

Estimasi Produktivitas Padi Sawah Berbasis Kalender Tanam Heterogen Menggunakan Teknologi Pengindraan Jauh

Wilayah Studi: Jawa Barat Bagian Utara

DEWI KANIA SARI^{1,2}, ISHAK HANAFIAH ISMULLAH²,
WIDYO NUGROHO SULASDI², AGUNG BUDI HARTO²

1. Jurusan Teknik Geodesi – FTSP Institut Teknologi Nasional, Bandung
2. Program Studi Teknik Geodesi & Geomatika – Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Email: dewiks@itenas.ac.id

ABSTRAK

Pengindraan jauh yang dikombinasikan dengan model-model produksi tanaman merupakan sarana yang ampuh untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman pada berbagai skala spasial. Makalah ini menyajikan metode baru untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman padi sawah berbasis kalender tanam heterogen. Metode ini dibangun berdasarkan sintesis antara model estimasi produktivitas hasil tanaman dengan model deteksi fenologi padi sawah. Model yang dikembangkan diimplementasikan di wilayah Pantura Jawa Barat untuk padi sawah musim kemarau tahun 2004 dengan menggunakan data MODIS. Validasi dengan menggunakan data statistik dari Dinas Pertanian Kabupaten memberikan rata-rata kuadrat simpangan (RMSD) sebesar $\pm 0,974$ ton/ha untuk perbandingan pada tingkat kecamatan dan $\pm 0,548$ ton/ha untuk perbandingan pada tingkat kabupaten. Meskipun data MODIS dengan resolusi $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ terlalu kasar untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman pada skala lokal, namun cukup memadai untuk mengkaji variabilitas spasial produktivitas padi sawah pada area yang luas yang mencakup beberapa skema irigasi atau DAS.

Kata Kunci: produktivitas, biomassa, padi sawah, model SEBAL, fenologi, MODIS.

ABSTRACT

The combination of remote sensing and crop production models is a powerful tool to estimate crop yield at various spatial scale. This paper presents a new method for estimating the lowland rice yield based on heterogeneous cropping calendar. The method was developed by synthesizing a crop yield estimation model with a lowland rice phenology detection model. The developed method has been implemented in the northern part of West Java Province, known as Pantura Jawa Barat region, by using MODIS data. The validation using rice yield statistics data of District Office of Agriculture revealed a root mean square deviation (RMSD) of ± 0.974 ton/ha and ± 0.548 ton/ha for subdistrict and district level comparisons, respectively. MODIS measurements with $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ are too coarse to estimate crop yield on a local scale, but they are suitable to assess spatial variabilities rice yield over irrigation schemes and river basins.

Keywords: crop yield, biomass, lowland rice, SEBAL model, phenology, MODIS.

1. PENDAHULUAN

Produksi padi/beras merupakan salah satu indikator ketahanan pangan. Estimasi produksi padi sebelum masa panen sangat penting untuk mengevaluasi tingkat kecukupan persediaan pangan dan menjadi bahan pertimbangan dalam mengambil keputusan apakah perlu melakukan impor jika terjadi defisit atau ekspor jika terjadi surplus persediaan padi/beras. Di Indonesia, sampai saat ini estimasi produksi padi dilaksanakan oleh beberapa instansi antara lain: Badan Urusan Logistik (Bulog), Badan Pusat Statistik (BPS), dan Dirjen Bina Produksi Tanaman Pangan dan Hortikultura, Departemen Pertanian [1]. Pendekatan yang dilakukan oleh masing-masing instansi berbeda-beda. Sebagai contoh, Departemen Pertanian melakukan perkiraan produktivitas padi berdasarkan data lapangan yang dihimpun dari mantri tani di setiap kecamatan berdasarkan hasil ubinan secara acak terpilih [1, 2]. Pengumpulan data produktivitas melalui pengukuran di lapangan memerlukan tenaga dan biaya yang banyak serta memakan waktu yang lama. Sains dan teknologi penginderaan jauh dapat menjadi alternatif untuk mengestimasi produktivitas padi pada area yang luas secara lebih cepat dan dengan biaya yang relatif murah. Telah diketahui bahwa penginderaan jauh yang dikombinasikan dengan model-model produksi tanaman merupakan sarana yang ampuh untuk mengestimasi produktivitas tanaman pada berbagai skala spasial, baik skala lokal, regional, maupun global [3, 4, 5].

Model penginderaan jauh yang menghubungkan data reflektansi citra satelit dengan parameter tanaman padi akan sangat berguna untuk memantau pertumbuhan biomassa dan memprediksi produktivitas hasil tanaman (*crop yield*) secara lebih cepat dan efisien. Organisasi PBB untuk pangan dan pertanian, FAO (*Food and Agricultural Organization*), telah mengembangkan beberapa prosedur untuk menghitung produktivitas tanaman pada skala regional dari nilai *NDVI* menggunakan citra satelit dengan resolusi spasial rendah dan resolusi temporal tinggi (misalnya [6]). Salah satu prosedur yang umum diterapkan adalah pengembangan hubungan empiris antara *NDVI* dengan produktivitas tanaman. Kelemahan umum dari sebagian besar metode yang menggunakan hubungan statistik antara *NDVI* dengan produktivitas tanaman adalah karakter empiris yang kuat dan juga koefisien korelasi yang dihasilkan dari sedang hingga rendah (seperti [7]). Pendekatan empiris ini tidak efisien diaplikasikan pada skala regional karena akan memerlukan tenaga dan biaya yang banyak untuk mengumpulkan data produktivitas tanaman di lapangan. Di samping itu, pada dasarnya produktivitas tanaman tergantung pada lebih banyak faktor selain kemunculan klorofil [4, 8].

Untuk tanaman padi, studi-studi yang dilakukan oleh [9] dan [10] menunjukkan hubungan aktif antara respon spektral tanaman padi dengan biomasnya. Monteith [11] memelopori konsep perhitungan produksi biomassa primer neto (*net primary biomass production*) sebagai fungsi dari radiasi aktif fotosintesis terserap (*Absorbed Photosynthetically Active Radiation/APAR*). Bastiaanssen & Ali [4] mengembangkan metode baru berbasis citra satelit untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman melalui sintesis dari beberapa model, dimana 3 di antaranya adalah model produksi biomassa dari Monteith [11], model efisiensi pemakaian cahaya dari Field dkk. [27], dan model SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) dari Bastiaanssen dkk. [12]. Model tersebut diaplikasikan di Pakistan dan untuk memprediksi produktivitas hasil tanaman dengan hasil yang memuaskan untuk tanaman gandum, padi, dan tebu [4].

Perhitungan produktivitas hasil tanaman dilakukan untuk setiap satu periode musim tanam (*growing season*). Dengan demikian awal musim tanam (tanggal tanam) dan akhir musim tanam (tanggal panen) harus diketahui. Pada tanaman-tanaman yang memiliki pola tanam dan kalender tanam yang tetap atau teratur tidak sulit untuk mengetahui dan menentukan waktu awal dan akhir musim tanam sehingga perhitungan produktivitas hasil tanaman musiman dapat dilakukan dengan lebih mudah. Namun, tidak demikian halnya dengan tanaman dan lahan pertanian yang memiliki pola tanam dan kalender tanam yang heterogen. Pada kondisi demikian, estimasi produktivitas hasil tanaman musiman (1 periode musim tanam) pada umumnya ditentukan dengan asumsi bahwa waktu awal dan akhir musim tanam pada keseluruhan area yang menjadi objek kajian adalah sama. Hal ini tentu tidak realistis dan akan memberikan estimasi yang kurang akurat.

Padi sawah ditanam secara meluas di wilayah Asia dengan beragam jenis pola tanam. Di wilayah zona iklim sedang atau subtropis, musim tanam padi dibatasi pada musim panas dan tahapan penanaman cenderung terharmonisasi antarlokasi. Namun, di daerah tropis, seperti Indonesia, temperatur tidak menjadi faktor pembatas yang signifikan sehingga padi sawah dapat ditanam sepanjang tahun asalkan suplai air tercukupi. Oleh karena itu musim tanam padi dapat direncanakan melalui suatu jadwal/skema irigasi atau bahkan secara acak oleh keputusan petani [13]. Kondisi ini mengakibatkan pola tanam yang heterogen dimana satu area sawah dengan area sawah lainnya memiliki kalender tanam yang berbeda sehingga pada saat yang sama tahapan pertumbuhan padi antarsawah berbeda-beda. Untuk itu perlu dikembangkan metode penginderaan jauh untuk mengestimasi produktivitas padi sawah berbasis kalender tanam yang heterogen. Tahap-tahap pertumbuhan (fenologi) padi sawah dapat dideteksi menggunakan data citra satelit (seperti [14, 15, 16]). Hasil deteksi fenologi padi sawah tersebut dapat digunakan untuk mengestimasi tanggal tanam dan tanggal panen yang diperlukan dalam proses estimasi produktivitas padi sawah. Sari dkk. [14] menggunakan data berkala indeks vegetasi *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) dan *LSWI* (*Land Surface Water Index*) untuk mendeteksi tanggal tanam dan tanggal panen padi sawah berbasis piksel-per-piksel. *EVI* memberikan gambaran tingkat kehijauan vegetasi sedangkan *LSWI* mendeskripsikan tingkat kelembapan vegetasi dan tanah.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode estimasi produktivitas hasil tanaman (*crop yield*) padi sawah berbasis kalender tanam heterogen dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh. Metode tersebut dikembangkan melalui sintesis antara model estimasi produktivitas hasil tanaman dari Bastiaanssen & Ali [4] dan model deteksi fenologi padi sawah yang dikembangkan oleh Sari dkk. [14].

2. METODOLOGI

2.1 Deskripsi Model

a. Model SEBAL

Bastiaanssen & Ali [4] mensintesis beberapa model yang ada untuk mengestimasi pertumbuhan biomassa dan produktivitas hasil tanaman. Untuk menentukan akumulasi biomassa, Bastiaanssen & Ali [4] menggunakan model dari Monteith [11]:

$$Bio_a = \sum (\varepsilon \times f_{PAR} \times PAR \times dt) \quad (1)$$

dimana

Bio_a ($kg\ m^{-2}$) = akumulasi biomassa kering di atas tanah pada periode dt ,

PAR ($W\ m^{-2}$) = radiasi aktif fotosintetis,

f_{PAR} (-) = fraksi dari PAR yang diserap oleh daun hijau dalam kanopi,

ε ($g\ MJ^{-1}$) = efisiensi pemakaian cahaya (*light use efficiency*), dan

dt = periode waktu akumulasi.

PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) adalah bagian dari radiasi matahari gelombang pendek yang diserap oleh klorofil untuk proses fotosintesis di dalam tanaman. Oleh karena itu PAR merupakan fraksi dari radiasi matahari datang (R_{Sin}):

$$PAR = a \times R_{Sin24} \quad (2)$$

dimana a adalah konstanta dari persamaan tersebut yang menyatakan bagian dari R_{Sin} yang dapat digunakan oleh klorofil daun untuk proses fotosintesis. R_{Sin} regional dapat diperoleh melalui interpolasi spasial data pengamatan radiasi matahari di stasiun-stasiun klimatologi. Meskipun fraksi PAR/R_{Sin} tersebut nilainya bervariasi, namun pada umumnya nilai pendekatan sebesar 45–50% diterima secara umum untuk menyatakan kondisi rata-rata harian (24 jam) (seperti [3]).

Pengindraan jauh memberikan peluang untuk mengestimasi f_{PAR} secara langsung sebagai fungsi linear dari $NDVI$. Bastiaanssen & Ali [4] menggunakan hubungan linear berikut untuk mengestimasi f_{PAR} dari indeks vegetasi $NDVI$:

$$f_{PAR} = -0,161 + 1,257NDVI \quad (3)$$

Membuat peta f_{PAR} pada skala regional menggunakan $NDVI$ jauh lebih memungkinkan, karena $NDVI$ dapat dihitung dari sensor multispektral sebagian besar satelit optis. $NDVI$ didefinisikan sebagai [17]:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (4)$$

dimana ρ_{nir} = reflektansi permukaan kanal NIR; ρ_{red} = reflektansi permukaan kanal merah.

Untuk menentukan nilai efisiensi pemakaian cahaya ε ($g MJ^{-1}$) dapat digunakan model berikut [5]:

$$\varepsilon = \varepsilon' \Lambda \quad (5)$$

dimana

ε' ($g MJ^{-1}$) = efisiensi pemakaian cahaya maksimum untuk biomassa di atas tanah dan

Λ (-) = fraksi evaporatif.

Nilai ε' berkisar dari 1,8 hingga 2,7 $g MJ^{-1}$ untuk berbagai varietas padi yang diuji dari tahun 1989 hingga 1998 [4]. Fraksi evaporatif (Λ) dapat ditentukan dengan menggunakan model SEBAL [12]:

$$\Lambda = \frac{\lambda ET_a}{R_n - G_0} = \frac{R_n - G_0 - H}{R_n - G_0} \quad (6)$$

dimana λET_a ($W m^{-2}$) = fluks panas laten; R_n ($W m^{-2}$) = radiasi neto; G_0 ($W m^{-2}$) = fluks panas tanah; dan H ($W m^{-2}$) = fluks panas terasa.

Masing-masing komponen neraca energi tersebut dapat diestimasi dengan menggunakan parameter-parameter permukaan dan vegetasi yang diturunkan dari data citra satelit ditambah dengan data cuaca. Fluks radiasi neto diestimasi dengan menggunakan neraca radiasi permukaan [18]:

$$R_n = (1 - \alpha_o) R_{Sin} + (R_{Lin} - R_{Lout}) - (1 - \varepsilon_o) R_{Lin} \quad (7)$$

dimana R_{Sin} ($W m^{-2}$) = radiasi gelombang pendek datang; R_{Lin} ($W m^{-2}$) = radiasi gelombang panjang datang; R_{Lout} ($W m^{-2}$) = radiasi gelombang panjang pergi; α_o (-) = albedo permukaan; dan ε_o (-) = emisivitas permukaan.

Fluks panas tanah diestimasi sebagai fraksi dari radiasi neto [18]:

$$G_0 = 0,30 (1 - 0,98 NDVI^4) R_n \quad (8)$$

Adapun fluks panas terasa diprediksi menggunakan persamaan berikut [18]:

$$H = \frac{\rho \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (9)$$

dimana ρ ($kg m^{-3}$) = kerapatan udara; c_p = panas spesifik udara ($= 1004 J kg^{-1} K^{-1}$); r_{ah} ($s m^{-1}$) = resistensi aerodinamis terhadap transpor panas, dan dT = selisih temperatur antara dua ketinggian di atas permukaan tanah, z_1 dan z_2 . Dalam proses estimasi fluks panas terasa (H), diperlukan data kecepatan angin (u_2) yakni untuk mengestimasi resistensi aerodinamis terhadap transpor panas (r_{ah}). Detail tahapan perhitungan fraksi evaporatif (Λ) berbasis model SEBAL dapat dilihat antara lain dalam [12, 18, 19].

Produktivitas hasil tanaman, Y_a , adalah komponen dari akumulasi biomassa kering di atas tanah. Untuk memperoleh produktivitas aktual tanaman selama satu musim tanam maka Bio_{aGS} harus dikalikan dengan indeks panen (h_{ind}) [20]. Indeks panen adalah rasio antara produk hasil panen terhadap biomassa di atas tanah. Indeks ini harus mencakup kandungan air dari produk panen dan dalam sebagian besar penelitian tidak termasuk akar. Richards dan Townley-Smith [21] telah memberikan sebuah model untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman:

$$Y_{aGS} = \frac{h_{ind} \times Bio_{aGS}}{1 - m_{oi}} \quad (10)$$

dimana Y_{aGS} (kg m^{-2}) = produktivitas aktual musiman (satu musim tanam); h_{ind} (kg kg^{-1}) = indeks panen; dan m_{oi} (-) = kandungan kelembapan produk selama panen.

Nilai indeks panen tergantung pada jenis dan varietas tanaman. Dalam hal ini produksi tanaman padi adalah dalam bentuk gabah kering panen (GKP). Untuk tanaman padi nilai h_{ind} berkisar 0,25 – 0,50 (kg kg^{-1}) [4] (Bastiaanssen & Ali, 2003). Makarim dkk. [22] menyajikan data rasio gabah terhadap jerami untuk berbagai varietas padi. Untuk varietas IR64 dan Ciherang yang paling banyak ditanam di daerah Jawa Barat, rasio gabah terhadap jerami adalah 1,1 pada musim hujan. Dengan demikian h_{ind} untuk kedua varietas tersebut adalah 0,48. Berdasarkan literatur, nilai m_{oi} berkisar 0,1 – 0,15 [4].

b. Model Deteksi Fenologi Padi

Seperti telah disinggung di muka, perhitungan produktivitas hasil tanaman padi dalam satu musim tanam (Y_{aGS}) pada sawah yang memiliki kalender tanam heterogen memerlukan data tanggal tanam dan tanggal panen pada setiap piksel yang dianalisis. Sari dkk. [14] telah mengembangkan metode untuk mendeteksi tahap-tahap fenologi padi menggunakan data berkala citra MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Di bawah ini akan dijelaskan garis besar algoritma model deteksi fenologi padi sawah tersebut, sedangkan detailnya dapat dilihat dalam Sari dkk. [14].

Dalam upaya mengkarakterisasi tahap-tahap fenologi padi sawah, Sari dkk. [14] menggunakan indeks vegetasi EVI dan $LSWI$ berkala yang diturunkan dari data MODIS. Indeks EVI dan $LSWI$ dihitung menggunakan pers. (11) [23] dan pers. (12) [24] sebagai berikut:

$$EVI = 2.5 \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (11)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (12)$$

dimana ρ_{nir} = reflektansi permukaan kanal NIR; ρ_{red} = reflektansi permukaan kanal merah; ρ_{blue} = reflektansi permukaan kanal biru; dan ρ_{swir} = reflektansi permukaan kanal SWIR.

Kanal NIR dan SWIR yang digunakan adalah kanal NIR_1 (841-875 nm) dan $SWIR_1$ (1628-1652 nm). Adapun produk data MODIS yang digunakan adalah MOD09A1 yang berisi reflektansi permukaan kanal 1-7 hasil komposit 8-harian.

Tahap-tahap fenologi padi sawah dikarakterisasi melalui 3 tahap, yaitu (i) tahap penggenangan/inundasi atau penanaman padi, (ii) tahap *heading* (puncak tahap vegetatif dan generatif, ditandai dengan keluarnya bunga/malai), dan (iii) tahap panen. Algoritma dan *threshold* untuk mendeteksi tahap-tahap fenologi padi sawah tersebut dijabarkan berikut ini (diagram alir diperlihatkan pada Gambar 2).

(i) Tanggal Heading (HD)

Identifikasi tahap-tahap fenologi padi sawah diawali dengan pendeteksian tanggal *heading* (HD). Menurut data berkala reflektansi permukaan padi sawah [25], nilai EVI maksimum terjadi di sekitar tanggal *heading*, 60 HST (Hari Setelah Tanam). Padi berubah tahap pertumbuhannya dari

pertumbuhan vegetatif menjadi pertumbuhan generatif pada saat mencapai tanggal *heading*, dimana dedaunan padi mulai mengering dan kemudian mati. Oleh sebab itu, pada metode ini tanggal ketika *EVI* mencapai nilai maksimum dalam grafik profil waktu didefinisikan sebagai estimasi tanggal *heading* dengan $EVI \geq 0,5$ sebagai *threshold*.

(ii) Tanggal Tanam (PL)

Pada umumnya, lahan sawah dibajak dan digenangi air sebelum padi ditanam. Selama periode ini nilai *EVI* pada lahan sawah menurun dan kemudian naik kembali setelah padi ditanam. Sementara itu, nilai *LSWI* naik selama periode penggenangan. Oleh karena itu, dengan mengacu kepada Xiao dkk. [16], diambil hipotesis bahwa inversi sementara nilai indeks vegetasi dimana nilai *LSWI* mendekati atau melebihi nilai *EVI*, merupakan signal periode penggenangan dan penanaman padi pada lahan sawah. Karena tanggal *heading* dicapai sekitar 60 HST, maka setelah tanggal *heading* pada suatu piksel teridentifikasi selanjutnya dilakukan pendeteksian tanggal tanam dengan mengikuti *threshold* berikut: $(LSWI + 0,05) \geq EVI$ dalam delapan atau sembilan atau tujuh tanggal data komposit 8-harian (64 atau 72 atau 56 hari) sebelum tanggal *heading*. Sebagai contoh, jika tanggal *heading* adalah tanggal 265 DOY (*Day Of Year*) maka pengecekan nilai *LSWI* dan *EVI* tanggal tanam dilakukan pada tanggal 201 DOY atau 209 DOY atau 193 DOY.

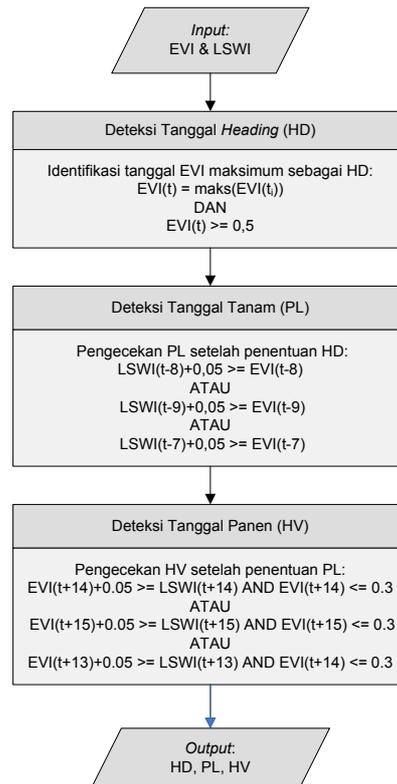
(iii) Tanggal Panen (HV)

Setelah periode *heading*, nilai *EVI* dan *LSWI* pada lahan sawah mulai menurun karena dedaunan mengering dan mati, serta air dalam sawah dikeringkan sebelum dilakukan pemanenan. *EVI* kemudian menurun dengan cepat karena pemanenan [15] dan demikian pula dengan *LSWI*. Domiri dkk. [25] menemukan bahwa nilai *EVI* pada tahap pemanenan berkisar 0,24 – 0,28. Dalam algoritma ini, masa tanam padi sawah diasumsikan berkisar 105 – 120 hari, berdasarkan pertimbangan bahwa mayoritas varietas padi sawah yang ditanam di wilayah studi adalah varietas IR64 dan Ciherang [26]. Oleh karena itu, untuk mendeteksi tanggal panen (HV) digunakan *threshold* berikut: $EVI \leq 0,3$ dan $(EVI + 0,05) \geq LSWI$ dalam 14 atau 15 atau 13 kali tanggal data komposit 8-harian (112 atau 120 atau 104 hari) setelah tanggal penanaman. Sebagai contoh, jika tanggal tanam adalah tanggal 201 DOY maka pengecekan *EVI* dan *LSWI* tanggal panen dilakukan pada tanggal 313 DOY atau 321 DOY atau 305 DOY.

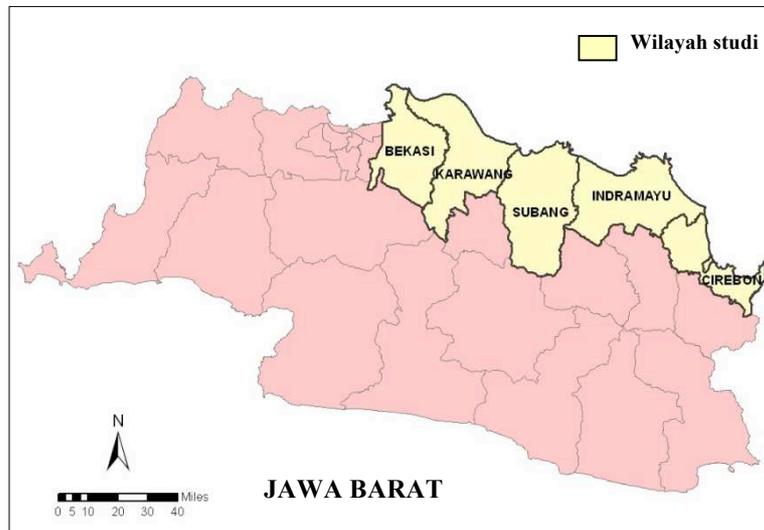
2.2 Wilayah Studi

Wilayah studi terletak di bagian utara Provinsi Jawa Barat (dikenal sebagai wilayah Pantura Jawa Barat), yang secara administratif meliputi 5 kabupaten (Gambar 2). Kabupaten yang tercakup dalam wilayah studi terdiri dari: Kab. Bekasi, Kab. Karawang, Kab. Subang, Kab. Indramayu, dan Kab. Cirebon. Luas wilayah kelima kabupaten ini sekitar 8.976 km² dengan luas lahan sawah sekitar 5.038 km². Wilayah ini berperan sebagai sentra produksi padi di Jawa Barat. Secara geografis, wilayah studi terletak di antara 5^o 57' 18,95" LS – 6^o 57' 47,75" LS dan 106^o 58' 18,51" BT – 108^o 45' 46,11" BT.

Estimasi Produktivitas Padi Sawah Berbasis Kalender Tanam Heterogen Menggunakan Teknologi Penginderaan Jauh



Gambar 1. Skema Algoritma Metode Deteksi Fenologi Padi Sawah (Sumber: [14])



Gambar 2. Wilayah Studi

2.3 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data citra MODIS, data DEM SRTM, dan data cuaca. Tabel 1 menyajikan rincian data yang digunakan. Proses estimasi produktivitas hasil tanaman padi sawah dilakukan pada piksel-piksel sawah berdasarkan data batas sawah yang diperoleh dari peta guna lahan/tutupan lahan skala 1 : 250.000 yang bersumber dari Kelompok Keilmuan InSIG FITB ITB.

Tabel 1. Data yang Digunakan dalam Proses Estimasi Produktivitas Padi Sawah

No	Jenis Data	Peruntukan	Tanggal Data/Citra
1	MODIS – MOD09A1 (Reflektansi kanal 1-7 komposit 8 harian; resolusi 500 m)	1) Penurunan indeks vegetasi <i>EVI</i> dan <i>LSWI</i> untuk deteksi fenologi padi sawah pada resolusi 1 km	Satu set data lengkap satu tahun (46 buah citra) tanggal 1, 9, 17, ..., 353, 361 DOY 2004
		2) Estimasi albedo permukaan (α_0) dan <i>NDVI</i> pada resolusi 1 km	8 Mei 2004 (129 DOY) 1 Juni 2004 (153 DOY) 9 Juni 2004 (163 DOY) 25 Juni 2004 (177 DOY) 19 Juli 2004 (201 DOY) 27 Juli 2004 (209 DOY) 12 Agustus 2004 (225 DOY) 20 Agustus 2004 (233 DOY) 28 Agustus 2004 (241 DOY) 5 September 2004 (249 DOY) 29 September 2004 (273 DOY)
2	MODIS – MOD11A1 (LST dan Emisivitas kanal 31 dan 32 harian; resolusi 1 km)	Estimasi suhu permukaan daratan (T_0) dan emisivitas (ϵ_0) pada resolusi 1 km	11 Mei 2004 (132 DOY) 2 Juni 2004 (154 DOY) 16 Juni 2004 (168 DOY) 30 Juni 2004 (182 DOY) 23 Juli 2004 (205 DOY) 30 Juli 2004 (212 DOY) 12 Agustus 2004 (225 DOY) 19 Agustus 2004 (233 DOY) 29 Agustus 2004 (242 DOY) 9 September 2004 (253 DOY) 6 Oktober 2004 (280 DOY)
3	DEM SRTM (resolusi 90m)	DEM pada resolusi 1 km	
4	Data cuaca dari 9 stasiun AWS 1) Kecepatan angin (U_2) 2) Radiasi matahari (R_{Sin})	Estimasi radiasi matahari (R_{Sin}) dalam format raster pada resolusi 1 km dan kecepatan angin (U_2) pada 1 stasiun rujukan (Stasiun Sukamandi-Subang)	Sama dengan tanggal data citra MOD11A1

2.4 Implementasi

Secara garis besar pelaksanaan penelitian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

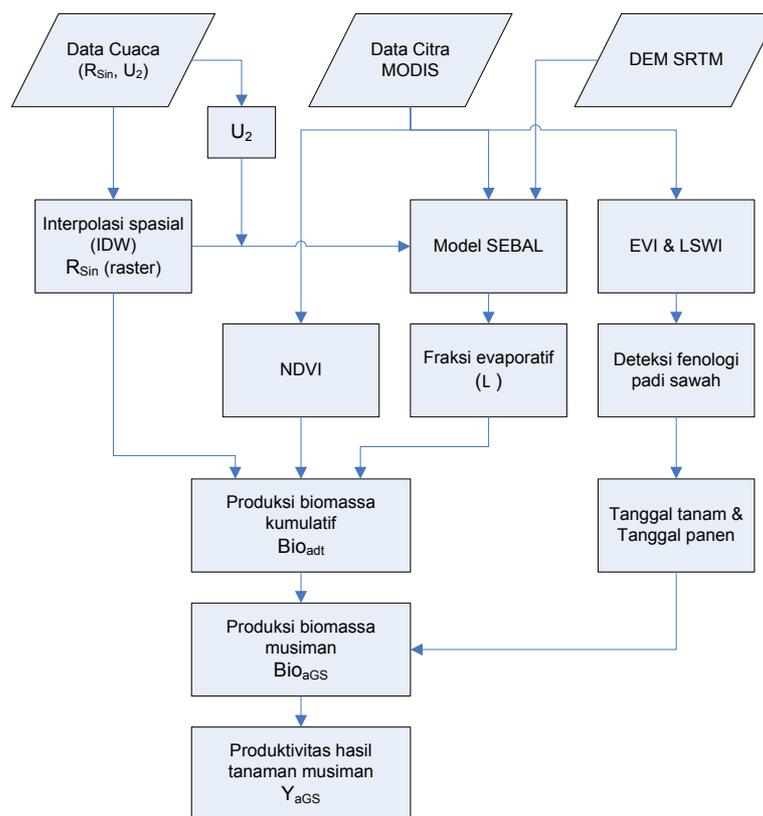
- Prapengolahan data
- Pendeteksian tahap-tahap fenologi sawah
- Estimasi fraksi evaporatif (A) berbasis model SEBAL
- Estimasi produksi biomassa dan produktivitas padi sawah musiman

Skematisasi kerangka metodologi penelitian diperlihatkan pada Gambar 3.

a. Prapengolahan Data

Sebelum dapat digunakan dalam proses estimasi variabel-variabel penelitian, terlebih dahulu dilakukan prapengolahan data terhadap data citra MODIS, data DEM, dan data cuaca. Data MODIS MOD09A1 dan MOD11A1 adalah data level 3 yang telah memperoleh koreksi radiometris dan geometris. Prapengolahan data MOD09A1 dan MOD11A1 meliputi: (i) proses reprojeksi, yaitu

mengubah sistem proyeksi dan datum geodetik; dalam penelitian ini digunakan sistem koordinat geografik dan datum DGN-95; (ii) mengkonversi nilai digital piksel yang berupa *scaled integer* (SI); Data MOD09A1 dikonversi menjadi nilai reflektansi permukaan. Nilai reflektansi permukaan selanjutnya akan digunakan untuk menghitung indeks vegetasi (*NDVI*, *EVI*, dan *LSWI*) dan albedo permukaan (α_0). Adapun data MOD11A1 dikonversi menjadi nilai suhu permukaan dan emisivitas permukaan; (iii) pemotongan citra, disesuaikan dengan cakupan wilayah penelitian. Prapengolahan data DEM SRTM meliputi proses pencuplikan kembali dari resolusi spasial $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ menjadi $1\text{ km} \times 1\text{ km}$. Prapengolahan data cuaca (radiasi matahari, R_{Sin}) meliputi: (i) proses interpolasi spasial dari setiap parameter cuaca yang digunakan dalam penelitian ini dengan memakai metode IDW (*Inverse Distance Weighted*); hasil interpolasi berupa data raster, (ii) proses pemotongan data cuaca, disesuaikan dengan cakupan wilayah penelitian.



Gambar 3. Skema Metodologi Penelitian

b. Pendeteksian tahap-tahap fenologi sawah

Data reflektansi permukaan diolah menjadi nilai *EVI* dan *LSWI* untuk keperluan deteksi tahap-tahap fenologi padi sawah berdasarkan algoritma yang telah dijelaskan di atas. Hasil deteksi berupa tanggal tanam dan tanggal panen pada setiap piksel sawah yang dianalisis yang akan digunakan sebagai batas waktu perhitungan produksi biomassa tanaman padi musiman.

c. Estimasi fraksi evaporatif (λ) berbasis model SEBAL

Perhitungan fraksi evaporatif dilakukan untuk masing-masing tanggal citra yang diolah (lihat Tabel 1). Kesebelas tanggal citra tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan ketersediaan citra yang relatif bebas awan. Data citra yang tersedia hanya mencakup padi sawah yang ditanam pada musim kemarau tahun 2004. Input data yang digunakan dalam model SEBAL mencakup: indeks *NDVI*, albedo permukaan, suhu permukaan, DEM, dan data cuaca (kecepatan angin dan radiasi matahari). *NDVI* dihitung menggunakan pers. (4) sedangkan albedo permukaan dihitung dari 6 kanal reflektansi spektral (kanal 1, 2, 3, 4, 5, dan 7) dengan menggunakan model albedo permukaan kanal-lebar gelombang pendek (*shortwave broadband surface albedo*) [28]. Nilai fraksi evaporatif selanjutnya akan digunakan dalam

perhitungan produksi biomassa untuk setiap periode waktu antartanggal citra, dimana pada periode tersebut nilai fraksi evaporatif dianggap konstan.

d. Estimasi produksi biomassa dan produktivitas padi sawah musiman

Produksi biomassa padi sawah dihitung untuk masing-masing periode waktu antartanggal citra ($Bio_{a,dt}$) (lihat Tabel 2). Input data yang digunakan terdiri dari indeks $NDVI$, radiasi matahari (R_{sin}), dan fraksi evaporatif (Λ). Hasil estimasi $Bio_{a,dt}$ kemudian digunakan untuk menghitung akumulasi produksi biomassa selama satu musim tanam (dari tanggal tanam hingga tanggal panen) (Bio_{aGS}). Data tanggal tanam dan tanggal panen diperoleh dari hasil deteksi fenologi padi sawah.

Tabel 2. Daftar Data Olahan $Bio_{a,dt}$

$Bio_{a,dt(i)}$	Periode (DOY)	Jumlah Hari (dt)
$Bio_{a,dt(1)}$	121 – 153	33
$Bio_{a,dt(2)}$	154 – 167	14
$Bio_{a,dt(3)}$	168 – 181	14
$Bio_{a,dt(4)}$	182 – 204	23
$Bio_{a,dt(5)}$	205 – 211	7
$Bio_{a,dt(6)}$	212 – 224	13
$Bio_{a,dt(7)}$	225 – 231	7
$Bio_{a,dt(8)}$	232 – 241	10
$Bio_{a,dt(9)}$	242 – 252	11
$Bio_{a,dt(10)}$	253 – 279	27
$Bio_{a,dt(11)}$	280 – 304	25

Karena setiap piksel sawah memiliki tanggal tanam dan tanggal panen yang berbeda-beda, maka perhitungan Bio_{aGS} dilakukan piksel per piksel dengan menjumlahkan $Bio_{a,dt}$ yang tercakup dalam periode masa tanam masing-masing, berdasarkan pendekatan berikut:

$$Bio_{aGS} = Bio_{a,dt(awal)} + \sum_T^n Bio_{a,dt(i)} + Bio_{a,dt(akhir)} \quad (13)$$

dimana

$Bio_{a,dt(awal)}$ = $Bio_{a,dt}$ periode awal, yaitu sejak tanggal tanam sampai dengan tanggal akhir periode pertama

$Bio_{a,dt(akhir)}$ = $Bio_{a,dt}$ periode akhir, yaitu sejak tanggal awal periode terakhir sampai dengan tanggal panen

$\sum_T^n Bio_{a,dt(i)}$ = penjumlahan $Bio_{a,dt}$ semua periode dt yang terletak di antara periode pertama dan periode terakhir musim tanam.

Data citra yang tersedia (bebas awan) hanya dalam periode bulan Mei hingga Oktober 2004 dan tanggal tanam dan tanggal panen pada setiap piksel berbeda-beda. Oleh karena itu, perhitungan Bio_{aGS} hanya dilakukan pada piksel-piksel sawah yang memiliki masa tanam dalam periode tersebut, yaitu yang ditanam paling awal tanggal 30 April dan dipanen paling akhir tanggal 30 Oktober 2004. Hasil perhitungan Bio_{aGS} selanjutnya digunakan untuk menghitung produktivitas padi musiman (Y_{aGS}) menggunakan pers. (10).

3. HASIL DAN ANALISIS

Hasil estimasi produksi biomassa dan produktivitas padi sawah di wilayah penelitian disajikan di bawah ini beserta hasil-hasil analisis dan validasi yang telah dilakukan.

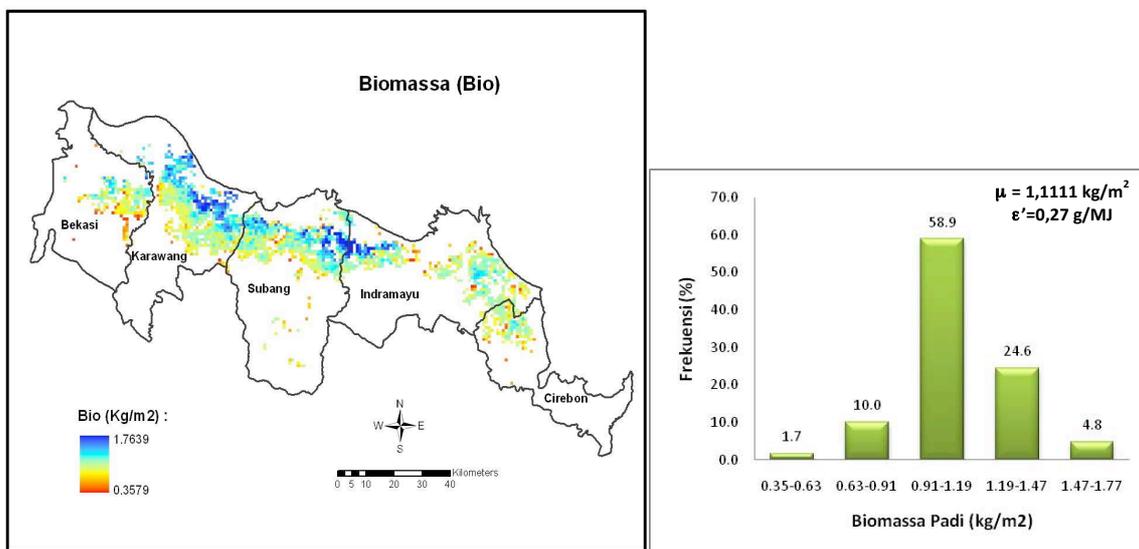
3.1 Produksi Biomassa

Dalam penelitian ini digunakan 2 alternatif nilai efisiensi pemakaian cahaya (ϵ') yaitu $2,2 \text{ g MJ}^{-1}$ dan $2,7 \text{ g MJ}^{-1}$. Rangkuman hasil hitungan produksi biomassa musiman (Bio_{aGS}) disajikan pada Tabel 3 dan distribusi spasial beserta histogramnya diperlihatkan pada Gambar 4.

Tabel 3. Produksi Biomassa Padi Sawah

	$Bio_{aGS} \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$	
	$\epsilon' = 0,22 \text{ g MJ}^{-1}$	$\epsilon' = 0,27 \text{ g MJ}^{-1}$
μ	$0,9059 \text{ kg m}^{-2}$	$1,1111 \text{ kg m}^{-2}$
Std	$0,1603 \text{ kg m}^{-2}$	$0,1986 \text{ kg m}^{-2}$

Keterangan: μ = nilai rata-rata; Std = simpangan baku; ϵ' = efisiensi pemakaian cahaya maksimum



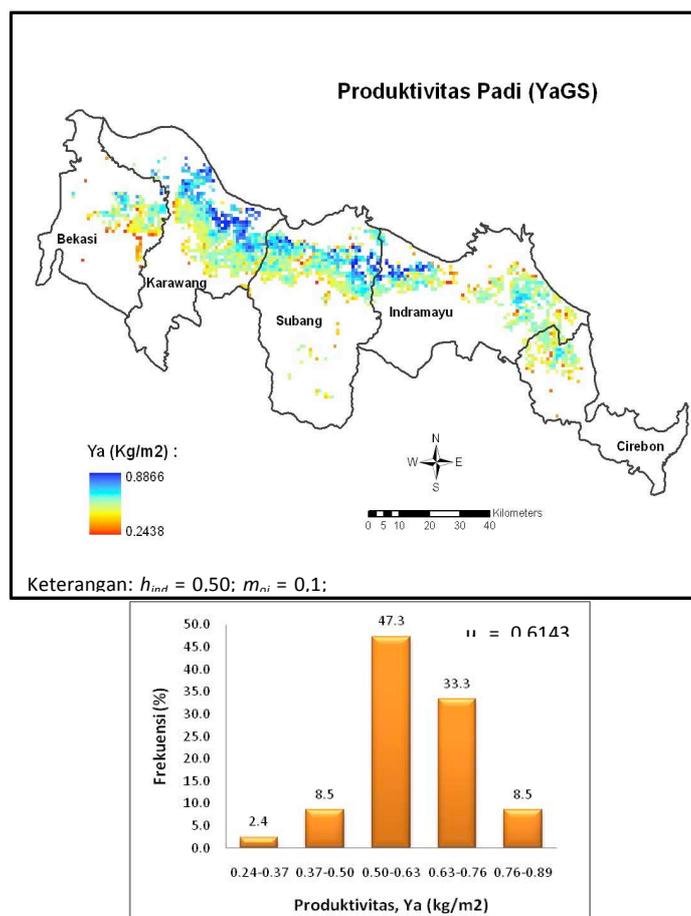
Gambar 4. Distribusi Spasial & Histogram Produksi Biomassa (Bio_{aGS}) Padi Sawah Musim Kemarau Tahun 2004 di Wilayah Pantura Jawa Barat

3.2 Produktivitas Hasil Tanaman

Perhitungan Y_{aGS} dilakukan menggunakan 2 alternatif nilai indeks panen (h_{ind}), yaitu 0,48 dan 0,50 dengan $m_{oi} = 0,1$. Dengan adanya 2 nilai h_{ind} dan 2 estimasi Bio_{aGS} maka dihasilkan 4 macam estimasi Y_{aGS} . Rangkuman hasil estimasi Y_{aGS} disajikan pada Tabel 4 dan distribusi spasial serta histogramnya ditampilkan pada Gambar 5.

Tabel 4. Produktivitas Hasil Tanaman Padi Sawah Musiman di Wilayah Pantura Jawa Barat pada Musim Kemarau 2004

	$Y_{aGS} \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$			
	$\epsilon' = 0,22 \text{ g MJ}^{-1}$		$\epsilon' = 0,27 \text{ g MJ}^{-1}$	
	$h_{ind} = 0,48$	$h_{ind} = 0,50$	$h_{ind} = 0,48$	$h_{ind} = 0,50$
μ	$0,4821 \text{ kg m}^{-2}$	$0,5020 \text{ kg m}^{-2}$	$0,5937 \text{ kg m}^{-2}$	$0,6143 \text{ kg m}^{-2}$
Std	$0,0780 \text{ kg m}^{-2}$	$0,0824 \text{ kg m}^{-2}$	$0,1017 \text{ kg m}^{-2}$	$0,1046 \text{ kg m}^{-2}$



Gambar 5. Distribusi Spasial dan Histogram Produktivitas Hasil Tanaman Musiman (Y_{aGS}) Padi Sawah di Wilayah Pantura Jawa Barat pada Musim Kemarau Tahun 2004

Distribusi spasial Y_{aGS} di wilayah penelitian menunjukkan bahwa sawah yang memiliki produktivitas tinggi berada di daerah bagian utara (diperlihatkan dalam warna biru muda hingga biru tua pada Gambar 4), sedangkan sawah yang terletak di bagian selatan memiliki produktivitas yang lebih rendah (warna kuning hingga merah). Hal ini diduga kuat berkaitan dengan tingkat konsumsi air tanaman (evapotranspirasi aktual) padi sawah di wilayah tersebut, seperti dapat dilihat pada distribusi nilai fraksi evaporatifnya. Nilai fraksi evaporatif merupakan indikasi tingkat ketersediaan air tanah/suplai air (irigasi) yang akan mempengaruhi laju evapotranspirasi tanaman di wilayah tersebut. Di samping masalah suplai air, faktor utama yang diduga menjadi penyebab rendahnya estimasi Y_a adalah masalah piksel campuran terutama di daerah yang bergunung-gunung dan daerah dekat permukiman/perkotaan. Hal ini merupakan hal yang wajar mengingat data citra satelit yang digunakan memiliki resolusi spasial 1 km \times 1 km atau 100 ha.

3.3. Analisis dan Validasi

Untuk memvalidasi hasil estimasi produktivitas hasil tanaman padi sawah yang diperoleh dari data citra MODIS di atas, dilakukan perbandingan dengan data produktivitas padi sawah dari data statistik pertanian di Dinas Pertanian Kabupaten. Data statistik produktivitas padi sawah tersebut dihimpun oleh Dinas Pertanian dari hasil pengukuran di lapangan berdasarkan hasil ubinan secara acak terpilih dari tiap desa dan kecamatan di masing-masing kabupaten.

Perbandingan data produktivitas padi sawah dilakukan pada tingkat kecamatan (nilai rata-rata di tiap kecamatan) dan tingkat kabupaten (nilai rata-rata di tiap kabupaten), selama periode panen bulan Agustus hingga Oktober 2004. Selisih antara data produktivitas padi sawah dari data statistik pertanian

(Y_{a-DP}) dengan data produktivitas padi hasil estimasi dari data MODIS (Y_{a-MOD}) disebut sebagai nilai simpangan, yang menggambarkan tingkat kesamaan produktivitas padi hasil estimasi dari pengindraan jauh dengan data statistik pertanian. Untuk mengestimasi keandalan hasil estimasi produktivitas padi di seluruh wilayah kajian digunakan besaran simpangan rata-rata mutlak (MD), simpangan rata-rata relatif (MD_r), dan akar rata-rata kuadrat simpangan ($RMSD$) (Tabel 5). Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa estimasi Y_{aGS} dengan $RMSD$ terkecil adalah $\pm 0,974$ ton/ha yang diberikan oleh pemodelan dengan menggunakan $h_{ind} = 0,50$ dan $\epsilon' = 0,27$ dengan nilai rata-rata produktivitas padi 6,143 ton/ha.

Tabel 5. Ketelitian Estimasi Produktivitas Padi Berdasarkan Perbandingan dengan Data Statistik Pertanian pada Tingkat Kecamatan

Y_{aGS}	MD (ton/ha)	MD _r (%)	RMSD (ton/ha)
$h_{ind}=0,48; \epsilon'=0,22$	1,578	27,3	$\pm 1,719$
$h_{ind}=0,48; \epsilon'=0,27$	0,942	14,5	$\pm 1,088$
$h_{ind}=0,50; \epsilon'=0,22$	1,423	19,1	$\pm 1,531$
$h_{ind}=0,50; \epsilon'=0,27$	0,816	12,8	$\pm 0,974$

Keterangan: jumlah data (n) = 46 kecamatan

Tabel 6. Perbandingan Produktivitas Padi di Wilayah Pantura Jawa Barat Berdasarkan Perbandingan dengan Data Statistik Pertanian

No	Kabupaten	MD (ton/ha)	MD _r (%)	RMSD (ton/ha)
1	Cirebon	1,095	16,2	1,354
2	Indramayu	0,571	11,1	0,792
3	Karawang	0,834	12,5	1,013
4	Subang	0,883	11,8	1,123
5	Bekasi	0,699	12,6	0,823
Rata-rata Pantura Jabar		0,816	12,8	$\pm 0,974$

Produktivitas diestimasi dengan $h_{ind} = 0,50; m_{oi} = 0,1; \epsilon' = 0,27$ g/MJ

Tabel 7. Ketelitian Estimasi Produktivitas Padi di Wilayah Pantura Jawa Barat Berdasarkan Perbandingan dengan Data Statistik Pertanian Tingkat Kabupaten

No	Kabupaten	μ (ton/ha)		Simpangan (ton/ha)	Simpangan Relatif (%)
		Y_{a-DP}	Y_{a-MOD}		
1	Cirebon	6,391	5,660	0,731	11,4
2	Indramayu	5,846	6,044	0,198	3,4
3	Karawang	6,549	6,449	0,101	1,5
4	Subang	7,229	6,281	0,948	13,1
5	Bekasi	5,361	5,508	0,147	2,7
		MD (ton/ha)		0,425	
Pantura Jabar		MD _r (%)		6,4	
		RMSD (ton/ha)		$\pm 0,548$ ton/ha	

Keterangan:

Y_{a-DP} = produktivitas padi menurut data statistik pertanian kabupaten

Y_{a-MOD} = produktivitas padi hasil estimasi data MODIS

4. KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dikembangkan metode baru untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman padi sawah berbasis kalender tanam heterogen dengan menggunakan kombinasi data citra satelit dengan data cuaca hasil pengamatan lapangan. Metode ini berbasis sintesis antara model produktivitas hasil tanaman dengan model deteksi fenologi padi sawah. Model yang dikembangkan diimplementasikan di wilayah Pantura Jawa Barat untuk padi sawah musim kemarau tahun 2004 dengan menggunakan data MODIS. Hasil kajian memberikan hasil estimasi rata-rata produktivitas padi sawah di wilayah Pantura Jawa Barat sebesar 6,143 ton/ha. Validasi menggunakan data produktivitas padi dari Dinas Pertanian Kabupaten menghasilkan nilai akar rata-rata kuadrat simpangan (*RMSD*) sebesar $\pm 0,974$ ton/ha untuk perbandingan pada tingkat kecamatan dan $\pm 0,548$ ton/ha untuk perbandingan pada tingkat kabupaten. Meskipun data MODIS dengan resolusi $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ terlalu kasar untuk mengestimasi produktivitas hasil tanaman pada skala ladang, namun cukup memadai untuk mengkaji variabilitas spasial produktivitas padi sawah pada area yang luas yang mencakup beberapa skema irigasi atau DAS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wahyunto, Widagdo, dan Heryanto, B., (2006). "Pendugaan Produktivitas Tanaman Padi Sawah Melalui Analisis Citra Satelit", *Informatika Pertanian*, Vol. 15, pp. 853- 869.
- [2] Subrata dan Kusmana, R., (2003). "Koreksi terhadap Cara Pengukuran Ubinan Tanaman Padi", *Buletin Teknik Pertanian*, Vol. 8, No. 1, pp. 15-18.
- [3] Moran, M.S., Maas, S.J., dan Pinter, P.J., (1995). "Combining Remote Sensing and Modeling for Estimating Surface Evaporation and Biomass Production", *Rem. Sens. Rev.*, Vol 12, pp. 335-353.
- [4] Bastiaanssen, W.G.M. dan Ali, S., (2003). "A New Crop Yield Forecasting Model Based on Satellite Measurements Applied Across the Indus Basin, Pakistan". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 94, pp. 321-340.
- [5] Teixeira, A.H. de C., (2008). "Measurement and Modelling of Evapotranspiration to Assess Agricultural Water Productivity in Basins with Changing Land Use Patterns: A Case Study in the Sao Francisco River Basin, Brazil", *Disertasi Program Doktor*, Wageningen Universiteit.
- [6] Hielkema, J.U., (1990). *Operational satellite environmental monitoring for food security by FAO*, The ARTEMIS System, FAO Remote Sensing Centre, Rome, Italy.
- [7] Sharma, T., Sudha, K.S., Ravi, N., Navalgund, R.R., Tomar, K.P., Chakravarty N.V.K., dan Das, D.K., (1993). "Procedures for Wheat Yield Prediction Using Landsat MSS and IRS-1A Data", *Int. J. Rem. Sens.*, Vol. 14, No. 13, pp. 2509-2518.
- [8] Rosema, A., Roebeling, R.A., van Dijk, A., Nieuwenhuis, G.J.A., Huygen, J., dan Kashasha, D.A., (1998). *ACMP Agromet and Crop Monitoring Project in the SADC region*, BCRS Report NRSP-2, 96-13. Delft, The Netherlands, 101 pp.
- [9] Gilabert, M.A. dan Melia, J., (1990). "Usefulness of the Temporal Analysis and Normalized Difference Vegetation in the Study of Rice by Means of Landsat-5 TM Images: Establishment of Relationship for Yield Prediction Purpose", *Geocarto Int.*, Vol. 5(4), pp. 27-32.
- [10] Casanova, D., Epema, G.F., dan Goudriaan, J., (1998). "Monitoring Rice Reflectance at Field Level for Estimating Biomass and LAI", *Field Crops Res.*, Vol. 55, pp. 83- 92.
- [11] Monteith, J.L., (1972). "Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems", *J. Appl. Ecol.*, Vol 9, pp. 747-766.
- [12] Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., dan Holtslag, A.A.M., (1998). "A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). 1. Formulation". *J. Hydr.* 212-213, pp. 198-212.
- [13] Uchida, S., (2007). "Monitoring of Paddy Rice Planting with Complex Cropping Pattern Using Satellite Remote Sensing Data – A Case of West Java, Indonesia", *Proceedings of the 28th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS)*, 12-16 November 2007, Kuala Lumpur, Malaysia,

- <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2007/Papers/TS1.1.pdf>, diakses pada 15 September 2009.
- [14] Sari, D.K., Ismullah, I.H., Suladi, W.N., dan Harto, A.B., (2010). "Detecting Rice Phenology in Paddy Fields with Complex Cropping Pattern Using Time Series MODIS Data A Case study of Northern Part of West Java – Indonesia", *ITB Journal of Science*, **42 A**, No. 2, pp. 91-106.
- [15] Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. & Ohno, H., (2005). "A Crop Phenology Detection Method Using Time-Series MODIS data", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 96, pp. 366-374.
- [16] Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., Frohling, S., Li, C., Sales, W., dan Moore III, B., (2005). "Mapping Paddy Rice Agriculture in Southern China Using Multi-Temporal MODIS Images", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 95, pp. 480- 492.
- [17] Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., dan van Leeuwen, W., (1997). "A Comparison of Vegetation Indices Global Set of TM Images for EOSMODIS", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, pp. 440-451.
- [18] Tasumi, M., Allen, R.G. dan Bastiaanssen, W.G.M., (2000). "The Theoretical Basis of SEBAL, Appendix A", *Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing*, Final Report, EOSDIS Project. Wltham, Mass.: Raytheon Systems Company.
- [19] Sari, D.K., Ismullah, I.H., Sulasdi, W.N. dan Harto, A.B., (2009). "Pemantauan Kekeringan Menggunakan Data Penginderaan Jauh dengan Basis Model SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*)", *Prosiding Forum Ilmiah Tahunan (FIT) 2009*, Semarang 3 Desember 2009.
- [20] Horie, T., Yajima, M., dan Nakagawa, H., (1992). "Yield forecasting", *Agr. Syst.*, Vol. 40, pp. 211-236.
- [21] Richards, A. dan Townley-Smith, T.F., (1987). "Variation of Leaf Area Development and Its Effects on Water Use, Yield and Harvest Index of Drought Wheat", *Aust. J. agric. Res.*, Vol. 38, pp. 883-992.
- [22] Makarim, A.K., Sumarno, dan Suyamto, (2007). *Jerami Padi: Pengelolaan dan Pemanfaatan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan*, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, <http://www.pustaka-deptan.go.id/bppi/lengkap/bpp07005.pdf>, diakses pada 10 Februari 2010.
- [23] Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., dan Ferreira, L. G., (2002). "Overview of The Radiometric and Biophysical Performance of The MODIS Vegetation Indices", *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, pp. 195-213.
- [24] Xiao, X., Boles, S., Frohling, S., Salas, W., Moore III, B., dan Li, C., (2002). "Observation of Flooding and Rice Transplanting of Paddy Rice Fields at The Site to Landscape Scales in China using VEGETATION Sensor Data", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, pp. 3009-3022.
- [25] Domiri, D.D., Adhyani, N.L., dan Nugraheni, S., (2005). "Model Pertumbuhan Tanaman Padi Menggunakan Data MODIS untuk Pendugaan Umur Padi Sawah", *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan MAPIN XIV*, Surabaya, 14-15 September 2005.
- [26] Hermanto, (2006). "Padi Ciherang Makin Populer", *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, Vol. 25, No. 2.
- [27] Field, C.B., Randerson, J.T., dan Malmstrom, C.M. 1995. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing, *Rem. Sens. Environ.*, Vol. 51: 74-88.
- [28] Liang, S., (2000). "Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I Algorithms", *Remote Sensing of Environment*, Vo. 76, pp. 213-238.