

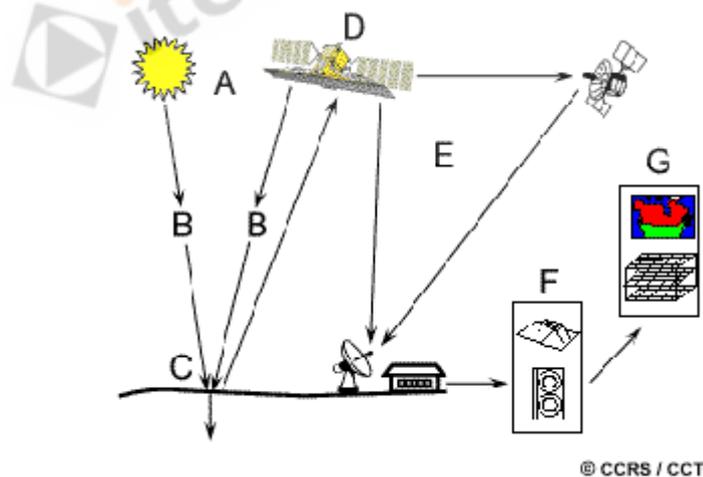
BAB II

DASAR TEORI

2.1. Pengindraan Jauh RADAR

Pengindraan jauh atau indraja (*remote sensing*) adalah seni dan ilmu untuk mendapatkan informasi tentang obyek, area atau fenomena melalui analisa terhadap data yang diperoleh dengan menggunakan alat tanpa kontak langsung dengan obyek, daerah ataupun fenomena yang dikaji (Lillesand & Kiefer, 1990). Sugandi (1999) mengatakan bahwa perekaman inderaja dilakukan di udara atau di angkasa dengan menggunakan alat (sensor) dan wahana yang biasa digunakan untuk melakukan perekaman yaitu satelit, pesawat udara, balon udara, dan sebagainya.

Pengindraan Jauh memiliki tujuh elemen yang digunakan saat melakukan perekaman yaitu sumber tenaga, atmosfer, interaksi antara tenaga dengan objek di permukaan bumi, sensor, sistem pengolahan data, dan berbagai penggunaan data (Natural Resources Canada, 2015). Gambar di bawah ini menunjukkan interaksi ke-tujuh elemen tersebut.

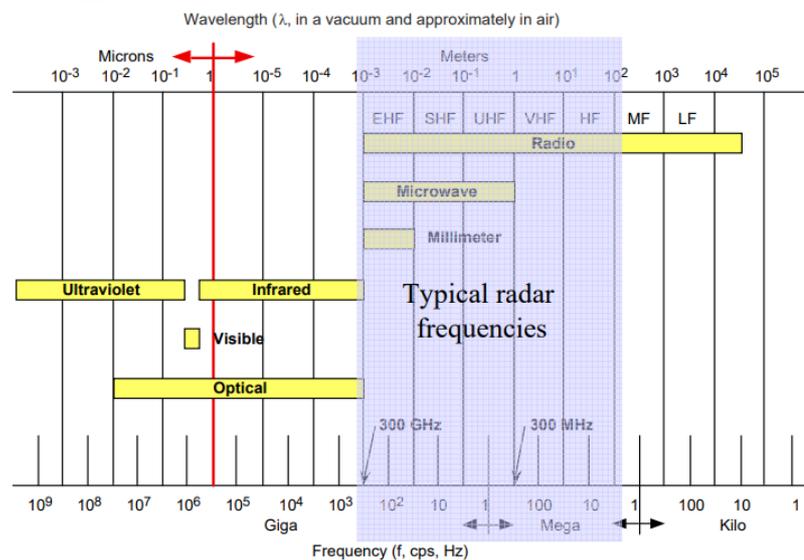


Gambar 2.1. tujuh elemen penginderaan jauh
Sumber: Natural Resource Canada, 2015

Sumber tenaga dalam penginderaan jauh tersebut secara umum terbagi menjadi dua ialah yang bersifat alamiah dan bersifat nonalamiah. Selanjutnya penginderaan jauh yang menggunakan sumber tenaga alamiah disebut sistem penginderaan jauh pasif, sedangkan yang menggunakan sumber tenaga nonalamiah disebut sistem

pengindraan jauh aktif. Sumber tenaga alamiah yang membantu perekaman sensor indera adalah cahaya matahari, sedangkan sumber tenaga nonalamiah merupakan sebuah sumber tenaga yang dibawa oleh wahana itu sendiri dan tidak bergantung pada cahaya matahari. Oleh karena itu, kita dapat membedakan bahwa indraja sistem pasif hanya dapat digunakan pada siang hari, sedangkan indraja sistem aktif dapat digunakan pada siang maupun malam hari. Sumber tenaga pada pengindraan sistem aktif sengaja dibuat dan dipancarkan dari sensor yang kemudian dipantulkan kembali ke sensor tersebut untuk direkam, pantulan kembali dari objek ini dikenal dengan istilah *backscatter* (hamburan balik) (Syamani, 2019). Contoh pengindraan jauh yang menggunakan sistem aktif adalah *Radio Detection and Ranging* (Radar), *synthetic aperture radar* (SAR), Lidar, dll.

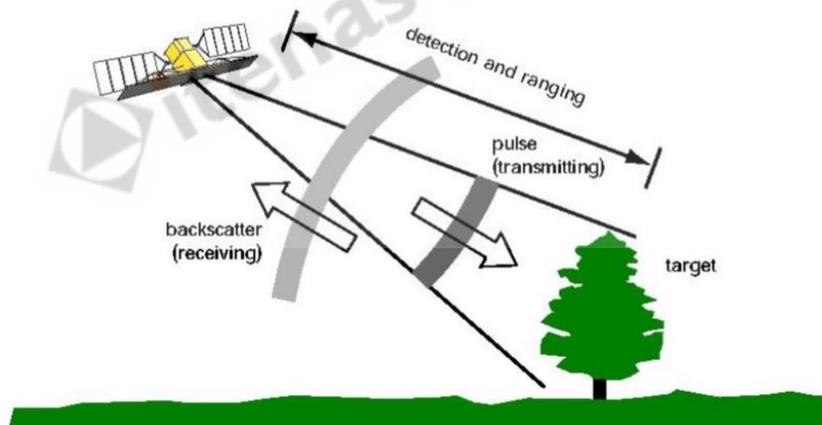
Radar atau *Radio Detection and Ranging* adalah suatu alat yang sistemnya memancarkan gelombang elektromagnetik berupa gelombang radio dan gelombang mikro. Pantulan dari gelombang yang dipancarkan tadi digunakan untuk mendeteksi obyek (Geodesi ITB, 2007). Radar menggunakan spektrum gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi 300 MHz hingga 30 GHz atau panjang gelombang 1 cm hingga 1meter. Gambar di bawah ini menunjukkan spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang radar ditandai oleh kotak biru.



Gambar 2.2. Gelombang Elektromagnetik
Sumber: Jenn, 2017.

Gelombang mikro bisa menembus awan dan vegetasi (tergantung pada frekuensi), dan dapat beroperasi dalam kondisi siang atau malam hari sehingga tidak tergantung pada cahaya matahari. Gelombang mikro dapat menembus lebih dalam ke dalam vegetasi daripada panjang gelombang optik, dengan kedalaman penetrasi tergantung pada panjang gelombang gelombang mikro dan kadar air vegetasi. Hamburan pada gelombang mikro akan bergantung pada kekasaran permukaan skala besar (biasanya kekasaran sentimeter) dan hamburan volume (hamburan dalam kanopi hutan misalnya) (Nurtyawan R. , 2019).

Radar bekerja dengan memancarkan energi elektromagnetik ke bumi, dan merekam kembali jumlah energi yang dikembalikan. Saat gelombang elektromagnetik mengenai suatu objek, maka akan menginduksi arus dalam material yang memancarkan kembali elektromagnetik ke segala arah (hamburan) (Nurtyawan R. , 2019). Dengan demikian, radar hanya mengukur energi hamburan yang dipantulkan kembali. Gambar di bawah ini menunjukkan cara kerja sederhana radar.



Gambar 2.3. Cara Kerja Radar
Sumber: Nurtyawan, 2019

Setiap gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh radar memiliki fenomena yang berbeda-beda sesuai dengan karakteristiknya masing-masing. Karakteristik gelombang ini berhubungan dengan frekuensi (Geodesi ITB, 2007). Citra radar yang diperoleh merepresentasikan jumlah energi pantul yang diterima oleh sensor. Besar kecilnya panjang gelombang yang digunakan berpengaruh pada citra yang diperoleh. Semakin besar panjang gelombangnya maka semakin kuat daya tembus gelombangnya. Oleh karena itu, radar mengelompokkan setiap

panjang gelombang dengan masing-masing kegunaannya yang disebut dengan saluran *band*. Tabel di bawah ini merupakan pembagian kelompok band dengan panjang gelombang dan kegunaannya masing-masing.

Tabel 2.1. Saluran band radar

| Band | Frekuensi | Panjang Gelombang | Kegunaan |
|------|-------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ka | 27 – 40 GHz | 1.1 – 0.8 cm | Pemetaan dengan resolusi yang sangat tinggi (Pengawasan bandara) |
| K | 18 – 27 GHz | 1.7 – 1.1 cm | Jarang digunakan (Uap air) |
| Ku | 12 – 18 GHz | 2.4 – 1.7 cm | Pemetaan resolusi tinggi (satelit altimetri) |
| X | 8 – 12 GHz | 3.8 – 2.4 cm | Pemetaan resolusi tinggi (pemantauan perkotaan, es dan salju, penetrasi kecil ke tutupan vegetasi; pembusukan koherensi cepat di daerah yang bervegetasi) |
| C | 4 – 8 GHz | 7.5 – 3.8 cm | Pemetaan global; deteksi perubahan; pemantauan area dengan penetrasi rendah ke sedang; koherensi lebih tinggi); es, navigasi lautan |
| S | 2 – 4 GHz | 15 – 7.5 cm | Penggunaan yang sedikit tetapi semakin meningkat untuk observasi Bumi berbasis SAR; pemantauan pertanian (NISAR akan membawa saluran S-band; mengeluarkan aplikasi C-band untuk kepadatan vegetasi yang lebih tinggi) |
| L | 1 – 2 GHz | 30 – 15 cm | Resolusi menengah (pemantauan geofisika; pemetaan biomassa dan vegetasi; penetrasi tinggi, InSAR) |
| P | 0.3 – 1 GHz | 100 – 30 cm | Biomasa, pemetaan dan penilaian vegetasi |

Sumber: NASA, 2020.

Gelombang radar yang dipancarkan dan diterima sensor radar sifatnya terpolarisasi (*polarized*), sehingga arah getarannya satu arah. Ada 2 jenis polarisasi, yaitu polarisasi horizontal (H), dan polarisasi vertikal (V). Pada sensor radar, polarisasi gelombang elektromagnetik ini diatur pada saat gelombang *microwave* dipancarkan sensor, dan pada saat gelombang *microwave* diterima kembali oleh sensor dari *backscatter* objek di permukaan bumi. Jadi pancaran dari sensor bisa polarisasi V, bisa polarisasi H. Demikian juga *backscatter* dari objek yang diterima sensor, bisa V bisa H. Sehingga akan ada 4 kemungkinan polarisasi citra radar, yaitu VV, VH, HH, HV (Syamani, 2019). Polarisasi yang dimaksud adalah:

1. VV: pancaran dari sensor vertikal, *backscatter* dari objek vertikal
2. VH: pancaran dari sensor vertikal, *backscatter* dari objek horizontal
3. HH: pancaran dari sensor horizontal, *backscatter* dari objek horizontal
4. HV: pancaran dari sensor horizontal, *backscatter* dari objek vertikal

2.2. Synthetic Aperture Radar (SAR)

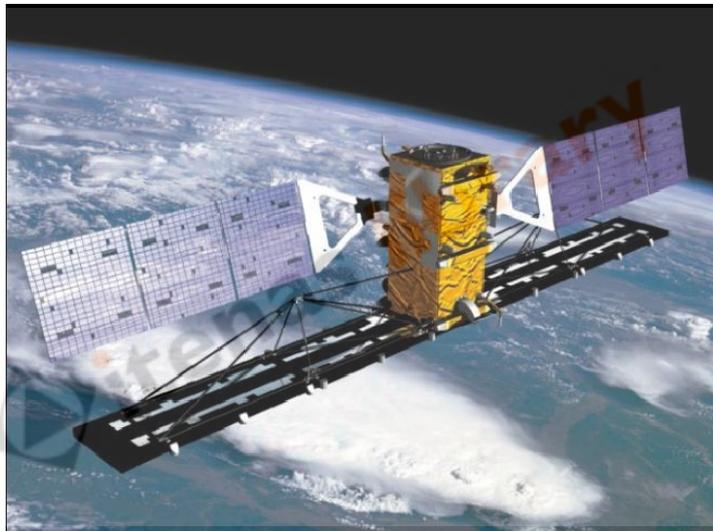
Synthetic Aperture Radar (SAR) adalah salah satu kelas spesifik dari radar. Dinamakan sintetik karena tidak menggunakan antena panjang secara spesifik seperti pada *Real Aperture Radar (RAR)* (Geodesi ITB, 2007). RAR merupakan sensor radar tipe lama, yang sangat tidak efisien, terutama ketika ingin menghasilkan citra resolusi spasial tinggi (Syamani, 2019). Resolusi spasial data radar terkait langsung dengan rasio panjang gelombang sensor dengan panjang antena sensor. Untuk panjang gelombang tertentu, semakin panjang antena, semakin tinggi resolusi spasial. SAR bekerja dengan cara merekayasa antena pendek menjadi seolah-olah antena (*aperture*) yang sangat panjang. Oleh karena itu, teknologi SAR menyajikan konsep urutan akuisisi dari antena yang lebih pendek digabungkan untuk mensimulasikan antena yang jauh lebih besar, sehingga memberikan data resolusi yang lebih tinggi (NASA, 2020). Secara sederhana, Cara kerja SAR adalah dengan menembak objek yang sama beberapa kali sepanjang jalur terbang satelit. Sehingga seolah-olah satu objek dipotret dari sebuah antena yang panjangnya berkilo-kilometer (Syamani, 2019), Sehingga SAR merupakan sensor radar tercanggih dan paling efisien.

Sudah banyak sekali satelit radar dengan teknologi SAR yang diluncurkan oleh berbagai negara mulai dengan satelit yang menghasilkan citra resolusi rendah hingga tinggi dengan berbagai kegunaan spesifik pada setiap satelit. Contoh beberapa satelit SAR yaitu TerraSAR-X, RADARSAT-2, ALOS/PALSAR, dll. Dalam penelitian ini digunakan citra dari satelit RADARSAT-2 karena memiliki resolusi yang cukup tinggi yang dapat digunakan untuk pemantauan fase pertumbuhan padi.

2.3. RADARSAT-2

RADARSAT-2 (RSAT-2) merupakan sebuah satelit yang diluncurkan pada 14 Desember 2007 oleh CSA (Canadian Space Agency) bersama dengan MDA (MacDonald Dettwiler Associates Ltd.) (ESA, 2020). RADARSAT-2 merupakan sebuah misi atau pengembangan lebih lanjut dari satelit RADARSAT-1 dengan tujuan untuk:

- 1) Melanjutkan program RADARSAT Kanada dan mengembangkan bisnis satelit Pengamatan Bumi melalui pengaturan yang dipimpin sektor swasta dengan pemerintah federal
- 2) Memberikan kesinambungan data kepada pengguna RADARSAT-1 dan menawarkan data untuk aplikasi baru yang disesuaikan dengan kebutuhan pasar.
- 3) Prioritas utama misi menanggapi tantangan dari:
 - a. Pemantauan lingkungan
 - b. Mengelola sumber daya alam
 - c. Melakukan pengawasan pantai.



Gambar 2.4. Satelit RADARSAT-2
Sumber: ESA, 2020

RADARSAT-2 menawarkan akses cepat ke informasi pencitraan cuaca dan surveilans untuk berbagai aplikasi sipil, komersial, dan pertahanan. MDA memiliki pengalaman yang luas dalam memberikan solusi informasi real-time yang tepat untuk mendapatkan dukungan operasional yang kompleks dan menuntut. Ini telah menjadikan RADARSAT-2 sebagai sumber utama data SAR untuk pertahanan dan keamanan, minyak dan gas, pertambangan, manajemen bencana, sumber daya alam, penerbangan, dan pasar pertanian (MDA, 2020).

RADARSAT-2 menawarkan akses cepat ke pencitraan semua cuaca dan informasi pengawasan untuk berbagai aplikasi sipil, komersial, dan pertahanan. MDA memiliki pengalaman luas dalam berhasil memberikan solusi informasi yang

hampir real-time untuk dukungan operasional yang kompleks dan menuntut. Hal ini menjadikan RADARSAT-2 sumber utama data SAR untuk pertahanan dan keamanan, minyak dan gas, pertambangan, manajemen bencana, sumber daya alam, penerbangan, dan pasar pertanian.

Dirancang sejak awal agar responsif terhadap kebutuhan pengguna akhir, RADARSAT-2 memberikan aplikasi operasional yang membutuhkan akses cepat ke data yang baru diperoleh. Garis waktu pemrosesan dan pengiriman data terus dikurangi untuk dapat memberikan data kepada pengguna secepat mungkin kurang dari satu jam. RADARSAT-2 memiliki kapasitas pencitraan yang sangat besar yang memungkinkan pengguna mengakses data dengan berkurangnya kemungkinan kesalahan.

RADARSAT-2 menyediakan citra SAR resolusi tinggi terlepas dari kondisi cahaya dan cuaca. Gambar RADARSAT-2 Bumi pada resolusi spasial berkisar antara 1 sampai 100 meter, memberikan cakupan 144-250.000 km² dalam satu adegan. Pencitraan mendukung opsi polarisasi tunggal, ganda dan quad. Dengan 20 mode pencitraan, RADARSAT-2 memberikan fleksibilitas dan kapasitas komersial terbesar dari setiap misi SAR, yang memungkinkan pelanggan memilih kombinasi resolusi, polarisasi dan lebar cakram yang tepat untuk memenuhi persyaratan pencitraan mereka. Kemampuan maju RADARSAT-2 memungkinkan pengguna memiliki akses ke misi SAR yang paling operasional. Pelanggan layanan ini akan menerima dukungan dari jaringan global terbesar stasiun penerima tanah dari setiap misi SAR (MDA, 2020). Tabel di bawah ini menjelaskan karakteristik satelit RADARSAT-2.

Tabel 2.2. Karakteristik Satelit RADARSAT-2

| Satellite Characteristic | |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <i>Satellite Description</i> | <i>High resolution, operationally-focused SAR satellite</i> |
| <i>Primary Mission</i> | <i>All-weather maritime and land observation.</i> |
| <i>Instrument Type</i> | <i>Synthetic Aperture Radar (C-band)</i> |
| <i>Repeat Cycle</i> | <i>24 days</i> |
| <i>Resolution Class</i> | <i>1 m – 100 m, depending on operation mode</i> |
| <i>Swath Width</i> | <i>18 km – 500 km, depending on operation mode</i> |
| <i>Polarization</i> | <i>Single, Dual or Quad</i> |

Tabel 2.2. Karakteristik Satelit RADARSAT-2 (Lanjutan)

| Satellite Characteristic | |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| <i>Launch Date</i> | <i>2007-12-14</i> |
| <i>Altitude</i> | <i>798 km</i> |
| <i>Look Direction</i> | <i>Routine Right and Left looking</i> |
| <i>Sensor Specification</i> | <i>C-band wavelength 56 mm, frequency 5.4 GHz</i> |

Sumber: MDA, 2020.

Radarsat-2 juga dilengkapi dengan sensor SAR, tapi yang satu ini menghadirkan serangkaian inovasi teknis. Ia dapat mentransmisikan polarisasi horisontal (H) dan vertikal (V) dan, tergantung pada mode yang dipilih, sensor menerima sinyal H atau V atau kedua sinyal secara bersamaan. Oleh karena itu, selain menyediakan kontinuitas RADARSAT-1 yang lengkap, RADARSAT-2 menghasilkan produk dengan polarisasi VV, polarisasi silang (HV atau VH), polarisasi ganda (HH + HV atau VV + VH) atau kuadran-polarisasi (HH + VV + HV + VH) (Dewi, 2017).

2.4. Fase Pertumbuhan Padi

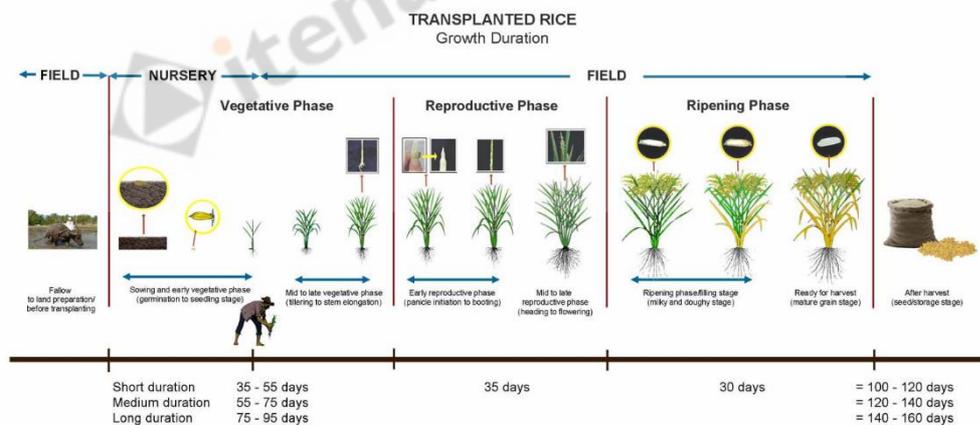
Padi merupakan komoditas tanaman pangan penghasil beras yang memegang peranan penting dalam kehidupan ekonomi Indonesia (Danggulo, Lapanjang, & Made, 2017). Beras adalah salah satu produk makanan pokok paling penting di dunia. Pernyataan ini terutama berlaku di Benua Asia, tempat beras menjadi makanan pokok untuk mayoritas penduduk (terutama di kalangan menengah ke bawah masyarakat). Benua Asia juga merupakan tempat tinggal dari para petani yang memproduksi sekitar 90% dari total produksi beras dunia (Indonesia Investments, 2017). Indonesia menduduki posisi ke-tiga dalam penghasil beras terbesar dunia Tahun 2014. Produksi beras di Indonesia didominasi oleh para petani kecil, bukan oleh perusahaan besar yang dimiliki swasta atau negara. Para petani kecil berkontribusi sekitar 90% dari produksi total beras di Indonesia. Setiap petani itu memiliki lahan rata-rata kurang dari 0,8 hektar. Jawa Barat merupakan salah satu pulau dengan produktivitas dan penghasil beras terbesar di Indonesia.

Menurut International Rice Research Institute (IRRI) (2007) masa pertumbuhan padi terjadi bermacam-macam mulai dari 120 hari hingga 140 hari. Hal tersebut didasarkan pada kondisi wilayah tanam padi, umumnya di Indonesia umur tanam padi terjadi 110-120 hari (BBPADI, 2019). Dalam skala IRRI terdapat tiga tahap pertumbuhan utama tanaman padi: vegetatif, reproduktif, dan *ripening* (pematangan). Dari ke-tiga fase tersebut terdapat sembilan tahap pertumbuhan padi yang berbeda, seperti yang ditunjukkan oleh tabel di bawah ini.

Tabel 2.3. Skala IRRI Dalam Fenologi Padi

| Fase | Tahap | Keterangan |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Vegetatif | <i>Seedling</i> | Pembenihan |
| | <i>Tillering</i> | Penanaman benih padi |
| | <i>Stem Elongation</i> | Padi mulai tumbuh tinggi |
| Reproduktif | <i>Penicle Initiation to booting</i> | Padi bunting |
| | <i>Heading</i> | Keluar malai |
| | <i>Flowering</i> | Malai menjadi bunga |
| <i>Ripening</i> (Pematangan) | <i>Milk grain</i> | Pengisian butiran padi |
| | <i>Dough grain</i> | Pemasakan, daun hijau |
| | <i>Mature grain</i> | Pemasakan, daun kuning |

Sumber: IRRI dalam Syafriyyin (2013)



Gambar 2.5. Fase Pertumbuhan Padi

Sumber: International Rice Research Institute, 2020

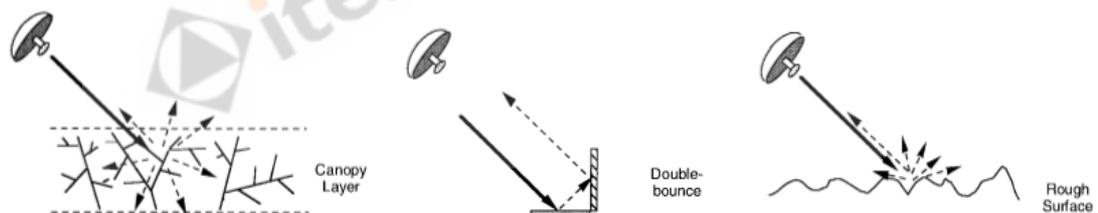
Gambar di atas merupakan sembilan fase pertumbuhan padi. Tahapan pertumbuhan padi ini bertepatan dengan perubahan fase tumbuh tanaman padi yang dipengaruhi oleh interaksi antara permukaan dan gelombang mikro sehingga dapat diamati dengan data penginderaan jauh (Nurtyawan, Wikantika, Saepuloh, Harto, & Kondoh, 2018). Teknik penginderaan jauh multi temporal memberikan informasi berharga untuk pemetaan tanaman padi dan membedakan tanaman padi dari jenis

tutupan lahan lainnya dengan memantau perubahan morfologi tanaman (Nguyen dkk., 2015). Pemantauan pada setiap pertumbuhan tanaman padi adalah informasi penting untuk menentukan estimasi produksi gabah. Namun, pemantauan tepat waktu dan akurasi informasi yang tinggi merupakan tantangan dalam penginderaan jarak jauh berdasarkan pemantauan dan pengamatan pertanian padi.

2.5. Dekomposisi Freeman-Durden

Dekomposisi Freeman-Durden adalah dekomposisi berbasis model hamburan fisik, menggambarkan hamburan balik polarimetrik dari hamburan yang terjadi secara alami (Freeman & Durden, 1998). Dekomposisi Freeman memodelkan matriks kovarians sebagai kontribusi dari tiga mekanisme hamburan.

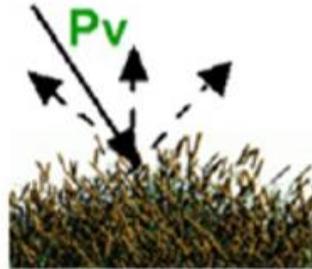
- 1) Hamburan volume di mana kanopi hamburan dimodelkan sebagai satu set dipol berorientasi acak.
- 2) Hamburan pantulan ganda dimodelkan oleh reflektor sudut dihedral.
- 3) Hamburan permukaan atau pantulan tunggal dimodelkan oleh sebaran permukaan Bragg orde pertama.



Gambar 2.6. Mekanisme Hamburan Dekomposisi Freeman-Durden
Sumber: Freeman dan Durden, 1998

Model hamburan komposit ini digunakan untuk menggambarkan hamburan balik polarimetrik dari hamburan yang terjadi secara alami. Model ini menghasilkan estimasi kontribusi terhadap total hamburan balik dari masing-masing tiga komponen. Kontribusi *backscatter* juga dapat dibandingkan untuk memberikan bobot persentase relatif dari masing-masing, atau digunakan untuk memperkirakan kontribusi masing-masing mekanisme terhadap persyaratan *backscatter* HH, HV, dan VV (Srikanth dkk., 2016). Mekanisme hamburan dalam dekomposisi Freeman-Durden dijelaskan dalam rumus di bawah ini.

- 1) Mekanisme hamburan volume (hamburan kanopi yang diorientasikan secara acak)



Gambar 2.7. Hamburan Volume

Model hamburan digambarkan dengan rumus:

$$\begin{aligned}
 S &= \begin{bmatrix} Shh & Shv \\ Svh & Svv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} a\cos^2\theta + b\sin^2\theta & (b-a)\sin\theta\cos\theta \\ (b-a)\sin\theta\cos\theta & a\sin^2\theta + b\cos^2\theta \end{bmatrix} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Dimana: $Shv = Svh$, dan θ adalah sudut rotasi dari sumbu vertikal.

Matriks kovariansi dari model hamburan diatas adalah:

$$C_v = f_v \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{3} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

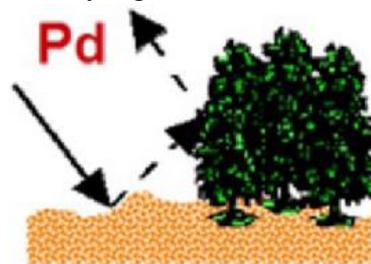
Dimana, $f_v = 3[Shv]^2$ (2.3)

Maka, daya hambur yang didapatkan adalah:

$$P_v = \frac{8f_v}{3} \quad (2.4)$$

dimana f_v sesuai dengan kontribusi volume hamburan ke komponen $|S_{vv}|^2$

- 2) Mekanisme hamburan pantulan ganda (dari sepasang permukaan ortogonal dengan konstanta dielektrik yang berbeda)



Gambar 2.8. Hamburan Pantulan Ganda

Model hamburan digambarkan dengan rumus:

$$S = \begin{bmatrix} Shh & Shv \\ Svh & Svv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j2\gamma_h} R_{th} R_{gh} & 0 \\ 0 & e^{j2\gamma_v} R_{tv} R_{gv} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dimana, R_{th} dan R_{tv} merupakan permukaan vertikal yang memiliki koefisien pantulan untuk polarisasi horizontal dan vertikal, sedangkan yang horizontal menyajikan koefisien R_{gh} dan R_{gv} untuk polarisasi yang sama. Selain itu, komponen dua fase untuk polarisasi horizontal dan vertikal dipertimbangkan, yaitu, $e^{j2\gamma_h}$ dan $e^{j2\gamma_v}$, masing-masing. Istilah fase kompleks γ_h dan γ_v memperhitungkan redaman atau efek perubahan fasa (ESA, 2020).

Matriks kovariansi dari model hamburan diatas adalah:

$$Cd = fd \begin{bmatrix} |a|^2 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

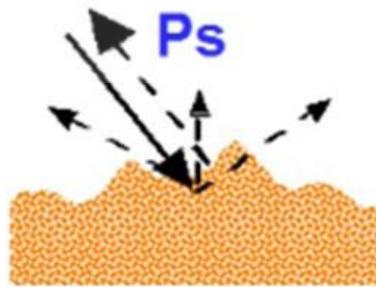
$$\text{Dimana, } fd = [R_{tv} R_{gv}]^2 \quad (2.7)$$

$$\text{Dan, } a = e^{2j(\gamma_h - \gamma_v)} \frac{R_{th} R_{gh}}{R_{tv} R_{gv}} \quad (2.8)$$

Maka, daya hambur yang didapatkan adalah:

$$Pd = fd(1 + |a|^2) \quad (2.9)$$

- 3) Mekanisme hamburan permukaan (hamburan Bragg urutan pertama dari permukaan yang cukup kasar)



Gambar 2.9. Hamburan Permukaan

Model hamburan digambarkan dengan rumus:

$$S = \begin{bmatrix} Shh & Shv \\ Svh & Svv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Dimana R_h dan R_v adalah koefisien Fresnel atau refleksi untuk gelombang terpolarisasi horizontal dan vertikal (Nurtyawan, Wikantika, Saepuloh, Harto, & Kondoh, 2018).

Matriks kovariansi dari model hamburan diatas adalah:

$$C_s = f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\text{Dimana, } f_s = |R_v|^2 \quad (2.12)$$

$$\text{Dan, } \beta = \frac{R_h}{R_v} \quad (2.13)$$

Maka, daya hambur yang didapatkan adalah:

$$P_d = f_s(1 + |\beta|^2) \quad (2.14)$$

Oleh karena itu, dekomposisi Freeman mengekspresikan matriks kovarians terukur $[C_3]$ sebagai berikut:

$$[C_3] = [C_v] + [C_d] + [C_s] \quad (2.15)$$

Akhirnya, daya hambur yang tersebar (P_v , P_d , dan P_s) dapat digunakan untuk menghasilkan gambar RGB untuk menyajikan semua informasi polarimetri kode warna dalam satu-satunya gambar, dan dapat digunakan sebagai fitur klasifikasi untuk memungkinkan diferensiasi antara berbagai jenis tutupan lahan (Freeman & Durden, 1998). Maka, total daya (P) dari dekomposisi Freeman-Durden dapat disimpulkan dengan rumus:

$$P = |S_{hh}|^2 + |S_{vv}|^2 + 2|S_{hv}|^2 = P_v + P_d + P_s \quad (2.16)$$