limbah banjir. Dataran pantai ini terdiri dari dataran gosong pantai, delta sungai, dan rawa bakau, menempati sekitar $\pm 40\%$ kawasan Kota Makassar. Daerah sungai dan limbah banjir terletak terletak di antara dua sungai besar, sungai Jeneberang dan Tallo, mencakup sekitar $\pm 30\%$ wilayah kota. Kota Makassar memiliki topografi yang relatif datar dan ketinggian tanah berkisar 1-22 m, dengan kemiringan rata-rata 5 derajat kearah timur (Nyompa dkk., 2019).



Berdasarkan **Gambar 1**, batuan di daerah Kota Makassar dan sekitarnya terdiri dari campuran endapan gunung api dan sedimen laut (Formasi Camba) dengan lava, breksi, tufa, dan konglomerat dari erupsi gunung api Baturape-Cindako. Kedua batuan tersebut merupakan batuan dasar dari Kota Makassar dan sekitarnya. Batuan tersebut memiliki sifat fisik yang keras dan padu. Diatasnya terdapat batuan endapan permukaan yang lebih muda, seperti endapan pasir pantai, rawa, delta, limbah banjir, dan alur sungai. Endapan alluvium merupakan suatu material yang belum terlitifikasi sehingga masih dalam proses konsolidasi dan kompaksi (Sophian, 2010). Selain itu, terdapat talus sebagai material sisa erosi permukaan. Selain itu terdapat batuan terobosan basal dan retas basal yang menerobos batuan gunung api dan sedimen laut (Formasi Camba), dengan pola retas mengikuti retakan-retakan kekar tarik yang telah terbentuk sebelumnya (Soehaimi, 2009).

Secara geomorfologi Makassar merupakan daerah resapan yang dikelilingi oleh kerucut gunung api, khususnya di sekitar Gunung Lompobatang, yang memberikan potensi air tanah yang besar. Potensi air tanah di Kota Makassar secara umum terbagi menjadi 3 lapisan akuifer dengan penyebarannya secara vertikal dan horizontal. Hal tersebut dikontrol oleh stratigrafi yang terdiri dari batuan Formasi Camba, Baturape Cindako, dan Tonasa dengan kedalaman antara 30-225 meter, debit antara 0.5-15 liter/detik (Umar dkk., 2019).

Meskipun demikian, pesisir barat kota Makassar terdiri dari dataran rendah yang didominasi oleh daerah rawa dan pasang surut, sehingga kompleksitas akuifer di wilayah ini cukup tinggi. Lapisan akuifer utama di Makassar adalah tufa, yang memiliki sifat porositas baik dan terkait dengan sejarah kegunungapian daerah tersebut. Berdasarkan analisis akuifer, kondisi air tanah Kota Makassar telah terintrusi oleh air laut, hal ini dapat dilihat dari data geolistrik. Pada level kedalaman -25 dan 90 meter didapatkan kandungan air tanah dalam akuifer bersifat payau sedangkan pada level -50 dan -150 meter akuifer mengandung air tawar. Selain itu, topografi yang landai dan kedekatannya dengan laut, serta litologi yang terdiri dari endapan aluvium, rawa, dan pantai, menunjukkan bahwa air tanah di daerah ini dipengaruhi oleh air laut (Nawir & Umar, 2018). Oleh karena itu, penataan tata ruang harus disesuaikan dengan kondisi fisik lingkungan untuk mencegah meluasnya intrusi tersebut.

1.3.2 Penurunan Muka Tanah (*Landsubside*nce)

Penurunan muka tanah (*Landsubside*nce) adalah penurunan perlahan atau tenggelamnya segmen-segmen permukaan secara cepat akibat konsolidasi sedimen dan pergerakan material bumi di bawah permukaan sebagai hasil dari



yang efektif (Bagheri-Gavkosh dkk., 2021). Penurunan muka tanah langsung memaksa struktur tanah yang awalnya belum padat. Hal ini umumnya terjadi di daerah yang sebelumnya rawa, atau endapan banjir, yang kemudian dialihkan fungsi tata ruang untuk melakukan rekayasa tanah terlebih dahulu. Penurunan muka tanah akan menimbulkan fenomena geologi yang pada umumnya terjadi dalam skala yang luas sehingga manusia tidak langsung menyadarinya. Namun,

fenomena ini tentu saja akan berdampak pada kondisi lingkungan sekitar jika tidak segera diatasi oleh pemerintah dan masyarakat.

Fenomena *landsubsidence* disebabkan oleh faktor alamiah dan faktor buatan manusia (*antropogenik*). Menurut Whittaker and Reddish, 1989 dalam (Archenita dkk., 2015), secara umum faktor penyebab *landsubsidence* antara lain:

1. Penurunan tanah secara alami (*Natural subsidence*) yang disebabkan oleh:

- a. Siklus Geologi

Proses-proses yang terlibat dalam siklus geologi meliputi pelapukan (*denuation*), pengendapan (*deposition*), dan pergerakan kerak bumi (*crustal movement*). Keterkaitan antara proses-proses ini adalah bahwa pelapukan dapat terjadi akibat air, seperti pelapukan batuan yang disebabkan oleh erosi, baik secara mekanis maupun kimia. Selain itu, perubahan suhu juga dapat menyebabkan kerusakan pada permukaan batuan, dan angin berperan terutama di daerah yang kering dan gersang.

- b. Sedimentasi Wilayah Cekungan

Cekungan umumnya terletak di daerah-daerah dengan aktivitas tektonik lempeng, terutama di sekitar perbatasan lempeng. Seiring waktu, sedimen yang terakumulasi di cekungan semakin banyak, yang mengakibatkan peningkatan beban yang bekerja di area tersebut. Proses kompaksi sedimen ini menyebabkan terjadinya *landsubsidence*. *Landsubsidence* yang terjadi sebagian besar disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

- Gaya berat dari beban yang dihasilkan oleh endapan, ditambah dengan keberadaan air, yang menyebabkan lapisan kerak bumi menjadi lebih lentur.
- Aktivitas internal yang meningkatkan suhu kerak bumi, yang kemudian menyebabkan pengembangan dan kenaikan permukaan tanah. Namun, setelah itu proses erosi serta pendinginan akan kembali menyebabkan *landsubsidence*.
- Karakteristik deformasi lapisan tanah yang berkaitan dengan tekanan-tekanan yang ada.

2. Penurunan tanah akibat pengambilan air tanah (*groundwater extraction*)

Pengambilan air tanah secara berlebihan, melebihi kapasitas kemampuan pengambilan nya, akan mengakibatkan penurunan jumlah air tanah dalam suatu lapisan akuifer. Kehilangan air tanah ini menyebabkan kekosongan pada pori-pori tanah, sehingga tekanan hidrostatik di bawah permukaan tanah tidak sesuai dengan jumlah air tanah yang hilang. Akibatnya, lapisan mengalami pemampatan.

akibat beban bangunan (*settlement*)

bangunan di atas permukaan tanah dapat menyebabkan pemampatan pada lapisan tanah di bawahnya. Pemampatan ini terjadi kompresi partikel tanah, pergeseran partikel, serta keluarnya air dari dalam tanah. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin besar massa bangunan yang ada di permukaan tanah, semakin



dalam pula penurunan muka tanah yang terjadi. Faktor ini banyak ditemukan di kota-kota besar, sehingga tidak mengherankan jika kota-kota besar mengalami *landsubsidence*.

Landsubsidence akibat aktivitas antropogenik telah diteliti secara mendalam, terutama di lingkungan krisis seperti daerah yang sangat terurbanisasi dan zona pesisir. Kegiatan pemantauan ini memungkinkan pengumpulan informasi yang sangat berguna untuk mencegah kerusakan infrastruktur, merencanakan pengembangan perkotaan yang lebih berkelanjutan, dan mengurangi resiko. Pemahaman tentang distribusi temporal dan spasial deformasi permukaan tanah sangat penting untuk mengidentifikasi area yang paling terpengaruh oleh *landsubsidence* dan untuk memahami mekanisme yang terlibat. Di Masa lalu, teknik pengukuran *levelling* tradisional merupakan satu-satunya metode yang digunakan untuk memantau *landsubsidence*. Meskipun teknik ini memiliki akurasi yang tinggi, penggunaannya semakin menurun seiring waktu karena biaya yang tinggi dan jumlah titik yang dapat diukur. Namun, dalam beberapa tahun terakhir teknologi InSAR telah membuktikan kemampuannya dalam memberikan informasi pemantauan deformasi permukaan tanah yang akurat dengan cakupan luas dari citra SAR (Fabris, Cenni dan Fiaschi, 2021).

1.3.3 Radar

Radar merupakan singkatan dari *Radio detection and ranging* dapat berupa suatu metode atau alat. Radar memancarkan gelombang elektromagnetik berupa gelombang radio dan gelombang mikro, dengan panjang gelombang milimeter hingga sekitar satu meter (Prasetyo, 2011). Penginderaan jauh sistem radar merupakan penginderaan jauh aktif, tenaga elektromagnetik yang digunakan terdapat pada sensor. Tenaga elektromagnetik yang digunakan terdapat pada sensor. Tenaga ini berupa pulsa bertenaga tinggi yang dipancarkan dalam waktu sangat pendek yakni sekitar 10^{-6} detik. Pulsa radar diarahkan ke suatu area tertentu. Ketika pulsa radar mengenai objek, pulsa tersebut dapat dipantulkan kembali ke sensor radar. Sensor radar mengukur dan mencatat waktu dari pemancaran hingga kembalinya pulsa, serta mengukur dan mencatat intensitas energi balik pulsa tersebut. Karena gelombang radar merambat dengan kecepatan cahaya, waktu yang diperlukan oleh pulsa untuk kembali dapat digunakan untuk menghitung jarak R sebagaimana dijelaskan dalam persamaan (1).

$$R = \frac{1}{2}ct \quad (1)$$

Dimana R adalah jarak, c adalah kecepatan cahaya, dan t adalah waktu faktor $\frac{1}{2}$ ditentukan oleh fakta bahwa sinyal menempuh jarak menuju objek dan sekali kembali ke sensor (Braun, 2019).

Waktu perjalanan pulsa radar, dapat dihitung jarak objek, arkan intensitas energi baliknya, dapat diperkirakan jenis nsitas atau kekuatan pulsa radar yang diterima kembali oleh karakteristik spektral obyek pada citra radar (Yusuf, 2017).



Karena radar menghasilkan sinyalnya sendiri, radar dapat beroperasi baik siang maupun malam. Selain itu, sinyal radar biasanya dapat menembus awan dan hujan, yang berarti bahwa citra radar dapat diperoleh tidak hanya pada siang atau malam hari tetapi dalam hampir semua kondisi cuaca (Zyl & Kim, 2011).

Radar beroperasi dalam *band radio frequency* pada spektrum elektromagnetik dengan rentang antara 5 Mhz (*high frequency*, HF) hingga 300 GHz (*millimeter wave*, mm). Tabel 1 menunjukkan frekuensi yang telah ditentukan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) beserta frekuensi yang terkait. Panjang gelombang elektromagnetik memiliki pengaruh signifikan terhadap kemampuan penetrasi gelombang tersebut. Panjang gelombang dikelompokkan ke dalam berbagai *band*, dan pemilihan panjang gelombang untuk sistem radar tergantung pada aplikasi yang akan dilakukan. Radar dapat memanfaatkan satu atau lebih band dalam proses penginderaan jauh (Budge Jr. & German, 2015).

Tabel 1. Radar frequency Bands (Budge Jr. & German, 2015)

Band	Frequency Range	Origin of Name
HF	3-30 MHz	<i>High frequency</i>
VHF	30-300 MHz	<i>Very high frequency</i>
UHF	300-1.0000 MHz	<i>Ultra high frequency</i>
L	1-2 GHz	<i>Long wave</i>
S	2-4 GHz	<i>Short wave</i>
C	4-8 GHz	<i>Compromise between S- and X- bands</i>
X	8-12 GHz	<i>Cross</i>
Ku	12-18 GHz	<i>Kurz-under</i>
K	18-27 GHz	<i>Kurz-German for "short wave"</i>
Ka	27-40 GHz	<i>Kurz-above</i>
V	40-75 GHz	<i>Very short</i>
W	75-110 GHz	<i>W follow V in alphabet</i>
mm	110-300 GHz	<i>millimeter</i>

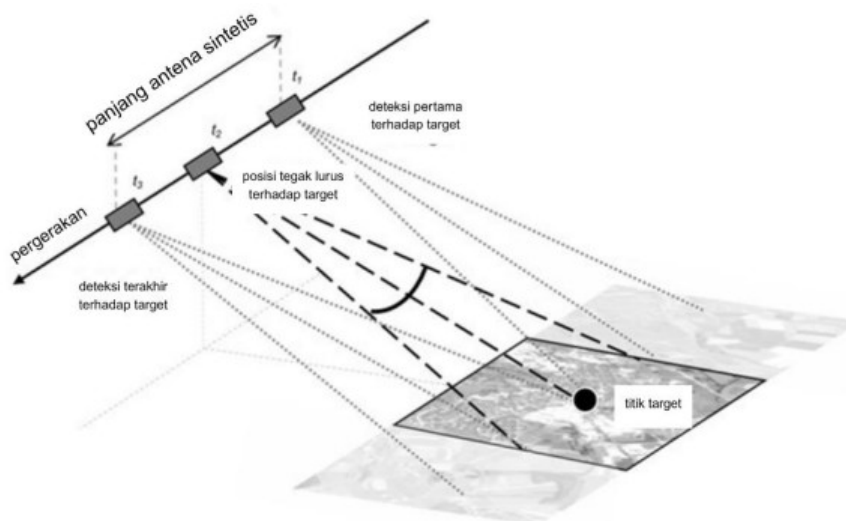
Dalam penginderaan jauh band yang biasa digunakan yaitu Ka, K, Ku, X, C, S, dan L-band. Penggunaan berbagai band dalam sistem radar dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Aplikasi-aplikasi gelombang radar (Prasetyo, 2011)

Band	Panjang Gelombang (cm)	Frekuensi (GHz)	Aplikasi
X	2.4 – 3.8	8-12	Militer dan survey pemetaan
	3 – 7.5	4-8	Pada radar ruang angkasa seperti ERS1 dan RADARSAT
	5 - 15	2-4	Pada sistem Almaz
	5 - 30	1-2	Pada SEASAR dan JERS1
	- 100	0,3-0,001	USA JPL - AirSAR

1.3.4 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Citra SAR dihasilkan dengan mengukur jarak dan pulsa yang dipancarkan/dihamburkan dari area target, dan mengandung amplitudo dan fase di setiap piksel. Amplitudo adalah ukuran pulsa yang dihamburkan oleh objek di setiap piksel dan fase mengukur jarak antara radar dan objek yang sebanding dengan panjang gelombang (λ) untuk mendeteksi deformasi permukaan (Ozden dkk., 2016). Salah satu faktor utama pencitraan SAR adalah resolusi spasial, yang ditentukan oleh rasio antara panjang antenna. Semakin panjang antenna semakin tinggi resolusi spasial yang dapat dicapai. Pada satelit ERS memiliki radar C-band dengan panjang gelombang sekitar 5 cm, untuk memperoleh resolusi spasial sebesar 10 m, dibutuhkan antenna dengan panjang sekitar 4.250 m (NASA, 2025). Karena antenna besar tidak praktis untuk satelit, konsep *aperture sintesis* dikembangkan dengan menggabungkan data dari antenna yang lebih pendek untuk mensimulasikan antenna yang lebih panjang. Selain itu, efek *Doppler shift* selama pergerakan sensor membantu meningkatkan resolusi pencitraan dalam arah azimuth (Braun, 2019).



Gambar 2. Prinsip *Synthetic Aperture Radar* (Braun, 2019)

Gambar radar bergantung pada sinyal yang dipantulkan, yang dapat disebarkan ke segala arah, diserap, atau diarahkan kembali ke pemancar/penerima. Perilaku ini dipengaruhi oleh sifat hamburan dan sifat fisiknya relatif terhadap radiasi yang masuk. Sinyal yang kembali kemudian dikonversi ke dalam tampilan dengan tingkat abu-abu yang bervariasi, di mana memiliki area tertentu. Piksel yang lebih gelap mengindikasikan yang lebih lemah, sedangkan piksel yang lebih cerah mengembalian yang lebih kuat. Kekuatan sinyal hamburan balik faktor-faktor seperti ukuran hamburan, arah gelombang, kadar gelombang radar. Permukaan yang halus dibandingkan ombang radar biasanya tampak gelap, seperti halnya wilayah bayangan yang tidak dapat dijangkau oleh sinar radar. Jalan

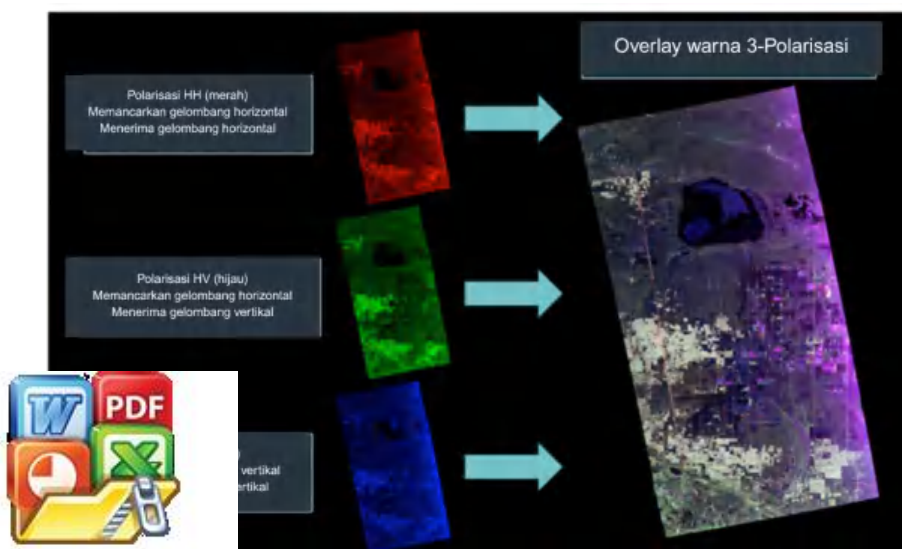


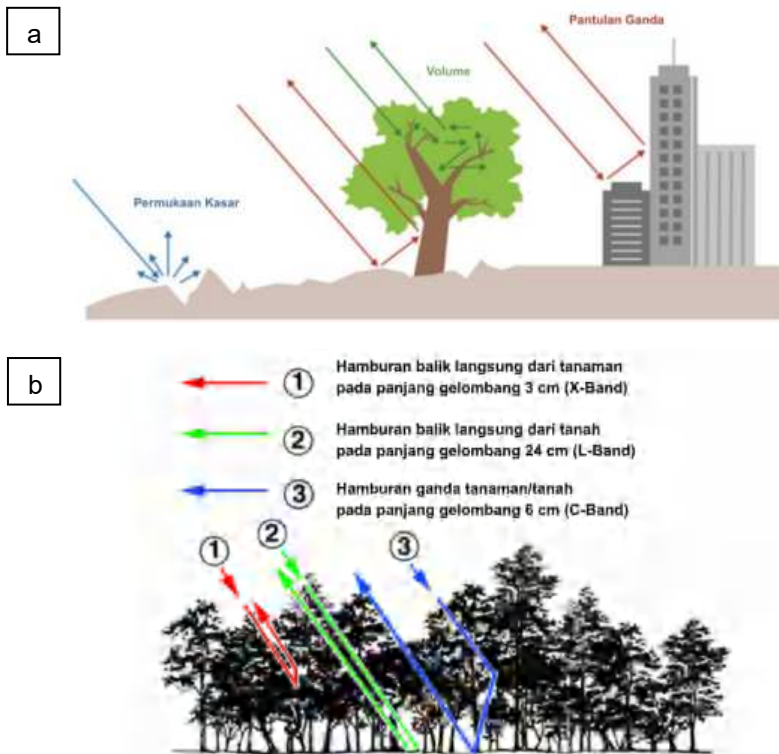
atau jalan raya sering kali tampak gelap, seperti halnya danau, rawa, atau daerah yang tergenang air. Sebaliknya, sebuah kota dapat tampak terang karena adanya beberapa hamburan di antara bangunan. Lahan pertanian terbuka atau perkebunan kecil biasanya menunjukkan kecerahan sedang. Daerah berbukit atau pegunungan dengan sedikit vegetasi dapat terlihat cerah jika tidak dibayangi atau di luar jangkauan sinar radar. Daerah yang tergenang air atau sawah cenderung tampak gelap (Abidin Ismail, 2001).

1.3.5 Polarimetri dan *Backscatter* Citra SAR Sentinel-1

Polarimetri adalah metode yang umum digunakan untuk menghasilkan tutupan lahan. Objek tutupan lahan yang memiliki nilai koefisien dari hamburan balik, yang merupakan hasil korelasi antara dua parameter, yaitu radar dan area (medan). Dalam polarimetri, terdapat dua komponen ortogonal, yaitu komponen horizontal dan vertikal, yang merepresentasikan gelombang elektromagnetik. Kedua komponen ini menghasilkan pola *ellips* polarisasi, dimana *ellips* tersebut menunjukkan bahwa ujung vektor medan listrik sepenuhnya terpolarisasi ketika dilihat dari arah tertentu. Gelombang terpolarisasi dihasilkan oleh antenna yang dirancang dalam sistem radar untuk mengirim dan menerima gelombang elektromagnetik. Dua polarisasi dasar yang paling umum adalah polarisasi linear horizontal (H) dan polarisasi linear vertikal (V) (Ariyantoni & Rokhmana, 2020). Sistem radar yang menggunakan polarisasi linear H dan V dapat memiliki saluran sebagai berikut:

1. **HH** - untuk pengiriman horizontal dan penerimaan horizontal
2. **VV** - untuk pengiriman vertical dan penerimaan vertical
3. **HV** - untuk pengiriman horizontal dan penerimaan vertical
4. **VH** - untuk pengiriman vertical dan penerimaan horizontal





Gambar 4. (a) *Backscattering* pada berbagai permukaan (b) *Backscattering* pada band X, L, dan C-band

Backscatter dalam SAR adalah bagian dari sinyal yang dipancarkan dan dipantulkan kembali ke sensor, dipengaruhi oleh faktor seperti panjang gelombang, kekerasan permukaan, dan mekanisme *scattering*. Panjang gelombang sinyal SAR menentukan seberapa dalam sinyal dapat menembus berbagai permukaan; misalnya, gelombang X-band dengan panjang gelombang pendek memiliki penetrasi minimal dan sebagian besar memantulkan sinyal dari kanopi atas di area vegetasi, sedangkan gelombang L-band dengan panjang gelombang panjang dapat menembus lebih dalam, menangkap sinyal dari tanah di bawah vegetasi. Untuk gelombang C-band dengan panjang gelombang sedang berguna untuk mendeteksi struktur dibawah lapisan permukaan seperti pasir kering. Kekasaran permukaan juga berperan penting, Dimana permukaan halus seperti air tenang atau jalan akan memantulkan sinyal menjauh dari sensor,

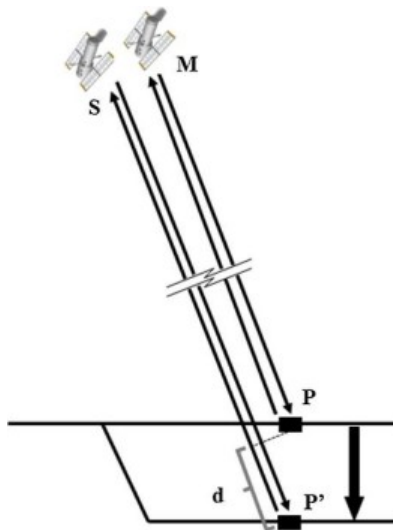


pantulan yang lemah, sedangkan permukaan kasar seperti permukaan air akan memantulkan sinyal ke berbagai arah, menghasilkan *backscatter* yang kuat. Di daerah perkotaan, *scattering double bounce* terjadi Ketika gelombang memantul antara tanah dan struktur vertikal, menciptakan sinyal yang sangat kuat (JOUAV, 2024). Secara keseluruhan, mekanisme *scattering* ini berkontribusi pada kekuatan dan detail yang terdeteksi dalam citra SAR.

1.3.6 Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)

Prosedur *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) menggunakan sinyal gelombang mikro yang dihamburkan dari permukaan bumi yang pertama kali dipancarkan oleh sensor SAR. Hasil dari perbedaan fase menghasilkan jenis citra baru yang disebut dengan interferogram, yang akan menunjukkan apakah wilayah yang diteliti tersebut terjadi penurunan atau kenaikan muka tanah. Interferometry DInSAR didasarkan pada pengukuran fase dari pasangan gambar tunggal, yang memungkinkan kita untuk mengumpulkan pengukuran tingkat milimeter dari sejumlah besar titik-titik yang terdeformasi, termasuk titik-titik yang secara fisik tidak dapat diakses atau tidak aman. Dengan ketelitian tingkat milimeter, estimasi perbedaan fase dapat digunakan untuk menghitung perpindahan permukaan vertikal pada garis pandang satelit (LOS). Istilah *differential* menunjukkan penghilangan pengaruh fase topografi pada interferogram SAR. Peristiwa deformasi tunggal, termasuk tanah longsor, gempa bumi, dan letusan gunung berapi, telah ditentukan dengan menggunakan metode DInSAR (Niraj, Gupta dan Shukla, 2022).

Fase interferometri ($\Delta\phi$) yang dihasilkan oleh InSAR dipengaruhi oleh lima kontribusi utama sinyal fase. Pertama, komponen fase $\Delta\phi_{flat}$ yang muncul akibat adanya variasi topografi. Kedua, $\Delta\phi_{elevasi}$ menggambarkan pergeseran fase yang disebabkan oleh perbedaan ketinggian. Ketiga, $\Delta\phi_{deformasi}$ dihasilkan dari deformasi permukaan, yang menunjukkan perubahan yang terjadi di tanah. Selain itu, $\Delta\phi_{atmosfer}$ adalah perubahan fase yang disebabkan oleh kondisi atmosfer, yang dapat mempengaruhi propagasi sinyal. Terakhir, $\Delta\phi_{noise}$ mewakili gangguan fase yang disebabkan oleh noise yang tidak diinginkan. Efek gabungan dari komponen-komponen ini membentuk total fase interferometri, yang dinyatakan secara matematis dalam metode DInSAR (I Putu Pudja, 2018).



DInSAR dalam pengukuran deformasi (Crosetto dkk., 2016)



Persamaan (2) merupakan prinsip DInSAR berdasarkan (Crosetto *dkk.*, 2016) dengan mempertimbangkan satu piksel pada permukaan tanah P, dengan sensor mengakuisisi citra SAR pertama dari sebuah satelit pada posisi M (Master), yang mengukur fase φ_M :

$$\varphi_M = \varphi_{geom.M} + \varphi_{scatt.M} = \frac{4 \cdot \pi \cdot MP}{\lambda} + \varphi_{scatt.M} \quad (2)$$

Dimana MP adalah Jarak sensor Master ke target P, φ_{scatt} adalah pergeseran fase yang didapatkan saat interaksi antara gelombang mikro dengan target, λ adalah panjang gelombang radar, dan faktor 4π adalah Lintasan dua arah (radar-target-radar). Dengan Asumsi bahwa sensor mendapatkan citra kedua pada posisi satelit S (Slave), yang mengukur fase φ_S pada piksel yang sama yaitu P, maka didapatkan persamaan (3).

$$\varphi_S = \varphi_{geom.S} + \varphi_{scatt.S} = \frac{4 \cdot \pi \cdot SP}{\lambda} + \varphi_{scatt.S} \quad (3)$$

Pada proses Interferometric SAR (InSAR) dimanfaatkan perbedaan fase $\Delta\varphi$ seperti pada persamaan (4).

$$\Delta\varphi_{Int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{4\pi}{\lambda}(SP - MP) + \varphi_{scatt.S} - \varphi_{scatt.M} \quad (4)$$

Fase interferometri tersebut menjadi dasar dalam pembuatan Digital Elevation Model (DEM) dalam memperkirakan topografi wilayah yang diamati. Namun, sensitivitas InSAR terhadap topografi dipengaruhi oleh baseline satelit (SM), khususnya pada proyeksi (SM) dalam arah tegak lurus terhadap Line of Sight (LOS). Dalam pengukuran deformasi DInSAR, fase φ_M diukur dengan mempertimbangkan satu jejak piksel P dan akuisisi pertama dari posisi satelit M. kemudian, dengan asumsi target berpindah dari P ke P', sensor kemudian memperoleh citra kedua dari posisi satelit S, maka fase φ_S diperkirakan pada persamaan (5).

$$\varphi_S = \varphi_{geom.S} + \varphi_{scatt.S} = \frac{4 \cdot \pi \cdot SP'}{\lambda} + \varphi_{scatt.S} \quad (5)$$

Maka, dalam kasus ini fase interferometri $\Delta\varphi_{Int}$ dinyatakan dengan persamaan (6)



$$= \varphi_S - \varphi_M = \frac{SP' - MP}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \varphi_{scatt.S} - \varphi_{scatt.M} \quad (6)$$

hkan dan mengurangkan suku $SP / \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}\right)$ maka didapatkan

$$\Delta\varphi_{Int} = \varphi_S - \varphi_M = \frac{SP - MP}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \frac{SP' - SP}{\frac{\lambda}{4 \cdot \pi}} + \varphi_{scatt.S} - \varphi_{scatt.M} \quad (7)$$

Dimana suku pertama adalah komponen fase topografi φ_{topo} , yang mencakup komponen fase *ellipsoid* referensi, dan suku kedua adalah komponen fase pergeseran φ_{displ} , yang terkait dengan pergeseran LOS. Jika DEM dari area yang diamati telah tersedia maka dua suku terakhir dapat diabaikan, φ_{topo} dapat disimulasikan dan dikurangkan dari $\Delta\varphi_{Int}$ (proses dilakukan dalam pembuatan DEM), maka didapatkan fase DInSAR $\Delta\varphi_{D-Int}$ pada persamaan (8) dan (9)(Adidafa dan Basyid, 2023).

$$\Delta\varphi_{D-Int} = \Delta\varphi_{Int} - \varphi_{topo.flat} = \varphi_{displ} \quad (8)$$

$$\Delta\varphi_{D-Int} = \varphi_{displ} + \varphi_{topo.res} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{orb} + \varphi_{noise} + 2k\pi \quad (9)$$

Dimana:

$\Delta\varphi_{D-Int}$: nilai fase deformasi total (DInSAR)

$\varphi_{topo.flat}$: fase topografi bumi datar

φ_{displ} : fase deformasi permukaan

$\varphi_{topo.res}$: fase kesalahan topografi residual (RTE)

$\Delta\varphi_{atm}$: fase kesalahan akibat pengaruh atmosfer

$\Delta\varphi_{orb}$: fase kesalahan akibat pengaruh posisi orbit

φ_{noise} : fase *noise*

$2k\pi$: fase ambiguitas (Dimana k adalah bilangan bulat, berasal dari sifat nilai fase yang dibungkus dalam rentang $(-\pi, \pi]$)

Untuk menghilangkan diskontinuitas 2π pada interferogram (*wrapped phase*) maka dilakukan proses *phase unwrapping* yang merupakan proses yang sangat menentukan dalam InSAR. Proses ini melibatkan penambahan dan pengurangan fasa relatif dengan 2π atau kelipatannya pada lokasi-lokasi yang sesuai, dengan tujuan untuk menghasilkan citra fase yang optimal. Persamaan (10) adalah persamaan yang digunakan untuk mendapatkan fase absolut. Dimana K adalah ambiguitas fasa (Azkiya dan Jatmiko, 2015).

$$\varphi_{absolut} = \varphi_{relatif} + 2\pi \cdot K \quad (10)$$



Dimana nilai deformasi dalam satuan metrik maka dilakukan konversi ke nilai tinggi. Persamaan (11) dan (12) merupakan rumus untuk konversi tinggi menjadi tinggi dengan rumus *displacement of earth's sensor Line of Sight* (LOS) (Ng dkk., 2009).

$$\Delta\varphi_{displ} = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (11)$$

$$\Delta R = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\phi_{displ} \quad (12)$$

dimana λ adalah panjang gelombang SAR, $\Delta\phi_{defo}$ adalah nilai perbedaan fase dan ΔR adalah deformasi sepanjang Line of Sight (LOS).

1.3.7 Digital Elevation Model Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

Misi SRTM mengumpulkan hampir 80% topografi bumi dalam waktu 11 hari pada bulan Februari 2000. Radar pencitraan ruang angkasa C-band dan interferometri lintasan tunggal digunakan secara bersama-sama untuk menghitung ketinggian permukaan. Setelah beberapa kali pemrosesan data, DEM SRTM 3- arc-detik (~90 m di Khatulistiwa) dan 1- arc-detik (~30 m di Khatulistiwa) yang terisi kekosongan dirilis oleh Badan Penerbangan dan Antariksa Nasional (NASA) dengan cakupan spasial antara 60° LU dan 54° LS (NASA, 2025).

1.3.8 Sentinel-1

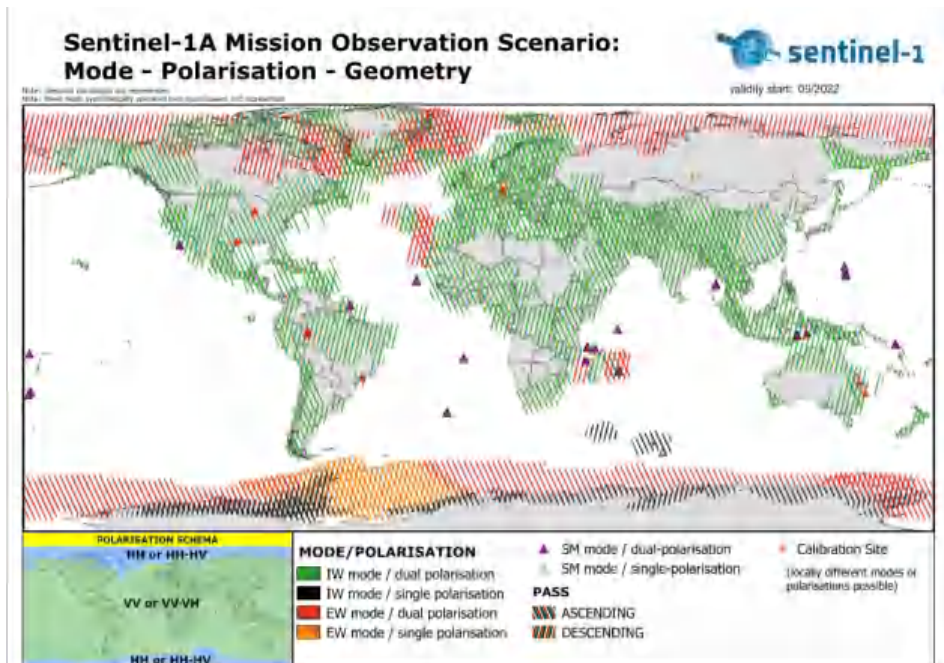
Sentinel-1 adalah salah satu satelit SAR yang dikembangkan oleh European Space Agency (ESA). Konstelasi Sentinel-1 terdiri dari Sentinel-1A dan Sentinel-1B yang masing-masing beroperasi pada orbit dekat kutub dan sinkron dengan matahari dengan siklus pengulangan 12 hari. Diluar wilayah kutub, mode utama akuisisi di atas daratan adalah *mode interferometric Wide (IW) swaths*, yang mengakuisisi gambar resolusi spasial ~5 m x 20 m dalam polarisasi *transmit-receive* yang terdiri dari *vertical-vertical (VV)* dan *vertical-horizontal (VH)* (Jans dkk., 2025). Sentinel-1 menggunakan sensor SAR C-Band dengan panjang gelombang 3,75-7,5 cm dengan instrumen *Synthetic Aperture Radar* Polarisasi ganda sehingga cocok untuk analisis lahan. Sentinel-1A dan Sentinel-1B diluncurkan pada tahun 2014 dan 2016. Namun, pada bulan Desember 2021, terdapat anomali pada satu daya Sentinel-1B yang menyebabkan sensor SAR berhenti bekerja dan tidak bisa mengirimkan data radar sejak 23 Desember 2021. Telah dilakukan upaya untuk memulihkan daya ke sensor namun gagal, sehingga misi Sentinel-1B secara resmi berakhir pada 3 Agustus 2022 (NASA, Sentinel - 1, 2025).

Sentinel-1 menyediakan data yang berkualitas, akuisisi data yang tepat, cakupan area yang luas, serta sebaran data yang memadai sehingga cocok diaplikasikan untuk pengamatan perairan, pengamatan daratan, dan penggunaan darurat (Aryatama, Sukmono and Hadi, 2023). Sentinel-1 memiliki 4 mode pengamatan dengan mode utama di daratan adalah mode *interferometric wide swath (IW)*. Sentinel-1 memiliki 4 mode standar operasional yang didesain untuk interoperabilitas dengan sistem lainnya (Azhari *et al.*, 2020):



- *Stripmap (SM)*, memiliki lebar swath 80 km dan resolusi spasial 5 m x 10 m, digunakan untuk pemantauan area kecil dan situasi darurat.
- *Wide Swath Mode (IW)*, dengan lebar swath 250 km dan resolusi 10 m x 20 m, mode ini memungkinkan sinkronisasi interferometri dan pemantauan perubahan permukaan.

- c. *Extra Wide Swath Mode (EW)*, memiliki lebar swath 400 km dan resolusi 25 m x 100 m, mode ini digunakan terutama untuk pemantauan laut dan es laut.
- d. *Wave Mode (WV)*, beroperasi dengan data rate rendah, mode ini memiliki resolusi 5 m x 20 m dan mengambil gambar dalam vignettes berukuran 20 km x 20 km pada interval 100 km sepanjang orbit, ideal untuk pemantauan lautan.



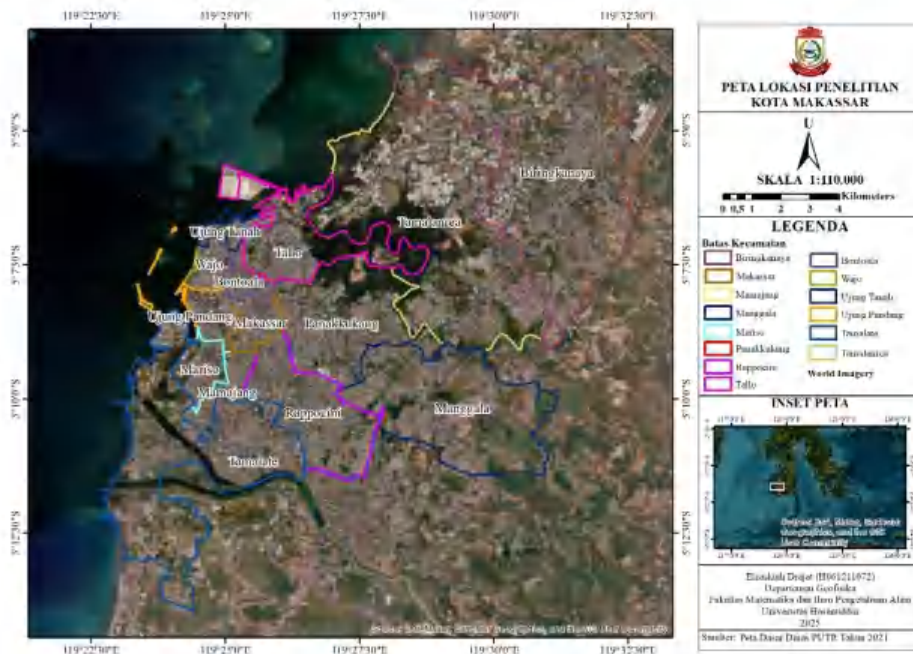
Gambar 6. Skenario Observasi Sentinel-1A (Copernicus,2024) (ESA, 2025)



BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian secara astronomi pada koordinat yang terletak antara 119°24'17,38" Bujur Timur dan 5°08'06,19" Lintang Selatan di Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan.



Gambar 7. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu :

1. Perangkat keras terdiri dari
 - a) 1 buah laptop
 - b) 1 buah printer
2. Perangkat lunak terdiri dari :
 - a) *Software* ESA-SNAP (*Sentinel Application Platform*) 9.0 dan Plugin SNAPHU



~ ArcGIS 10.8
~ QGIS 3.28.14
~ Microsoft Word 2021
~ Microsoft Excel 2021

an pada Penelitian Tugas Akhir ini yaitu :

1. Satelit citra Sentinel-1 tipe *Single Look Complex* (SLC) dengan polarisasi VV dan orbit *Ascending*. Akuisisi data dengan rentang waktu dari tahun 2020-2024.

Tabel 3. Data Sentinel 1 (*European Space Agency*, 2021)

No.	Citra	Tanggal	Polarization	Arah
1	Master	11 Agustus 2020	VV	<i>Ascending</i>
	Slave	18 Agustus 2021	VV	<i>Ascending</i>
2	Master	18 Agustus 2021	VV	<i>Ascending</i>
	Slave	13 Agustus 2022	VV	<i>Ascending</i>
3	Master	09 Mei 2022	VV	<i>Ascending</i>
	Slave	16 Mei 2023	VV	<i>Ascending</i>
4	Master	08 Agustus 2023	VV	<i>Ascending</i>
	Slave	14 Agustus 2024	VV	<i>Ascending</i>

2. Data DEM SRTM 30 Meter
3. Data GPS Kota Makassar (BIG)
4. Data geologi Kota Makassar
5. Data Tutupan Lahan

2.3 Tahapan Penelitian

2.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan dilakukan beberapa tahap kegiatan, yaitu sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah
Pada tahapan ini merupakan tahap awal dalam penelitian ini. Permasalahan pada penelitian ini adalah bagaimana cara mengetahui laju *landsubsidence* pada tahun 2020-2024 di daerah kota Makassar akibat pembebanan bangunan dan penggunaan air tanah yang berlebihan serta faktor lainnya dengan menggunakan data Sentinel 1 dengan teknik DInSAR.
2. Studi Literatur
Pada tahap ini bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan fenomena *landsubsidence* khususnya kota Makassar serta teknologi radar, interferometry SAR, metode Two-Pass DInSAR, dan literatur lain yang mendukung baik dari buku, jurnal, dan lain-lain.
3. Pengumpulan Data

Sebelum mengolah data, maka data yang diperlukan harus dikumpulkan



Dalam hal ini data yang dibutuhkan meliputi data citra satelit dengan polarisasi VV beserta data pendukung lainnya yang digunakan dalam menganalisa serta uji akurasi.

Analisa Data

Analisa data citra sar terdapat beberapa tahapan yaitu:

Proses *Co-Registration* dua file sentinel yang telah diimport kemudian digabungkan serta memilih area yang akan diolah untuk efisiensi pemrosesan. Proses ini dikenal sebagai *Co-Registration* dengan *filter spectral ESD (Enhanced Spectral Density)*. ESD adalah metode untuk meningkatkan densitas frekuensi pada citra Sentinel-1, sehingga informasi frekuensi yang dianggap sebagai data dapat dipisahkan dari gangguan atmosfer dan topografi. Selanjutnya, pemilihan polarisasi dan penentuan *burst* sesuai area yang akan diteliti.

2. *Interferogram*

Proses *interferogram* akan menghasilkan nilai band utama yaitu *phase* dan *coherence*, *phase* menandakan beda fase dari dua buah citra sedangkan *coherence* merupakan nilai yang menunjukkan kestabilan pemrosesan interferogram.

3. *Deburst*

Proses *deburst* dilakukan untuk menghilangkan garis hitam yang muncul dikarenakan cara perekaman citra sentinel-1 pada citra *interferogram*. Garis hitam tersebut yang memisahkan *burst* pada data sentinel-1.

4. Koreksi Fase pada Topografi

Fase dari topografi adalah gangguan pada data fase dari hasil citra sar yang dihitung dalam proses *interferogram*. Gangguan ini terjadi karena perbedaan elevasi permukaan bumi menyebabkan perubahan pada fase gelombang yang terekam oleh sensor. Hasil pemrosesan interferogram yang telah dikoreksi fase topografi disebut dengan DInSAR (*Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar*).

5. *Multilooking*

Hasil DInSAR yang telah didapatkan masih dalam *view slant range*. *Slant Range* merupakan hasil potret citra satelit yang memiliki sudut kemiringan, karena sudut kemiringan tertentu sehingga elevasi topografi tidak dapat terbaca dengan baik. Oleh karena itu harus dikoreksi agar gambar diubah dalam bentuk vertikal dengan proses *multilooking*.

6. *Filtering*

Hasil dari proses *multilooking* terlihat ada pola warna yang tertutupi oleh bintik-bintik nilai fase yang menandakan bahwa fase interferogram masih memiliki gangguan nilai sehingga perlu dilakukan *filtering* pada fase atmosfer. Filtering yang digunakan untuk menghilangkan gangguan tersebut yaitu *Goldstein Phase Filtering*.

7. Proses Unwrapping Phase

Nilai fase hasil dari interferogram yang diperoleh perlu diubah menjadi pergeseran (*displacement*). Proses konversi ini menggunakan plugin *snaphu* untuk membuat folder baru untuk menyimpan hasil *export* *snaphu*. *wrapped* dilakukan dengan mengubah nilai fase gelombang tuan radian sehingga dapat diinterpretasikan sebagai telah proses *unwrapped* maka hasilnya diimport ke dalam file yang sudah difilter fasenya.

→ to *Displacement*

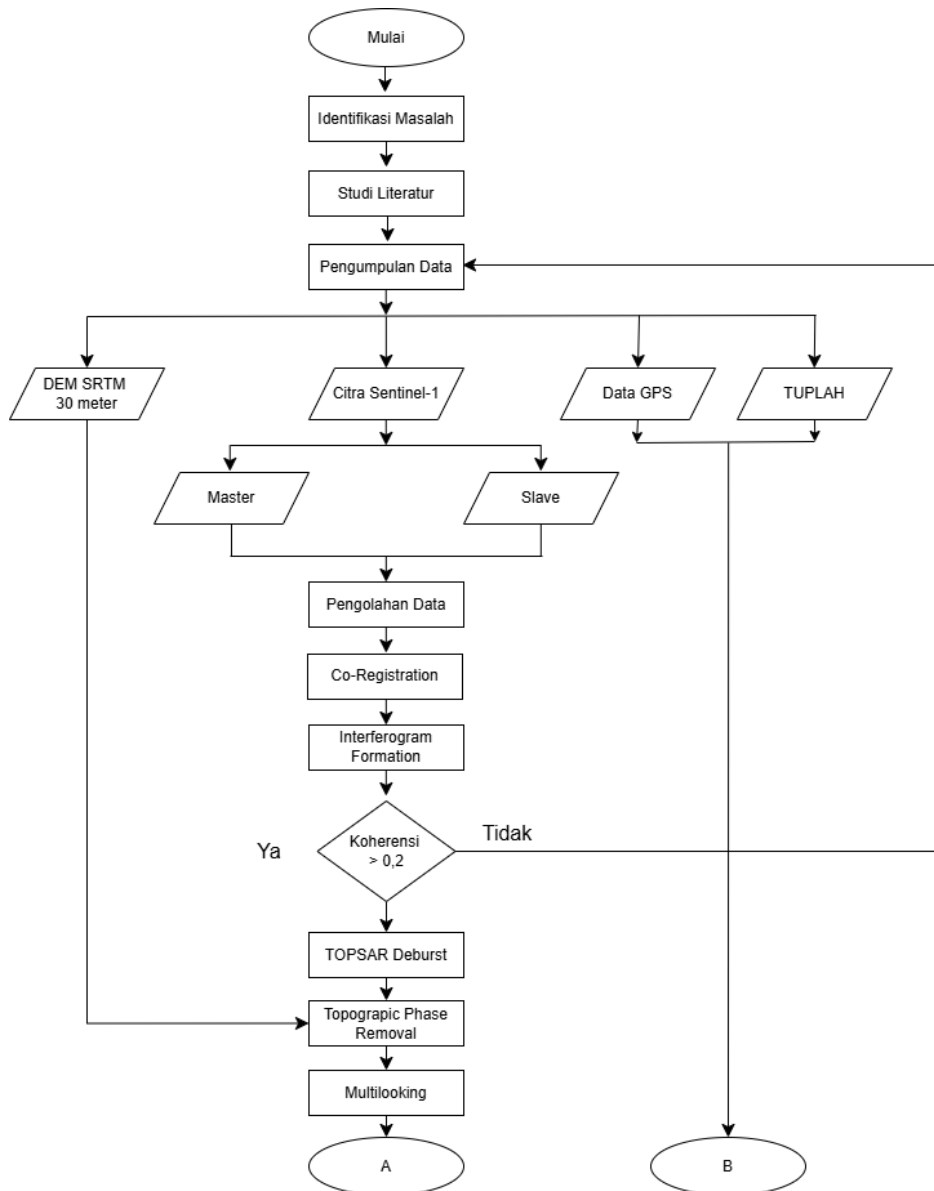


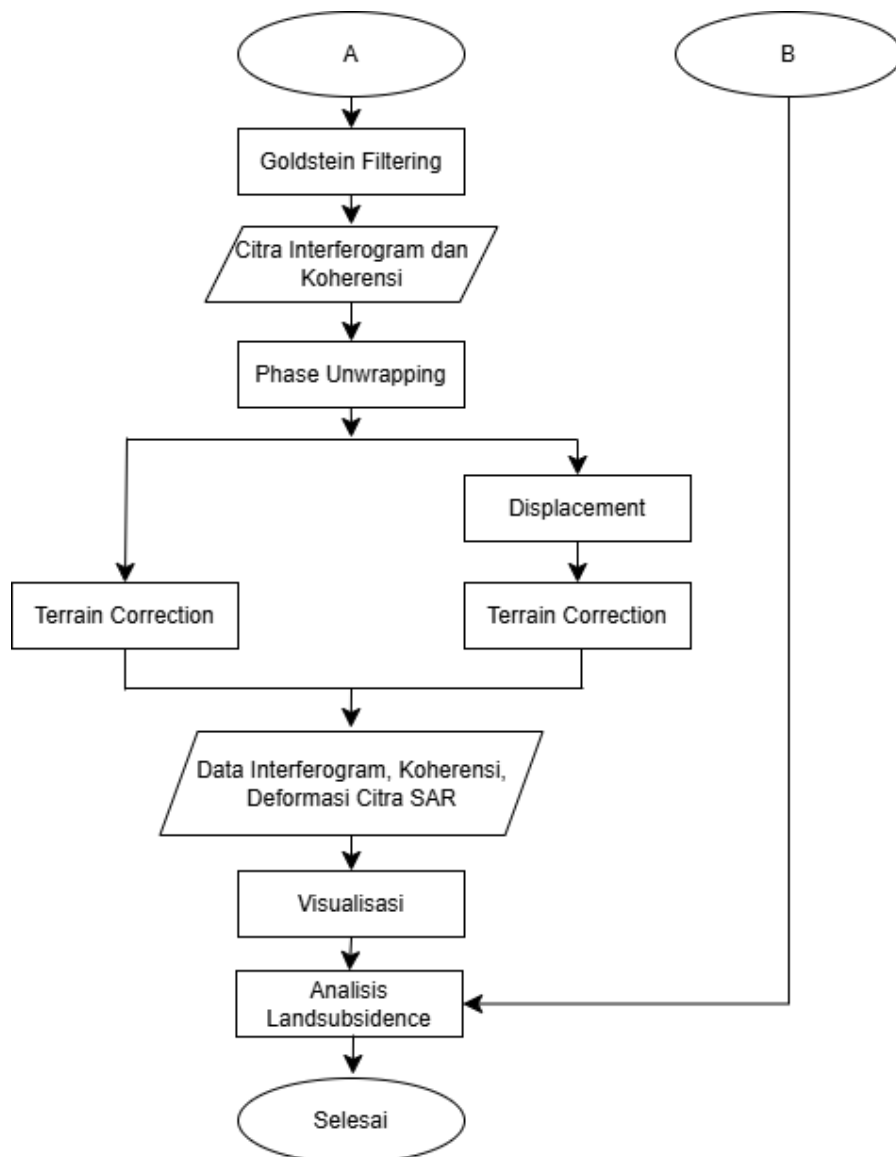
Nilai dari hasil *unwrapped* bukan dalam nilai *displacement* dengan satuan radian, untuk diubah menjadi satuan meter maka dilakukan proses *phase to displacement*.

9. Konversi Gambar ke Latitude-Longitude dan *Terrain Correction*
Untuk mendapatkan koordinat latitude-longitude dan elevasi, perlu dilakukan proses *terrain correction* pada hasil citra *displacement* karena data tersebut belum mengandung informasi koordinat dan elevasi.
10. *Stacking* Hasil *Unwrap* dan *Displacement*
Hasil citra dari *unwrapped* dan *displacement* dilakukan *stacking* untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.
11. *Stacking* Hasil InSAR
Untuk mendapatkan laju *landsubsidence* dilakukan *stacking* pada semua hasil InSAR agar menjadi satu file SAR.
12. Analisis Statistik
Data hasil *landsubsidence* dan koherensi dilakukan analisis statistik setiap kecamatan dengan mencari nilai minimum, maksimum dan rata-rata.
13. Validasi Data GPS
Validasi data GPS merupakan proses penting untuk memastikan akurasi hasil DInSAR. Hasil DInSAR yang diverifikasi dengan data GPS menunjukkan konsistensi dan ketepatan dalam pemetaan.
14. Validasi Data Geologi dan Tutupan Lahan
Validasi data geologi dan tutupan lahan digunakan untuk menganalisis faktor penyebab terjadinya *landsubsidence*.



2.3.3 Diagram Alir





Gambar 8. Diagram Alir

