

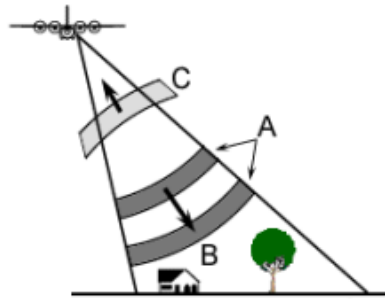
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Satelit Radar

Kata Radar pertama kali digunakan oleh Angkatan Laut Amerika Serikat (*United States Navy -US Navy*) pada tahun 1940 yang merupakan singkatan dari *Radio Detection And Ranging*, yaitu untuk mendeteksi dan mengetahui lokasi suatu objek (Ismullah, 2011). Menurut *Image Center* (1996) Radar mulai dikembangkan dalam perang dunia ke II pada tahun 1940-an untuk mendeteksi pesawat terbang dan kapal laut, kemudian dilanjutkan dengan teknologi radar apertur riil (*Real Aperture Radar*) dengan sistem pandangan ke arah samping di pesawat terbang (*Side Looking Airborne Radar*). Antara tahun enam puluhan dan tujuh puluhan, sistem SLAR ini mulai digunakan untuk keperluan non militer, terutama untuk analisis lahan dan survei sumber daya alam. Dalam tahun 1970-an itu juga, *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) di Pasadena California, USA, melakukan penelitian khususnya pengembangan radar apertur riil menjadi radar apertur sintetik (Ismullah, 2011).

Sensor Radar memancarkan sinyal gelombang mikro (radio) ke arah target dan mendeteksi bagian sinyal yang berhambur balik. Kekuatan sinyal hamburan balik diukur untuk membedakan antara target yang berbeda dan *delay* waktu antara sinyal yang dikirim dan dipantulkan dapat menentukan jarak (atau jangkauan) ke target. Pada dasarnya Radar terdiri dari pemancar, penerima, antena, dan sistem elektronik untuk memproses dan merekam data.



Gambar 2. 1 Gambaran Penginderaan pada Radar

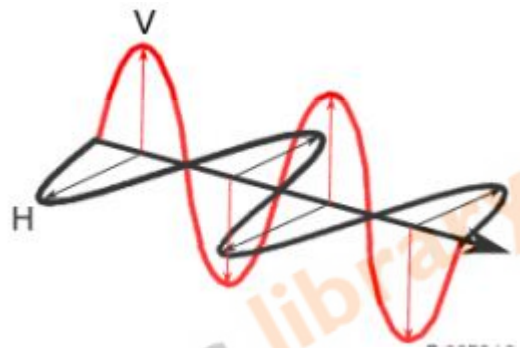
Sumber: CCRS, 2005.

Seperti pada Gambar 2.1 pemancar menghasilkan pancaran gelombang mikro (A) pada interval reguler yang difokuskan oleh antena menjadi sinar (B). Sinar radar menerangi permukaan secara miring pada sudut kanan terhadap gerakan sensor. Antena menerima sebagian dari energi yang dipantulkan (atau hamburan balik) dari berbagai objek yang diterangi (C). Dengan mengukur waktu *delay* antara pancaran dan hamburan balik dari target berbeda, jarak target dari radar dan lokasinya dapat ditentukan. Saat sensor bergerak maju, perekaman dan pemrosesan dari sinyal hamburan balik dapat membangun citra dua dimensi permukaan target (CCRS, 2005).

Biasanya kita mengarakterisasi radiasi elektromagnetik pada porsi cahaya tampak dan infra merah dengan panjang gelombang. Gelombang mikro pada spektrum biasanya dirujuk menurut panjang gelombang dan frekuensi. Cakupan gelombang mikro pada spektrum cukup besar, relatif terhadap cahaya tampak dan infra merah, dan terdapat beberapa cakupan panjang gelombang atau *band* digunakan yang memberikan surat-surat kode pada masa perang dunia II dan sampai sekarang (CCRS, 2005) diantaranya adalah:

- 1) Ka, K, Ku bands : panjang gelombang sangat pendek, digunakan dalam sistem radar udara, tetapi sekarang jarang digunakan.
- 2) X-band : digunakan secara luas pada sistem udara untuk pengintaian militer dan pemetaan medan.

- 3) C-band : umum di banyak sistem penelitian *airborne* (CCRS Convair-580 dan NASA AirSAR) dan sistem *spaceborne* (termasuk ERS-1 dan 2 dan RADARSAT).
- 4) S-band : digunakan pada satelit Rusia ALMAZ.
- 5) L-band : digunakan pada satelit SEASAT Amerika, JERS-1 Jepang, dan sistem *airborne* NASA.
- 6) P-band : Panjang gelombang paling panjang, digunakan pada sistem penelitian *airborne* NASA.



Gambar 2. 2 Arah Polarisasi Gelombang Mikro

Sumber: CCRS, 2005.

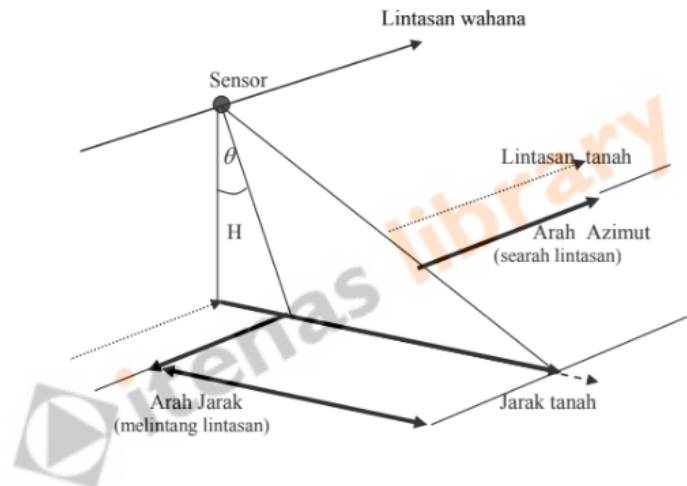
Kebanyakan radar dirancang untuk memancarkan radiasi gelombang mikro baik terpolarisasi secara horizontal (H) atau terpolarisasi secara vertikal (V). Demikian pula, antena menerima energi hamburan balik yang terpolarisasi secara horizontal atau vertikal, dan beberapa radar dapat menerima keduanya. Kedua keadaan polarisasi ini ditandai dengan huruf H untuk horizontal, dan V untuk vertikal seperti terlihat pada Gambar 2.2. Ada empat kombinasi polarisasi pengirim dan penerima, yaitu sebagai berikut:

- 1) HH : memancarkan horizontal dan menerima horizontal.
- 2) VV : memancarkan vertikal dan menerima vertikal.
- 3) HV : memancarkan horizontal dan menerima vertikal.
- 4) VH : memancarkan vertikal dan menerima horizontal.

Penggunaan polarisasi dan panjang gelombang yang berbeda dapat memengaruhi bagaimana radar menghasilkan informasi permukaan objek (CCRS, 2005).

2.2 Geometri Pencitraan Radar

Menurut Schreirer (1993) Pencitraan radar, baik dengan wahana pesawat terbang maupun satelit, selalu dilakukan ke arah miring (*side looking*), untuk jelasnya dapat dilihat pada geometri pencitraan radar Gambar 2.3, dan hal ini akan berakibat timbulnya suatu resolusi spasial, yang terdiri dari komponen resolusi ke arah melintang lintasan disebut resolusi jarak (*range resolution*) dan resolusi ke arah searah lintasan disebut resolusi azimuth (*azimuth resolution*) (Ismullah, 2011).



Gambar 2. 3 Geometri Pencitraan Radar

Sumber: Ismullah, 2011.

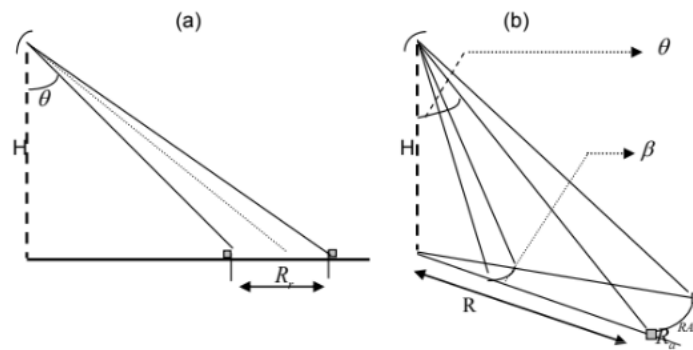
2.2.1 Radar Apertur Riil

Menurut Scheirer (1993) Pada radar apertur riil resolusi spasial ini ditentukan oleh sudut masuk, panjang pulsa dan lebar sorot (*beam width*). Panjang pulsa dan sudut masuk berakibat pada ukuran elemen resolusi jarak, sedang lebar sorot berpengaruh terhadap elemen resolusi azimuth (Ismullah, 2011).

Resolusi jarak (R_r^{RAR}), dan resolusi azimuth (R_a^{RAR}) dapat dilihat pada Gambar 2. 4. Dari Gambar 2. 4a, Resolusi jarak R_r^{RAR} dapat dihitung melalui hubungan berikut,

$$Rr^{RAR} = \frac{c.t}{2\sin\theta} \quad (2.1)$$

dimana θ = sudut masuk, t = panjang pulsa dalam satuan waktu dan c = kecepatan pulsa gelombang mikro (dalam vakum).



Gambar 2. 4 (a) Resolusi Jarak (b) Resolusi Azimuth

Sumber: Ismullah, 2011.

Lebar sorot antenna menentukan besar resolusi azimuth Ra^{RAR} dan makin kecil nilai jarak tanah R , resolusi azimuth juga makin kecil (Gambar 2.4). Resolusi azimuth dapat dihitung melalui hubungan berikut:

$$Ra^{RAR} = R.\beta = H \tan\theta.\beta \quad \text{dan} \quad \beta = \frac{\lambda}{d} \quad (2.2)$$

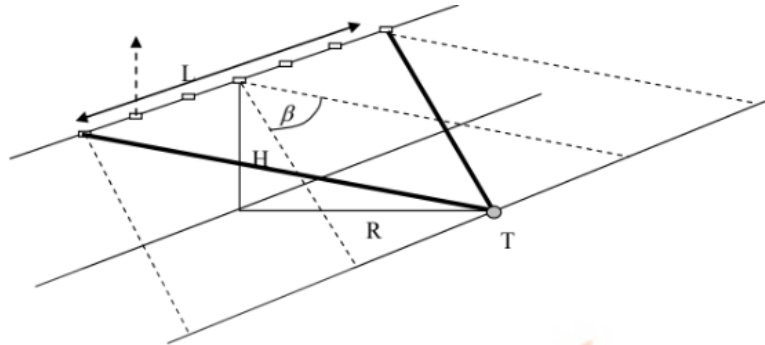
dimana H = tinggi sensor, β = lebar sorot, θ = sudut masuk, λ = panjang gelombang mikro dan d = panjang antenna (Lillesands dan Kiefer,1978 dalam (Ismullah, 2011)).

Dari hubungan di atas, dapat dilihat bahwa makin panjang antenna, harga Ra^{RAR} Makin kecil dan ini menunjukkan bahwa resolusi makin tinggi. Akan tetapi makin panjang antenna, merupakan kendala dan merupakan kelemahan dari sistim ini, karena makin panjang antenna akan makin sulit penempatannya di wahana (Ismullah, 2011).

2.2.2 Synthetic Aperture Radar

Berawal dari kelemahan pada radar apertur riil yang memerlukan antenna panjang untuk mendapatkan ketelitian tinggi, maka berkembang teknik

baru dalam sistem penginderaan radar dengan antenna yang relatif kecil yang dinamakan Radar Aperture Sintetik (*Synthetic Aperture Radar*). Radar aperture sintetik mengambil keuntungan dari gerakan wahana sepanjang lintasan, dan antenna yang relatif kecil tadi mampu menggantikan fungsi dari antenna yang panjang. Konsep radar aperture sintetik dapat dilihat dalam Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Konsep SAR

Sumber: Ismullah, 2011.

Keterangan:

R = jarak tanah (*ground range*)

d = panjang antenna

L = panjang antenna sintetik = $R \cdot \beta = R \cdot \frac{\lambda}{d}$ (m)

B = lebar sorot $\frac{\lambda}{d}$ (rad)

Dengan demikian makin besar jarak tanah, antenna sintetik juga akan makin panjang. Hubungan di atas hanya berlaku untuk penjalaran satu arah, sedang dalam radar aperture sintetik penjalaran harus dua arah untuk membentuk antenna sintetik tersebut (Ismullah, 2011). Maka untuk antenna sintetik berlaku hubungan berikut (Kingsley, 1992 dalam (Ismullah, 2011)),

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2L} = \frac{d}{2R} \text{ (rad)} \quad (2.3)$$

$$R_a = R \cdot \beta_s = \frac{d}{2} \quad (2.4)$$

Dengan demikian resolusi spasial pada sistem radar aperture sintetik tidak tergantung pada panjang gelombang dan tinggi wahana, hanya tergantung pada ukuran fisik panjang antenanya.

2.3 Sentinel 1 SAR

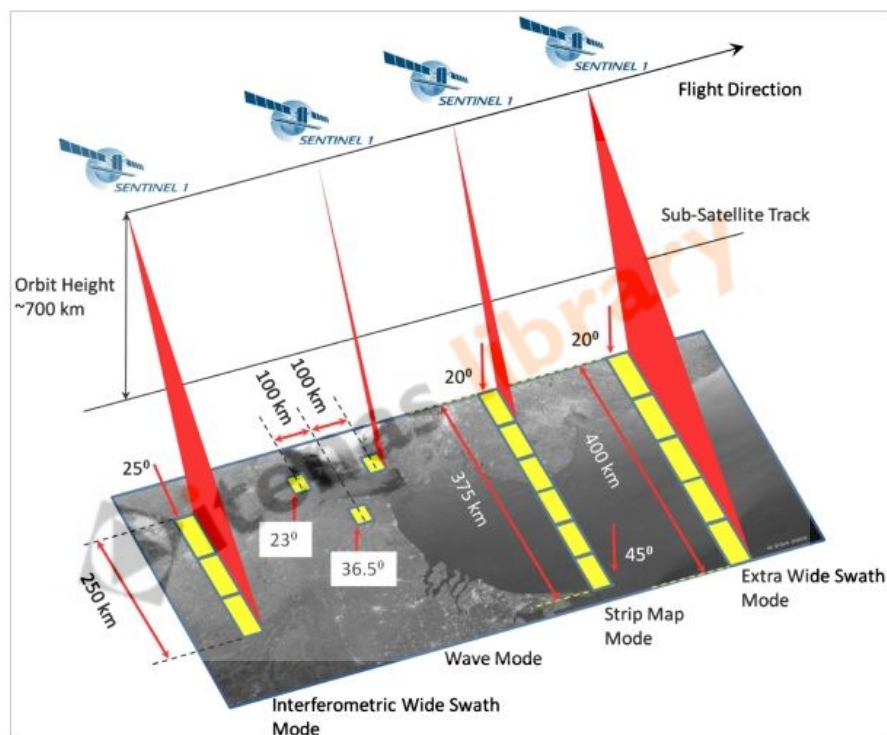
Sentinel 1 adalah misi radar yang menyediakan pencitraan di segala cuaca, siang dan malam secara terus menerus dengan *C-band*. Konstelasi Sentinel 1 memberikan cakupan geografis, dan penyebaran data yang cepat untuk mendukung aplikasi operasional di bidang pemantauan laut, pemantauan darat, dan layanan darurat. Sentinel 1 berpotensi menggambarkan daratan global, zona pesisir, dan rute pengiriman di perairan Eropa dalam resolusi tinggi dan mencakup lautan global secara berkala. Mode operasional utama memiliki fitur sapuan lebar (250 km) dengan resolusi geometri tinggi (biasanya resolusi produk Level-1 20 m) dan resolusi radiometrik, cocok untuk sebagian besar aplikasi (ESA, 2020)

Instrumen Sentinel 1 C-band SAR mendukung operasi dalam polarisasi tunggal (HH atau VV) dan polarisasi ganda (HH + HV atau VV + VH), diimplementasikan melalui satu rantai transmisi (dapat dialihkan ke H atau V) dan dua rantai penerima paralel untuk polarisasi H dan V. Seperti pada Gambar 2.6, instrumen Sentinel 1 SAR dapat memperoleh data dalam empat mode eksklusif, yaitu:

- 1) *Stripmap (SM)* : Mode pencitraan stripmap SAR standar di mana petak tanah diterangi dengan urutan pulsa yang kontinu, sementara berkas antena mengarah ke azimuth dan sudut elevasi tetap.
- 2) *Interferometric Wide Swath (IW)* : Data diperoleh dalam tiga sapuan menggunakan teknik pencitraan *Terrain Observation with Progressive Scanning SAR* (TOPSAR). Dalam mode IW, semburan disinkronkan dari satu bagian ke bagian lainnya untuk memastikan keselarasan pasangan interferometri. IW adalah mode operasional utama Sentinel 1 di darat.
- 3) *Extra Wide Swath (EW)* - Data diperoleh dalam lima petak menggunakan teknik pencitraan TOPSAR. Mode EW menyediakan cakupan sapuan yang sangat besar dengan mengorbankan resolusi spasial.

- 4) *Wave (WV)* - Data diperoleh dalam peta strip kecil yang disebut *vignettes*, terletak pada interval reguler 100 km di sepanjang jalur. *Vignettes* diperoleh dengan cara bergantian, memperoleh satu *vignette* pada sudut datang jarak dekat sementara *vignette* berikutnya diperoleh pada sudut datang jarak jauh. WV adalah mode operasional Sentinel 1 di atas lautan terbuka.

Produk SM, IW dan EW tersedia dalam polarisasi tunggal (HH atau VV) atau ganda (HH + HV atau VV + VH). WV tersedia polarisasi tunggal saja (HH atau VV).



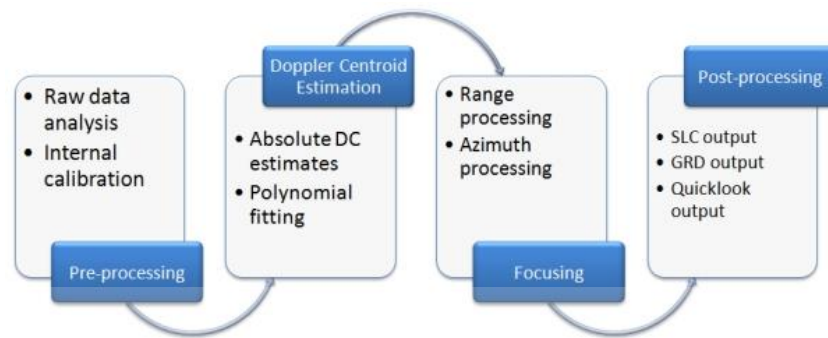
Gambar 2. 6 Mode Akuisisi Produk Sentinel 1A

Sumber: ESA, 2020.

Produk data Sentinel 1 yang diperoleh dalam mode SM, IW dan EW yang dihasilkan oleh PDGS (*Payload Data Ground Segment*) secara operasional didistribusikan pada tiga tingkat pemrosesan, yaitu level-0, level-1, dan level-2.

- 1) Produk level-0 terdiri dari data mentah SAR terkompresi dan tidak fokus untuk fungsi tertentu. Produk level-0 adalah dasar dari semua produk tingkat tinggi lainnya yang diproduksi.

- 2) Produk level-1 adalah produk yang ditujukan untuk sebagian besar pengguna data. Produk Level-0 (data mentah) diubah menjadi produk Level-1 oleh *Instrument Processing Facility* (IPF) melalui penerapan berbagai algoritma seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Produk Level-1 ini membentuk produk dasar dari mana produk Level 2 diturunkan.



Gambar 2. 7 Diagram Alir Pengolahan Produk Level-1

Sumber: ESA, 2020.

Data Level-1 dapat diproses menjadi produk *Single Look Complex* (SLC) dan / atau *Ground Range Detected* (GRD). Produk SLC menyimpan informasi fase dan diproses pada jarak piksel alami sedangkan produk GRD berisi amplitudo yang terdeteksi dan *multi-looked* untuk mengurangi dampak spekel.

- 3) Produk level-2 terdiri dari produk geofisika tergeolokasi yang diturunkan dari Level-1. Produk Level-2 *Ocean* (OCN) untuk aplikasi angin, ombak, dan arus biasanya berisi komponen geofisika yang berasal dari data SAR, yaitu *Ocean Wind field* (OWI), *Ocean Swell spectra* (OSW), dan *Surface Radial Velocity* (RVL) (ESA, 2020).

Berdasarkan mode akuisisi dan level pemrosesan, resolusi spasial citra Sentinel-1 SAR dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

- 1) Level-1 SLC memiliki resolusi spasial yang bergantung pada mode akuisisi. Seperti terdapat pada Tabel 2.1. untuk produk SLC SM/ IW/ EW, resolusi spasial dan jarak piksel diberikan pada sudut insiden terendah dan tertinggi. Untuk produk SLC WV, resolusi spasial dan jarak piksel disediakan untuk citra WV1 dan WV2.

Tabel 2. 1
Resolusi Spasial Produk Level-1 SLC

Mode	Resolusi rg x az	Piksel rg x az	Number of looks	ENL
SM	1,7x4,3 m sampai 3,6x4,9 m	1,5x3,6 m sampai 3,1x4,1 m	1x1	1
IW	2,7x22 m sampai 5,5x22	2,3x14,1 m	1x1	1
EW	7,9x43 m sampai 15x43m	5,9x19,9 m	1x1	1
WV	2,0x4,8 dan 3,1x4,8 m	1,7x4,1 dan 2,7x4,1 m	1x1	1

Sumber: ESA, 2020.

- 2) Level-1 GRD tersedia dalam satu dari tiga resolusi spasial, yaitu *Full Resolution* (FR) untuk mode SM; *High Resolution* (HR) untuk mode SM, IW, dan EW; serta *Medium Resolution* (MR) untuk mode SM, IW, EW, dan WV.

Tabel 2. 2
Resolusi Spasial Produk Level-1 GRD

	Mode	Resolusi rg x az	Piksel rg x az	Number of Looks	ENL
FR	SM	9x9 m	3,5x3,5 m	2x2	3,7
HR	SM	23x23 m	10x10 m	6x6	29,7
	IW	20x22 m	10x10 m	5x1	4,4
	EW	50x50 m	25x25 m	3x1	2,7
MR	SM	84x84 m	40x40 m	22x22	398,4
	IW	88x87 m	40x40 m	22x5	81,8
	EW	93x87 m	40x40 m	6x2	10,7
	WV	52x51 m	25x25 m	13x13	123,7

Sumber: ESA, 2020.

- 3) Produk level-2 OCN, OSW disediakan pada resolusi spasial 20 km x 20 km. OWI dan RVL memiliki resolusi spasial 1 km x 1 km (untuk SM / IW / EW). Untuk WV, hasil rata-rata pada grid 20 x 20km, hanya memberikan 1 nilai dengan sketsa (ESA, 2020).

2.4 Interferometric SAR (InSAR)

Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) adalah teknik penginderaan jauh gelombang mikro yang menggunakan setidaknya dua atau lebih citra SAR yang diperoleh pada waktu berbeda untuk menghasilkan peta perpindahan posisi guna mendeteksi perubahan permukaan di area tertentu. Selama 2 dekade terakhir, InSAR telah digunakan secara luas untuk memperkirakan deformasi permukaan dan memiliki pencapaian yang luar biasa dalam studi geodinamika. Dalam pengolahan data SAR, interferogram dihasilkan dengan menggabungkan dua citra SAR kompleks, pengamatan fase interferometri per sel resolusi disusun oleh sejumlah komponen (Hanssen, 2001).

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{defo}} + \phi_{\text{orb}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{scat}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2.5)$$

di mana ϕ_{int} adalah fase interferometri, ϕ_{topo} adalah fase topografi, ϕ_{defo} adalah fase deformasi karena deformasi pada LOS radar, ϕ_{orb} adalah fase bumi datar deterministik dan sinyal fase sisa karena penentuan orbit, ϕ_{atm} adalah fase atmosfer, ϕ_{scat} adalah fase karena perubahan temporal dan spasial karakteristik sebaran permukaan bumi antara dua waktu pengamatan, dan ϕ_{noise} adalah faktor degradasi fase, yang disebabkan oleh misalnya, *noise* termal, *noise* koregistrasi dan *noise* interpolasi.

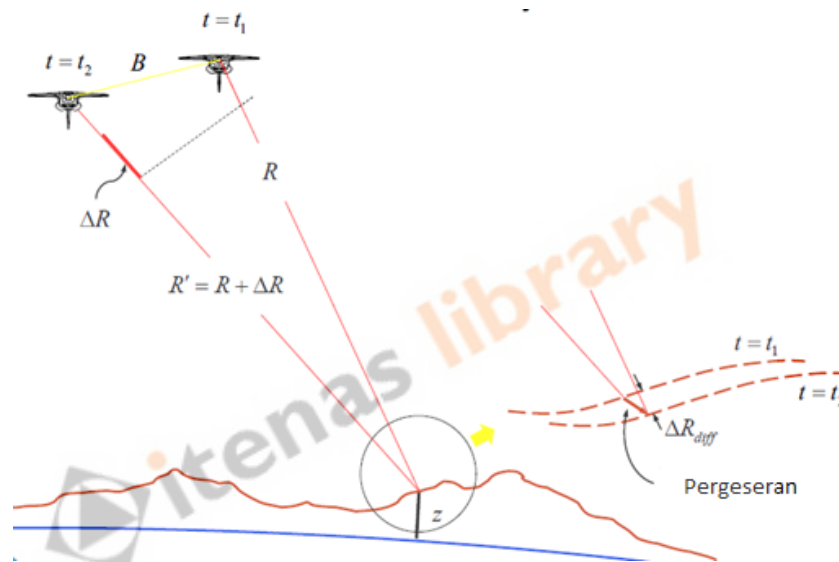
Selanjutnya pendekatan InSAR, dua citra SAR dari konfigurasi orbit yang sedikit berbeda dan pada waktu yang berbeda digabungkan untuk memanfaatkan perbedaan fase dari sinyal LOS (line of sight). InSAR didasarkan pada perbedaan fase yang diperoleh dari dua akuisisi SAR yang berbeda. Dengan asumsi bahwa fasa hamburan sama pada kedua citra, maka fasa interferometri ϕ merupakan ukuran yang sangat sensitif dari perbedaan rentang $R_2 - R_1$ yaitu:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \quad (2.6)$$

dengan ϕ_1 dan ϕ_2 masing-masing adalah fase gambar SAR pertama dan kedua. R_1 adalah jarak dari SAR ke objek dengan akuisisi pertama, R_2 adalah jarak akuisisi kedua, dan λ adalah panjang gelombang.

2.5 Differential interferometry synthetic aperture radar (DInSAR)

Differential interferometry synthetic aperture radar (DInSAR) adalah teknik yang berguna untuk secara akurat mendeteksi perpindahan tanah atau deformasi tanah dalam arah garis pandang (jarak miring) antena menggunakan data SAR yang diambil pada dua waktu perolehan terpisah (Tralli dkk., 2005). Metode DInSAR melengkapi metode berbasis darat seperti pengukuran leveling dan global positioning system (GPS), menghasilkan informasi dalam area cakupan yang luas bahkan ketika area tersebut tidak dapat diakses (Rosen dkk., 2000).



Gambar 2. 8 Ilustrasi DInSAR

Sumber: SAREDU, 2020.

Menurut Hanssen (2001) cara untuk mendapatkan efek penurunan muka tanah yaitu melakukan diferensial pada interferogram dan menghilangkan pengaruh topografi, noise, serta atmosfer. Ilustrasi DInSAR ini dapat dilihat pada Gambar 2.8. Dari gambar 2.8 dapat dihitung nilai pergeseran atau perubahan posisi sebagai berikut:

$$\Delta R_{diff} = \frac{\phi_{diff} \cdot \lambda}{4\pi} \quad (2.7)$$

dengan ΔR_{diff} adalah nilai pergeseran, dan ϕ_{diff} adalah selisih fase saat $t = t_1$ dan $t = t_2$.

Berdasarkan metodenya DInSAR terbagi atas 3 jenis yaitu *Two-Pass DInSAR*, *Three-Pass DInSAR*, dan *Four-Pass DInSAR* (Resmi, 2016).

2.5.1 Two-Pass DInSAR

Menurut Sacristan (2004), metode *two-pass DInSAR* merupakan metode yang menggunakan dua buah citra SAR dan *Digital Elevation Model* (DEM). Citra SAR tersebut akan digunakan untuk mendapatkan interferogram, sedangkan DEM digunakan untuk menghilangkan pengaruh topografi pada fase interferogram. Menurut Massonnet (1998) metode ini menggunakan model elevasi (DEM) eksternal yang dikonversikan kedalam koordinat radar, diskalakan menggunakan baseline. Kesalahan yang terdapat pada data DEM ini pada akhirnya akan merambat pada hasil perhitungan DInSAR. Dengan kata lain, semakin baik kualitas DEM yang digunakan, maka semakin baik pula citra DInSAR yang dihasilkan (Resmi, 2016).

2.5.2 Three-Pass DInSAR

Metode ini membutuhkan pasangan topografi yang diperoleh dari citra SAR 1 dan 2 dimana selisih temporal dari dua pengamatan tersebut saling berdekatan, sehingga tidak ada unsur *land subsidence* didalam model topografi itu atau dianggap tidak memiliki kesalahan *land subsidence*. Kemudian dibutuhkan pasangan topografi yang masih dipengaruhi oleh *land subsidence* yang diperoleh dari citra SAR 1 dan 3 yang memiliki selisih temporal yang cukup berjauhan. Pasangan citra ini selanjutnya diproses untuk menghasilkan data topografi yang diperlukan pada pengolahan DInSAR (Resmi, 2016).

2.5.3 Four-Pass DInSAR

Menurut Sacristan (2004) Secara umum metode ini hampir sama dengan *three-pass Interferometry*, namun pada metode ini digunakan empat buah citra dari empat akuisisi data yang berbeda. Interferogram hasil kombinasi empat buah citra inilah yang akan digunakan pada proses *differencing* (Resmi, 2016).

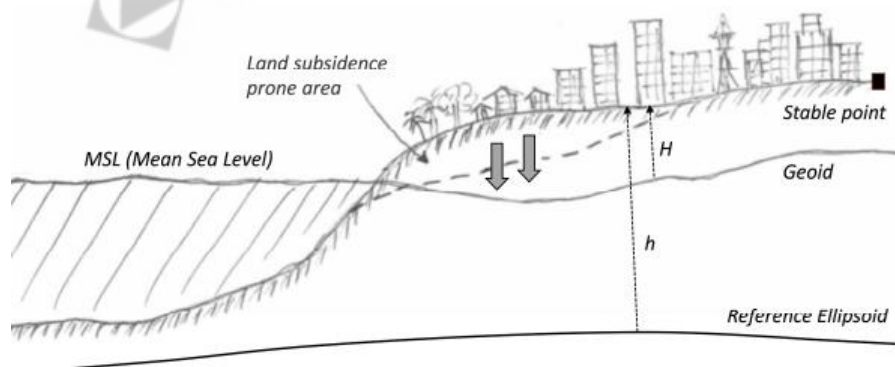
2.6 Penurunan Muka Tanah

Secara geometris, penurunan tanah dapat didefinisikan sebagai perpindahan ke bawah permukaan tanah relatif terhadap permukaan referensi tertentu, seperti permukaan laut rata-rata (MSL), geoid, atau elipsoid referensi, atau relatif terhadap titik stabil yang diasumsikan tertentu di luar daerah rawan penurunan, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.8. Dalam hal ini, jika ketinggian titik tertentu di daerah rawan penurunan tanah sehubungan dengan MSL (geoid) atau ellipsoid referensi pada epok i dan j adalah: $H(i)$ dan $H(j)$, atau $h(i)$ dan $h(j)$, maka penurunan muka tanah antara dua epok i dan j , $LS(i, j)$, dapat diperkirakan dengan menggunakan relasi berikut:

$$LS(i,j) = H(j) - H(i), \text{ atau } LS(i,j) = h(j) - h(i) \quad (2.8)$$

Jika ketinggian titik tersebut diketahui relatif terhadap titik stabil tertentu di luar daerah rawan penurunan muka tanah, yaitu $dH(i)$ dan $dH(j)$, atau $dh(i)$ dan $dh(j)$, maka penurunan tanah antara dua epok i dan j , $LS(i,j)$, dapat diestimasi menggunakan relasi berikut (Abidin dkk., 2015):

$$LS(i,j) = dH(j) - dH(i), \text{ atau } LS(i,j) = dh(j) - dh(i). \quad (2.9)$$



Gambar 2. 9 Ilustrasi Geometri Penurunan Muka Tanah

Sumber: Abidin dkk., 2015.

Fenomena bahaya antropogenik alam ini dapat disebabkan oleh aktivitas alam dan/ atau manusia, seperti aktivitas tektonik (misalnya gempa bumi dan patahan), aktivitas vulkanik, longsor, aktivitas penambangan bawah tanah, ekstraksi air tanah

atau minyak/ gas yang berlebihan, konsolidasi alami tanah alluvium., dan beban konstruksi. Saat ini, cukup banyak daerah perkotaan besar di dunia yang terkena dampak bahaya ini seperti Venice, New Orleans, Houston, Mexico City, Osaka, Tokyo, Shanghai, Tianjin, Taipei, Manila, dan Bangkok. Di perkotaan di Indonesia, penurunan muka tanah telah diamati di Jakarta, Bandung, dan Semarang. Berdasarkan studi terdahulu, penurunan muka tanah juga diperkirakan terjadi di Surabaya dan Medan. Penurunan muka tanah di daerah perkotaan biasanya disebabkan oleh kombinasi pengambilan air tanah yang berlebihan, konsolidasi alami tanah aluvium, beban konstruksi (yaitu perkotaan dengan tingkat kompresibilitas tanah tinggi), dan terkadang aktivitas tektonik (Abidin dkk., 2015).

2.6.1 Dampak Penurunan Muka Tanah

Menurut Abidin (2010a, 2012b) secara umum, dampak penurunan muka tanah di perkotaan dapat dilihat dalam berbagai representasi di lapangan, dan dapat dikategorikan menjadi dampak infrastruktur, lingkungan, ekonomi, dan sosial (Tabel 2.3). Dampak penurunan muka tanah dapat dilihat dalam berbagai bentuk, seperti retaknya konstruksi permanen dan jalan, miringnya rumah dan bangunan, rumah dan bangunan ambles, perubahan saluran sungai dan sistem aliran drainase, perluasan daerah banjir pesisir dan/ atau daratan dalam, dan peningkatan intrusi air laut. Jika daerah pesisir kota memiliki tingkat penurunan muka tanah yang signifikan, maka banjir pesisir dapat terjadi selama air pasang. Di wilayah pesisir Jakarta dan Semarang, banjir pesisir yang sering dan parah tidak hanya memperburuk fungsi bangunan dan prasarana, tetapi juga berpengaruh buruk terhadap kualitas lingkungan hidup dan kehidupan (Abidin dkk., 2015).

Tabel 2. 3
Karakteristik dampak Penurunan Muka Tanah

No.	Kategori	Representasi Dampak	Tingkat Dampak
1	Infrastruktural	Retak pada bangunan dan jalan	Langsung
		Miringnya rumah dan bangunan	Langsung

No.	Kategori	Representasi Dampak	Tingkat Dampak
		Rumah dan bangunan ambles	Langsung
		Hancurnya jaringan pipa bawah tanah dan utilitas	Langsung
		Malfungsi sistem drainase	Tidak langsung
		Memburuknya fungsi bangunan dan prasarana	Tidak langsung
2	Lingkungan	Perubahan sistem aliran sungai dan drainase	Tidak langsung
		Sering terjadi banjir pesisir	Tidak langsung
		Perluasan area banjir	Tidak langsung
		Daerah dan infrastruktur tergenang	Tidak langsung
		Peningkatan intrusi air laut pedalaman	Tidak langsung
		Memburukny kondisi lingkungan	Tidak langsung
3	Ekonomi	Peningkatan biaya perawatan infrastruktur	Tidak langsung
		Berkurangnya nilai tanah dan properti	Tidak langsung
		Bangunan dan fasilitas yang ditinggalkan	Tidak langsung
		Disrupsi terhadap aktivitas ekonomi	Tidak langsung
4	Sosial	Memburuknya kualitas lingkungan hidup (seperti kesehatan dan kondisi sanitasi)	Tidak langsung

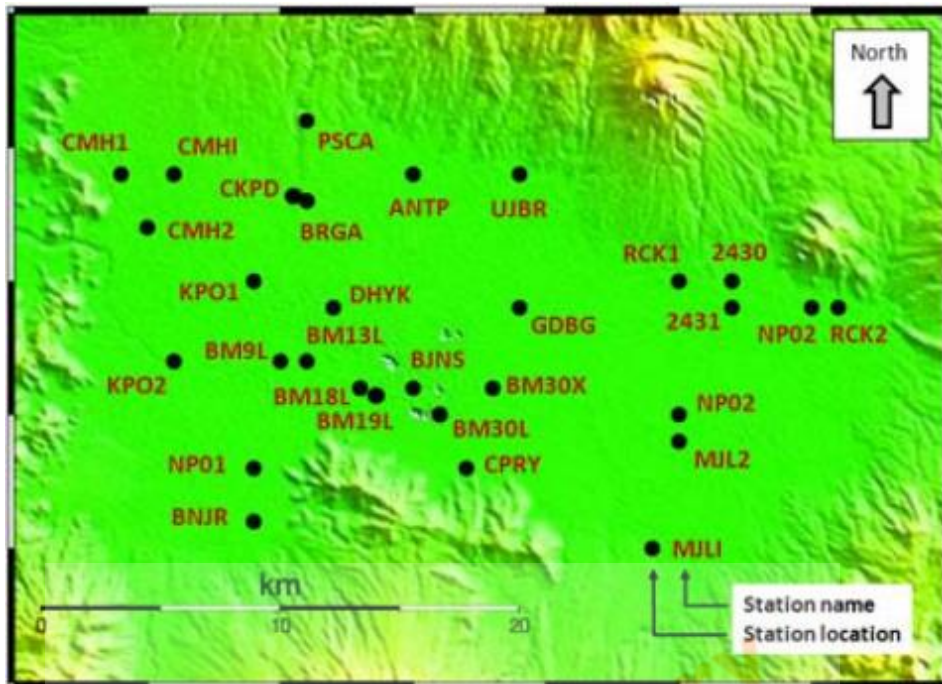
No.	Kategori	Representasi Dampak	Tingkat Dampak
		Disrupsi terhadap aktivitas harian masyarakat	Tidak langsung

Sumber: Abidin dkk., 2015.

2.6.2 Penurunan Muka Tanah di Cekungan Bandung

Menurut Abidin dkk. (2006a, 2008b) fenomena penurunan muka tanah di Cekungan Bandung telah dipelajari sejak tahun 2000 menggunakan metode survey GPS dan juga menggunakan InSAR sejak tahun 2006. Dalam memperkirakan penurunan muka tanah dengan menggunakan survei GPS berulang, beberapa monumen, yang ditempatkan di atas tanah yang meliputi cekungan Bandung dan sekitarnya, secara akurat diposisikan relatif terhadap titik referensi (stabil) tertentu, dengan menggunakan teknik survei GPS. Koordinat tepat monumen ditentukan secara berkala dengan menggunakan survei GPS berulang pada interval waktu tertentu. Dengan mempelajari karakteristik dan laju perubahan komponen ketinggian pada koordinat dari survei ke survei, karakteristik penurunan tanah dapat diturunkan (Abidin dkk., 2011).

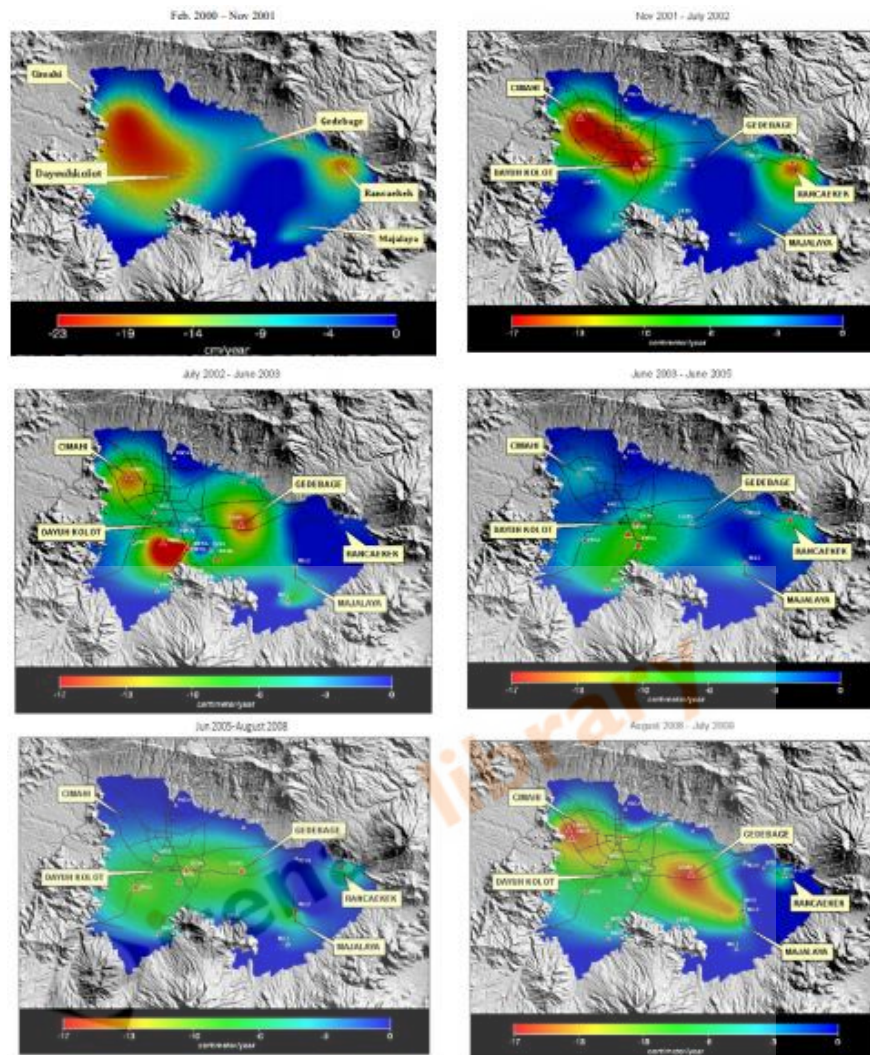
Untuk mempelajari fenomena penurunan tanah di Cekungan Bandung, delapan survei GPS telah dilakukan pada bulan Februari 2000, November 2001, Juli 2002, Juni 2003, Juni 2005, Agustus 2008, Juli 2009 dan Juli 2010. Survei di semua stasiun dilakukan dengan menggunakan *receiver* GPS tipe geodetik dual-frekuensi. Dalam hal ini stasiun PSCA yang berada di dalam kampus Institut Teknologi Bandung (ITB) digunakan sebagai titik acuan dengan koordinat yang diketahui. Lokasi stasiun GPS yang digunakan untuk mempelajari penurunan muka tanah di Cekungan Bandung ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Abidin dkk., 2011).



Gambar 2. 10 Distribusi Stasiun GPS untuk Studi PMT di Cekungan Bandung

Sumber: Abidin dkk., 2011.

Hasil dari pengamatan GPS menunjukkan bahwa penurunan muka tanah di Cekungan Bandung memiliki variasi temporal dan spasial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Secara umum, laju penurunan muka tanah memiliki rata-rata sekitar -8 cm/ tahun, yang dapat mencapai sekitar -23 cm/ tahun pada lokasi dan periode waktu tertentu. Beberapa stasiun, mis. CMHI, DYHK, RCK2, GDBG, BM9L dan BM18L (Gambar 2.9), memiliki tingkat penurunan muka tanah yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain, yaitu lebih dari -12 cm/ tahun. Stasiun CMHI, DYHK, RCK2 dan GDBG berlokasi di kawasan industri tekstil, di mana ekstraksi air tanah yang berlebihan diperkirakan akan terjadi. Sedangkan stasiun BM9L dan BM18L terletak di tepian Sungai Citarum. Hasil pada Gambar 2.10 juga menunjukkan bahwa laju penurunan muka tanah tidak selalu linier. Beberapa stasiun menunjukkan penurunan muka tanah, sementara yang lain tidak (Abidin dkk., 2011).



Gambar 2. 11 Variasi temporal dan spasial PMT hasil GPS (cm/th) Cekungan Bandung periode Februari 2000 sampai Juli 2009

Sumber: Abidin dkk., 2011.

2.7 Banjir di Cekungan Bandung

Bentang alam gunung-gunung yang mengelilingi Cekungan Bandung umumnya berupa kerucut gunung api yang menampilkan bentukan fasies sentral (puncak gunung), fasies proksimal (lereng atas), fasies medial (lereng bawah), dan fasies distal (kaki gunung dan dataran). Pada gunung api muda dicirikan oleh bentuk kerucut yang keempat fasiesnya masih utuh dengan pola aliran sungainya menyebar dari puncak gunung (*radial pattern*). Pada gunung api yang semakin tua bentuk kerucutnya semakin kasar/ bergelombang akibat erosi yang semakin lanjut,

dengan pola aliran sungainya berbentuk mendaun (*dendritic pattern*). Sungai-sungai yang mengalir di Cekungan Bandung ini dapat di kelompokkan ke dalam beberapa Sub Daerah Aliran Sungai (Sub DAS), yaitu: Sub DAS Cihaur, Sub DAS Cikapundung, Sub DAS Citarik, Sub DAS Cirasea, Sub DAS Cisangkuy, Sub DAS Ciwidey, dan Sub DAS Ciminyak (Kementrian ATR/ BPN, 2019).

Berdasarkan geometri Sungai Citarum berikut anak-anak sungainya, bila musim hujan tiba terjadi akumulasi air sungai di muara-muara anak-anak sungai, meluap menjadi genangan banjir di dataran Cekungan Bandung. Berdasar sebaran litologi sedimen aluvial, daerah yang berpotensi rawan banjir terhampar seluas kurang lebih 20 Km x 10 Km (Kementrian ATR/ BPN, 2019).

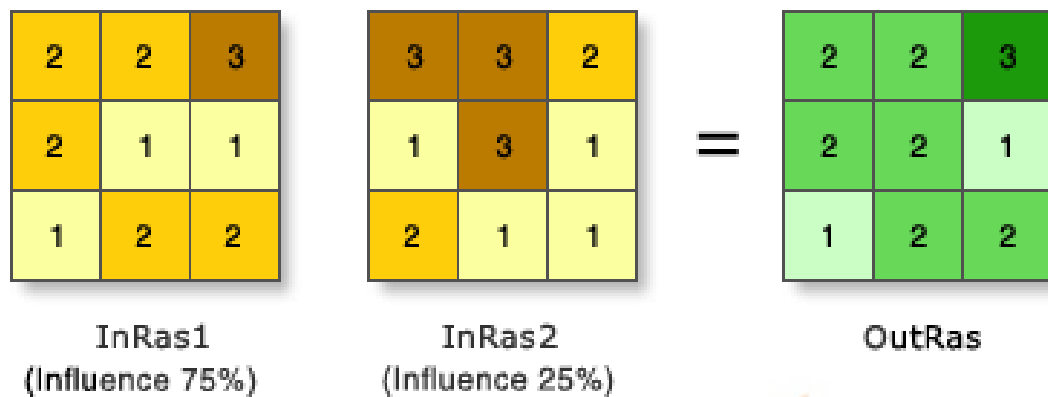
Dalam kasus Cekungan Bandung, peningkatan cakupan banjir yang disebabkan oleh penurunan muka tanah yang terus menerus menimbulkan lebih banyak masalah dibandingkan dengan efek tidak langsung lain dari penurunan tanah. Banjir biasanya terjadi di daerah sepanjang Sungai Citarum dan anak-anak sungainya, dan penurunan muka tanah di daerah ini akan memperburuknya. Banjir juga dapat terjadi di daerah lain pada musim hujan karena sistem drainase yang buruk. Penurunan muka tanah di kawasan tersebut selain menurunkan elevasi tanah juga dapat mengubah arah aliran air pada sistem drainase, dan dapat juga memperburuk fenomena banjir (Abidin dkk., 2011).

2.8 Analisis Korelasi

Analisis korelasi adalah metode statistika yang digunakan untuk menentukan suatu besaran yang menyatakan bagaimana kuat hubungan suatu variabel dengan variabel lain dengan tidak mempersoalkan apakah suatu variabel tertentu tergantung kepada variabel lain (Sekaran & Bougie, 2010).

Pada penelitian ini, analisis korelasi spasial menggunakan metode *weighted overlay*. *Weighted overlay* adalah teknik analisis GIS standar yang sering digunakan untuk memecahkan masalah multikriteria seperti menghasilkan permukaan yang mewakili kesesuaian lokasi dan biaya perjalanan. *Weighted overlay* digunakan ketika sejumlah faktor yang sangat penting harus dipertimbangkan untuk sampai

pada keputusan akhir. Contoh ini menunjukkan bagaimana analisis raster dan aritmatika raster dapat digunakan untuk melakukan analisis tersebut dalam memecahkan masalah spasial. Gambar 2.11 menjelaskan logika tentang *weighted overlay*.



Gambar 2. 12 Ilustrasi Weighted Overlay

Sumber: ESRI, 2020.

Dalam ilustrasi di atas, dua data raster telah diklasifikasikan ke skala pengukuran umum 1 sampai 3. Setiap raster diberi pengaruh persentase. Nilai sel dikalikan dengan pengaruh persentase mereka, dan hasilnya ditambahkan bersama untuk membuat *output* raster. Misalnya, perhatikan sel kiri atas. Nilai untuk kedua masukan menjadi $(2 * 0,75) = 1,5$ dan $(3 * 0,25) = 0,75$. Jumlah dari 1,5 dan 0,75 adalah 2,25. Karena raster keluaran dari *weighted overlay* adalah bilangan bulat, nilai akhirnya dibulatkan menjadi 2 (ESRI, 2020).

2.9 Uji Statistik

Uji statistik pada penelitian ini bertujuan untuk pengambilan keputusan terhadap hipotesis yang terdapat pada sub bab 1.6. Uji statistik dilakukan dengan menghitung koefisien korelasi, selanjutnya dihitung nilai distribusi t karena sampel yang digunakan kurang dari 30, dan selanjutnya dibandingkan dengan nilai kritis distribusi t untuk penentuan menerima atau menolak H_0 .

2.9.1 Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi terletak antara -1 dan 1, yaitu $-1 \leq r \leq 1$. Nilai $r = -1$, disebut korelasi linear negatif, artinya terdapat hubungan negatif yang sempurna antara variabel X dan Y. Nilai $r = 1$, disebut korelasi linear positif, artinya terdapat hubungan positif yang sempurna antara variabel X dan Y. Nilai $r = 0$ disebut tidak berkorelasi secara linear, artinya tidak ada hubungan antara variabel X dan Y (Boediono & Koster, 2014).

Secara sederhana, rumus koefisien korelasi dapat dinyatakan sebagai berikut (Supranto, 2019):

$$r = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.10)$$

Arti dari koefisien korelasi r adalah sebagai berikut (Boediono & Koster, 2014):

- 1) Bila $0,90 < r < 1,00$ atau $-1,00 < r < -0,90$ artinya hubungan sangat kuat.
- 2) Bila $0,70 < r < 0,90$ atau $-0,90 < r < -0,70$ artinya hubungan kuat.
- 3) Bila $0,50 < r < 0,70$ atau $-0,70 < r < -0,50$ artinya hubungan moderat.
- 4) Bila $0,30 < r < 0,50$ atau $-0,50 < r < -0,30$ artinya hubungan lemah.
- 5) Bila $0,00 < r < 0,30$ atau $-0,30 < r < 0,00$ artinya hubungan sangat lemah.

2.9.2 Distribusi t

Distribusi t biasanya digunakan untuk menguji hipotesis mengenai nilai parameter, maksimal dua populasi dan dari sampel yang kecil misalnya $n < 100$, bahkan sering kali $n \leq 30$. Untuk pengujian hipotesis tentang korelasi, dapat dihitung nilai t_0 (Supranto, 2019):

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2.11)$$

Nilai t_0 ini dibandingkan dengan $t_{\alpha(n-2)}$, $-t_{\alpha(n-2)}$, $t_{\alpha/2(n-2)}$ atau $-t_{\alpha/2(n-2)}$ sesuai dengan pemilihan uji satu arah atau dua arah. Hasil perbandingan ini dipergunakan untuk memutuskan apakah kita menolak atau menerima hipotesis (Supranto, 2019).

2.9.3 Pengujian Hipotesis Korelasi

Pengujian hipotesis tentang korelasi dapat dibagi menjadi dua, yaitu uji satu arah dan uji dua arah. Pengujian hipotesis ini dapat dituliskan seperti di bawah ini (Supranto, 2019):

1) Uji satu arah.

$$H_0 : \rho \leq 0$$

$H_a : \rho > 0$ (ada hubungan positif), atau

$$H_0 : \rho \geq 0$$

$H_a : \rho < 0$ (ada hubungan negatif)

2) Uji dua arah.

$$H_0 : \rho = 0$$

$H_a : \rho \neq 0$ (ada hubungan)

Seperti terdapat pada sub bab 2.9.2, pengambilan keputusan untuk menerima atau menolak hipotesis bergantung pada perbandingan nilai t_0 dengan $t_{\alpha(n-2)}$, $-t_{\alpha(n-2)}$, $t_{\alpha/2(n-2)}$ atau $-t_{\alpha/2(n-2)}$.