ESTIMASI BIOMASSA TEGAKAN HUTAN HUJAN TROPIS DI BUKIT MANDIANGIN MENGGUNAKAN METODE INTERPOLASI SPASIAL

Estimation of Tropical Rain Forest Stand Biomass at Mandiangin Hill Using Spatial Interpolation Methods

Mufidah Asy'ari, Syam'ani, dan Trisnu Satriadi
Fakultas Kehutanan Universitas Lambung Mangkurat

ABSTRACT. Biomass or carbon stock is one indicator of the sustainability of forest stands. Stable and proportional quantity of biomass indicates forest sustainability is in good condition. In order to maintain forest sustainability, related parties are required to always be active in forest monitoring, one of which is the condition of standing biomass. This study aims to examine a number of spatial interpolation methods to estimate the biomass distribution of tropical rainforest stands in Mandiangin Hill, South Kalimantan. Spatial interpolation aims to overcome the limitations of sample data in the field in large forest areas. Several spatial interpolation methods are implemented in this study, namely IDW, GPI, RBF, LPI, and Kriging. A total of 50 sample plots were set up in the field to measure forest stand biomass. Even when the semivariogram was analyzed, only 40 of the sample points could be included in the analysis. Where 30 points are used as training samples for spatial interpolation input and 10 points are used as testing samples to validate the interpolation results. The validation of the spatial interpolation results was carried out using MAPE and RMSE. The research results show that IDW with a power value of 2 is the most optimal spatial interpolation method for estimating forest stand biomass. Besides having relatively small MAPE and RMSE, IDW is also more practical than other spatial interpolation methods. Other methods that can be used as alternatives to IDW for forest stand biomass are RBF with Completely Regularized Spline kernel function and Empirical Bayesian Kriging with Linear kernel function. Furthermore, to obtain more accurate spatial interpolation results, the sample points must be made more numerous and spread more evenly within the region to be estimated.

Keywords: *Biomass; Forest Stand, Mandiangin, Spatial interpolation, Geostatistic*

ABSTRAK. Biomassa atau cadangan karbon merupakan salah satu indikator kelestarian tegakan hutan. Kuantitas biomassa yang stabil dan proporsional mengindikasikan kelestarian hutan berada dalam kondisi yang baik. Dalam rangka menjaga kelestarian hutan, pihak-pihak terkait dituntut untuk selalu aktif di dalam pemantauan hutan, salah satunya adalah kondisi biomassa tegakan. Penelitian ini bertujuan untuk menguji sejumlah metode interpolasi spasial untuk mengestimasi distribusi biomassa tegakan hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin, Kalimantan Selatan. Interpolasi spasial bertujuan untuk mengatasi keterbatasan data sampel di lapangan pada wilayah hutan yang luas. Beberapa metode interpolasi spasial diimplementasikan didalam penelitian ini, yaitu IDW, GPI, RBF, LPI, dan Kriging. Sebanyak 50 plot sampel dibuat di lapangan untuk mengukur biomassa tegakan hutan. Meskipun ketika dianalisis semivariogram, hanya 40 titik sampel diantaranya yang dapat diikutsertakan didalam analisis, sebanyak 30 titik dijadikan sebagai training samples untuk input interpolasi spasial dan 10 titik dijadikan sebagai testing samples untuk validasi hasil interpolasi. Validasi hasil interpolasi spasial dilakukan menggunakan MAPE dan RMSE. Hasil riset menunjukkan bahwa IDW dengan nilai power 2 merupakan metode interpolasi spasial yang paling optimal untuk estimasi biomassa tegakan hutan. Disamping memiliki MAPE dan RMSE yang cukup kecil, IDW juga lebih praktis dibandingkan dengan metode-metode interpolas spasial lainnya. Metode lainnya yang dapat dijadikan sebagai alternatif selain IDW untuk biomassa tegakan hutan adalah RBF dengan fungsi inti Completely Regularized Spline dan Empirical Bayesian Kriging dengan fungsi inti Linear. Lebih jauh, untuk mendapatkan hasil interpolasi spasial yang lebih akurat, titik-titik sampel harus dibuat lebih banyak dan tersebar lebih merata di dalam wilayah yang akan diestimasi.

Kata kunci: Biomassa; *Tegakan hutan; Mandiangin, Interpolasi spasial, Geostatistik*

Penulis untuk korespondensi, surel: mufie.ikhsan@ulm.ac.id

PENDAHULUAN

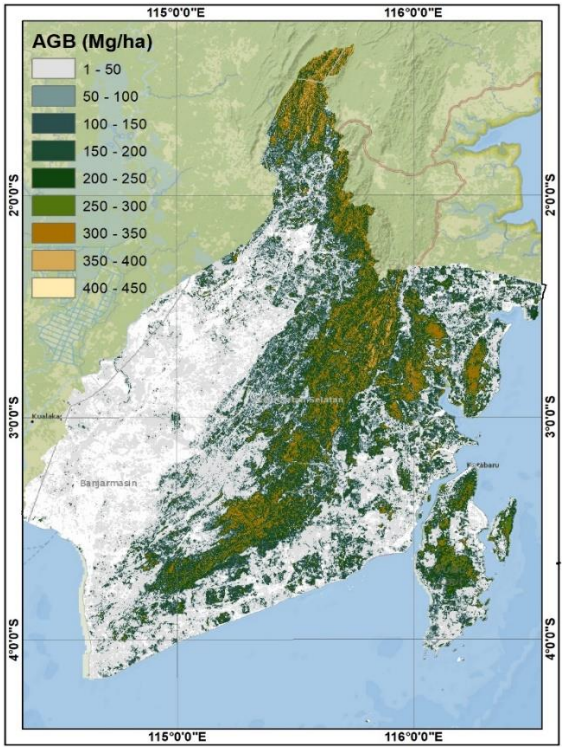
Food and Agriculture Organization (FAO) and United Nation Environment Programme (UNEP) (2020) melaporkan bahwa total luas hutan global adalah 4,06 milyar hektar, atau meliputi sekitar 30,8% dari total luas daratan bumi. Indonesia sendiri pada tahun 2019 memiliki luas hutan 94,1 juta hektar, atau 50,1% dari luas daratan Indonesia (Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia, 2020). Melihat data ini, sepertinya kondisi hutan Indonesia secara luasan masih cukup aman. Akan tetapi, secara distribusi dan kondisi biofisik tentu saja masih memerlukan evaluasi yang lebih komprehensif. Terlebih lagi, berdasarkan data deforestasi dari tahun 2018 sampai 2019, Indonesia kehilangan 460.000 hektar hutan dalam satu tahun tersebut (Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia, 2020), 20.000 hektar di antaranya merupakan kehilangan hutan primer (Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia, 2020). Lebih jauh, hasil inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) nasional pada tahun 2019, sektor kehutanan dan kebakaran lahan gambut memberikan kontribusi yang terbesar terhadap emisi gas karbondioksida, yaitu sebesar 924.853 Giga gram CO2 ekivalen (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021). Hal ini tidak terlepas dari kenyataan bahwa hutan tropis menyimpan sekitar 50% total biomassa tanaman di bumi (Chapin et al., 2011).

Biomassa atau cadangan karbon merupakan salah satu indikator kelestarian tegakan hutan (Robertson et al. (eds.), 2011). Kuantitas biomassa yang stabil dan proporsional mengindikasikan kelestarian hutan berada dalam kondisi yang baik. Sebaliknya, biomassa tegakan yang mengalami penurunan kuantitas biomassa atau bahkan kehilangan kuantitas biomassa sama sekali, menandakan kelestarian hutan yang sedang terganggu atau bahkan rusak sama sekali. Kelestarian hutan dapat terganggu oleh faktor-faktor alam, seperti bencana banjir atau tanah longsor, atau pun akibat tindakan-tindakan manusia seperti pembakaran atau pembalakan hutan. Penurunan kuantitas atau kehilangan biomassa tegakan hutan sama dengan kehilangan cadangan karbon (carbon stock) di alam. Keadaan seperti ini pada umumnya ditafsirkan sebagai emisi karbon. Sebab dalam teknik kalkulasi emisi karbon, emisi karbon yang dimaksud tidak hanya berwujud terlepasnya gas karbondioksida ke udara sebagaimana proses kebakaran hutan dan lahan, akan tetapi berkurangnya cadangan karbon di dalam vegetasi hidup dan berkurangnya kemampuan hutan dalam menyerap gas karbondioksida juga dapat dikuantitatifkan sebagai emisi karbon. Dan tentu saja, emisi karbon dalam jumlah besar akan berdampak buruk bagi lingkungan, tidak hanya lokal tetapi juga global.

Tidak dapat dipungkiri bahwa dari tahun ke tahun seiring dengan pertumbuhan penduduk dunia, maka keperluan akan lahan menjadi meningkat drastis secara luasan. Baik untuk lahan permukiman, infrastruktur perkotaan, lahan industri, lahan pertanian dan perkebunan, dan sebagainya. Hal yang menjadi permasalahan adalah, keperluan akan lahan-lahan yang luas tersebut sebagiannya dipenuhi dengan jalan mengkonversi lahan hutan. Tentu saja, proses konversi lahan hutan ini akan mereduksi biomassa tegakan hutan atau bahkan menghilangkannya sama sekali. Di lain pihak, pemanfaatan kayu baik untuk pertukangan, peralatan rumah tangga, pulp dan kertas, tekstil, atau pun yang lainnya, secara langsung juga berkontribusi dalam mengurangi biomassa tegakan hutan. Fakta-fakta seperti ini tentu saja menuntut pihak-pihak terkait untuk selalu aktif dalam usaha-usaha pemantauan lingkungan hutan, khususnya kondisi biomassa tegakan hutan. Hal ini bertujuan agar proses-proses konversi lahan hutan dan pemanfaatan vegetasi tegakan hutan dapat berlangsung secara optimal dan terkendali. Terlebih lagi, pengetahuan yang akurat tentang kuantitas dan distribusi spasial biomassa merupakan kunci untuk memahami siklus karbon (Houghton, 2005) dan studi iklim (Zhang et al., 2019). Tentu saja, dengan kondisi wilayah hutan yang sangat luas, maka pemantauan biomassa tegakan hutan secara komprehensif atau sensus pada keseluruhan vegetasi yang ada di dalam hutan sangat tidak memungkinkan untuk dilakukan.

Metode yang paling efektif dan efisien untuk mengestimasi biomassa tegakan hutan adalah dengan menggunakan teknologi geospasial. Baik teknologi penginderaan jauh, teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG), atau kombinasi keduanya. Metode-metode untuk estimasi biomassa tegakan hutan berbasis teknologi penginderaan jauh sudah cukup banyak dikembangkan. Baik

yang berbasis citra optik, citra Radio Detection and Ranging (Radar), citra Unmanned Aerial Vehicle (UAV), atau citra Ligth Detection and Ranging (Lidar). Bahkan informasi geospasial biomassa vegetasi yang diekstrak dari citra satelit sudah tersedia secara gratis di internet. Sebagaimana Above-Ground Biomass (AGB) Kalimantan Selatan 2018 pada Gambar 1, yang merupakan data biomassa vegetasi di atas permukaan tanah yang disediakan oleh Badan Antariksa Eropa (European Space Agency/ESA) (Santoro and Cartus, 2019). Meskipun data geospasial AGB tersebut memiliki resolusi spasial yang rendah, yaitu 100 meter (Santoro and Cartus, 2019). Sehingga hanya sesuai untuk pemetaan biomassa pada skala provinsi, dan kurang mumpuni untuk pemantauan biomassa tegakan hutan pada skala yang lebih detail. Misalnya pada level kabupaten/kota, atau bahkan hingga kecamatan dan desa.



Gambar 1. Above-Ground Biomass (AGB) Kalimantan Selatan 2018
(Sumber: Santoro and Cartus, 2019)

Untuk proses estimasi biomassa tegakan hutan dengan menggunakan teknologi SIG, salah satunya dapat diimplementasikan dengan interpolasi spasial (Kumar and Mutanga, 2017; Sun and Liu, 2020). Interpolasi spasial (spatial interpolation) atau kadang disebut juga prediksi spasial (spatial prediction) (Hengl, 2009) merupakan metode untuk mengestimasi suatu fenomena geospasial kuantitatif yang nilainya tidak diketahui pada suatu lokasi di atas permukaan bumi, berdasarkan nilai-nilai sampel yang sudah diketahui di sekitar lokasi yang nilainya diestimasi tersebut (Sales et al., 2007). Interpolasi spasial berfungsi untuk mengatasi keterbatasan jumlah data. Tentu saja data yang dimaksud adalah data spasial atau data yang memiliki atribut keruangan. Baik data spasial yang diekstrak dari laboratorium, terlebih lagi data yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan. Seperti halnya stasiun atau alat pengukur curah hujan milik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang terbatas jumlah dan sebarannya. Akan tetapi, untuk alasan tertentu terkadang kita memerlukan sebaran informasi geospasial curah hujan secara komprehensif di seluruh wilayah, misalnya satu kabupaten. Pada kasus yang seperti ini lah metode interpolasi spasial sangat diperlukan. Sebagaimana stasiun pengukur curah hujan yang keberadaannya sangat terbatas di atas permukaan bumi, untuk kasus biomassa tegakan hutan, tentu saja juga akan sangat sulit bagi kita jika harus mengukur biomassa seluruh pohon yang ada di dalam tegakan hutan. Dengan kata lain, pengukuran biomassa tegakan hutan yang ada di lapangan hanya dapat dilakukan dengan metode sampling. Selanjutnya, informasi geospasial biomassa keseluruhan tegakan hutan dapat diestimasi dengan interpolasi spasial.

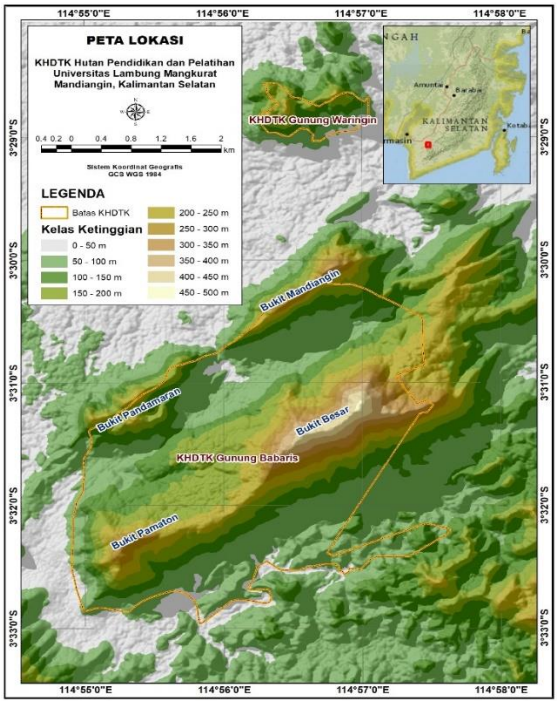
Terdapat sejumlah penelitian-penelitian terdahulu yang memanfaatkan berbagai teknik interpolasi spasial untuk mengestimasi biomassa tegakan hutan, atau pun informasi biofisik tegakan hutan lainnya. Baik dengan menggunakan metode interpolasi spasial murni, maupun kombinasi antara interpolasi spasial dan citra penginderaan jauh. Untuk estimasi biomassa tegakan hutan menggunakan metode interpolasi spasial murni sudah diimplementasikan oleh Roa-Ureta and Niklitschek (2007), Sales et al. (2007), Mardiatmoko (2012), Jaya (2014), Scolforo et al. (2016), dan Dai et al. (2021). Sementara untuk estimasi biomassa tegakan hutan berbasis metode kombinasi antara interpolasi spasial dan citra penginderaan jauh sudah diimplementasikan oleh Benítez et al. (2016), Babcock et al. (2018), Dai et al. (2018), Li et al. (2020), Shen et al. (2020), Su et al. (2020), dan Zhu et al. (2020). Tentu saja

masing-masing metode memberikan hasil yang berbeda-beda. Bahkan metode interpolasi spasial yang sama sekali pun ketika dihadapkan pada wilayah dan kondisi yang berbeda, pada akhirnya dapat memberikan hasil yang berbeda juga.

Faktanya, sampai dengan saat ini sudah banyak dikembangkan metode-metode interpolasi spasial, seperti Inverse Distance Weighting (IDW), Kriging, Spline, dan sebagainya (Hengl, 2009). Bahkan masing-masing metode interpolasi spasial masih dapat dimodifikasi sejumlah parameternya, seperti fungsi inti (kernel function)-nya. Dengan banyaknya metode-metode dan teknik-teknik interpolasi spasial yang sudah tersedia, akan berpotensi menimbulkan kebingungan bagi para ahli dan praktisi kehutanan untuk memilih metode atau teknik interpolasi yang mana yang akan diimplementasikan untuk memetakan biomassa tegakan hutan. Tentu saja, metode atau teknik yang akan diterapkan nantinya harus lah sudah teruji secara ilmiah kemampuannya di dalam mengekstrak informasi geospasial biomassa tegakan hutan. Penelitian ini bertujuan untuk menguji sejumlah metode interpolasi spasial untuk mengestimasi distribusi biomassa tegakan hutan hujan tropis di Bukit Mandiangin, Kalimantan Selatan. Berdasarkan hasil penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran praktis tentang kemampuan berbagai metode interpolasi geospasial didalam mengekstrak informasi biofisik tegakan hutan, seperti halnya biomassa.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di sebagian wilayah, tepatnya di bagian Timur Bukit Mandiangin. Bagian Timur Bukit Mandiangin ini termasuk ke dalam willayah pengelolaan Kawasan Hutan dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Hutan Pendidikan dan Pelatihan Universitas Lambung Mangkurat. Lokasi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Berbagai metode interpolasi spasial akan diimplementasikan di dalam penelitian ini. Baik metode deterministik maupun metode prediktif. Untuk metode deterministik metode yang akan digunakan adalah Inverse Distance Weighting (IDW), Global Polynomial Interpolation (GPI), Radial Basis Function (RBF), dan Local Polynomial Interpolation (LPI). Sementara untuk metode prediktif, atau dikenal juga sebagai interpolasi geospasial, metode yang digunakan tentu saja adalah Kriging. Masing-masing metode interpolasi, sejumlah parameter yang memungkinkan untuk diatur atau dirubah maka akan diatur atau diujicoba dengan berbagai opsi. Misalnya fungsi inti atau parameter-parameter angka tertentu, seperti power (nilai p) pada IDW. Hal ini bertujuan untuk menemukan teknik-teknik interpolasi yang paling optimum untuk mengestimasi biomassa tegakan hutan.

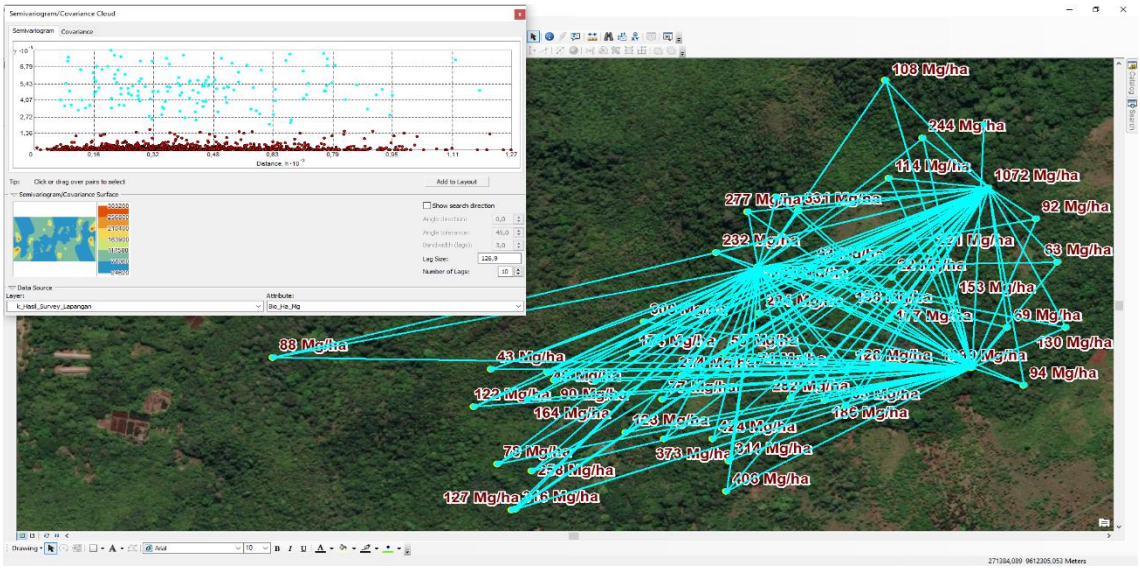
Untuk proses estimasi dan validasi hasil estimasi biomassa tegakan, informasi biomassa diukur secara langsung di lapangan dengan menggunakan sejumlah plot ukur. Total ada 50 plot ukur yang diambil di lapangan, dengan ukuran plot 10 meter x 10 meter dan mengikuti orientasi Selatan-Utara. Distribusi plot-plot ukur di lapangan dialokasikan secara stratified random sampling mengikuti kerapatan vegetasi relative, dimana informasi kerapatan vegetasi relatif tersebut diinterpretasi secara

visual dari Google Map. Setiap plot ukur, masing-masing diukur diameter setinggi dada atau DBH tanaman berkayu yang memiliki diameter 10 cm ke atas. Selanjutnya, biomassa individu total per pohon dalam satuan kilogram (kg) dihitung dengan menggunakan persamaan alometri pada rumus 1 (Djomo and Chimi, 2017).

$$Biomassa\ pohon\ (kg) = exp(-1{,}475 + 2{,}153ln(DBH)) \quad (1)$$

Langkah selanjutnya, seluruh biomassa individu pohon di dalam masing-masing plot dijumlahkan, untuk mendapatkan informasi biomassa total per plot. Informasi biomassa total per plot kemudian dikonversi menjadi biomassa dalam satuan Mg/ha (Megagram atau ton per hektare) dengan menggunakan rumus 2.

$$Biomassa\ (Mg/ha) = Biomassa(kg/plot)x\frac{10.000\ m^2/100\ m^2}{1.000\ kg} \quad (2)$$



Gambar 3. Semivariogram Data Hasil Survey Lapangan

Hasil kalkulasi biomassa tegakan per hektare pada masing-masing plot akan digunakan sebagai data input didalam proses interpolasi spasial dan validasi hasil interpolasi spasial. Keseluruhan proses interpolasi spasial dan validasi hasil estimasi biomassa tegakan dilakukan menggunakan perangkat lunak ESRI ArcGIS. Tidak semua titik-titik hasil survey lapangan akan dijadikan input di dalam proses interpolasi spasial. Sebelumnya, akan dilihat terlebih dahulu sebaran data termasuk kemungkinan ditemukannya data yang eksrtim atau pencilan. Data ekstrim adalah data hasil kalkulasi biomassa yang terlalu tinggi atau terlalu rendah, sehingga jauh berbeda dari kebanyakan data lainnya, terutama untuk plot-plot yang saling berdekatan koordinatnya. Teknik untuk menemukan data yang ekstrim atau pencilan adalah dengan menggunakan semivariogram, yang dijalankan menggunakan Geostatistical Analyst ArcGIS.

Gambar 3 menunjukkan hasil analisis semivariogram data biomassa tegakan dalam satuan M/ha. Semivariogram dihitung berpasangan untuk semua data. Grafik semivariogram, sumbu x merupakan jarak antar titik-titik survey di lapangan, sementara sumbu y merupakan nilai semivariogram. Semakin besar nilai semivariogram menunjukkan bahwa data pada titik tersebut berbeda jauh dengan data pada titik lainnya yang berpasangan. Data dikatakan ekstrim apabila secara spasial dua titik saling berdekatan, tetapi perbedaan nilainya (yang dalam hal ini adalah biomassa tegakan) terpaut cukup jauh. Dengan kata lain, pada grafik semivariogram Gambar 3, data yang berada pada sisi kiri atas adalah merupakan data yang ekstrim. Sebab secara spasial lokasinya berdekatan tetapi kuantitas biomassanya berbeda jauh. Data yang ekstrim ini berpotensi akan menurunkan akurasi hasil interpolasi spasial, sehingga idealnya data ini akan dikeluarkan dari input data interpolasi spasial.

Berdasarkan hasil analisis semivariogram, ditemukan 10 buah titik sampel yang nilainya cukup ekstrim. Dimana

kesepuluh titik ini memiliki estimasi biomassa tegakan berbeda cukup jauh dengan titik-titik lainnya. Selanjutnya kesepuluh titik ini dihapus dan tidak diikutsertakan di dalam proses interpolasi spasial. Sehingga dari 50 titik survey lapangan, tersisa 40 titik yang dilibatkan di dalam analisis. Dari 40 plot ukur lapangan yang tersisa tersebut, 30 plot atau 75% digunakan sebagai training samples untuk interpolasi spasial, sementara sisanya yang 10 plot atau 25% digunakan untuk testing samples atau validasi hasil estimasi biomassa menggunakan interpolasi spasial. Pemisahan antara training samples dan testing samples dilakukan secara simple random sampling menggunakan tool Geostatistical Analyst ArcGIS. Hasil estimasi biomassa tegakan dari interpolasi spasial selanjutnya dibandingkan dengan informasi biomassa tegakan faktual dari masing-masing plot testing area. Metode perbandingan atau uji akurasi yang digunakan adalah Mean Absolute Percentage Error (MAPE) dan Root Mean Square Error (RMSE). Yang diformulasikan masing-masing pada rumus 3 dan rumus 4.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i - x_i|}{x_i}}{n} x100\% \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Keterangan:

xi: Data biomassa tegakan aktual pada plot yang ke-i dari testing area

yi: Data biomassa tegakan pada plot testing area yang ke-i hasil estimasi interpolasi spasial

n : Jumlah plot testing area (10 plot)

Tahap terakhir, metode interpolasi spasial yang paling akurat akan ditentukan berdasarkan nilai MAPE dan RMSE masing-masing. Metode interpolasi spasial yang paling akurat adalah metode yang menghasilkan nilai MAPE dan RMSE yang paling kecil atau mendekati nol. Nilai MAPE dan RMSE yang sama dengan nol berarti akurasinya 100%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara teoritis, interpolasi spasial dibagi menjadi dua kelompok. Yaitu metode deterministik atau dikenal juga sebagai metode empirik, dan metode prediktif atau dikenal juga sebagai metode probabilistik (Hengl, 2009). Interpolasi spasial dengan metode prediktif sering dikenal dengan istilah interpolasi geostatistik. Oleh sebab itu, di dalam penyajian hasil penelitian ini, khususnya antara Tabel 1 dan Tabel 2, juga dibedakan atau dipisahkan antara interpolasi spasial dan interpolasi geostatistik. Meskipun pada dasarnya interpolasi geostatistik termasuk ke dalam interpolasi spasial juga, dan satu-satunya metode interpolasi geostatistik adalah Kriging. Sementara metode-metode interpolasi lainnya yang diuji di dalam penelitian ini bukan termasuk interpolasi geostatistik. Sebenarnya, masih ada beberapa metode interpolasi spasial yang tidak diuji di dalam penelitian ini, antara lain adalah Spline, Natural Neighbor, Trend, Topo to Raster, dan sebagainya. Metode-metode ini tidak diuji di dalam penelitian ini salah satu alasannya adalah karena ketidakpraktisannya di dalam uji akurasi atau validasi model, khususnya ketika kita menggunakan perangkat lunak ArcGIS, sebagaimana yang digunakan didalam penelitian ini.

Tabel 1. Nilai-nilai MAPE dan RMSE Interpolasi Spasial

Interpolasi Spasial	Pengaturan		MAPE	RMSE
	Parameter	Fungsi Inti		
IDW	Power (1)	-	34,20%	42,51
	Power (2)*	-	26,21%	36,55
	Power (3)	-	28,33%	47,64
	Power (3,29)*	-	28,97%	50,28
	Power (4)	-	30,38%	55,04
	Power (5)	-	32,42%	58,82
	Power (6)	-	33,78%	60,73
	Power (7)	-	34,62%	61,75
	Power (8)	-	35,20%	62,36
	Power (9)	-	35,64%	62,78
	Power (10)	-	36,00%	63,09

Interpolasi Spasial	Pengaturan		MAPE	RMSE
	Parameter	Fungsi Inti		
GPI	Order (1)	-	73,04%	91,45
	Order (2)*	-	16,07%	26,72
	Order (3)	-	58,89%	79,80
	Order (4)	-	35,74%	47,18
	Order (5)	-	497,10%	956,38
	Order (6)	-	639,17%	904,86
RBF	Default*	Completely Regularized Spline	32,37%	39,56
	Default	Spline with Tension	33,98%	41,44
	Default	Multiquadric	29,31%	51,43
	Default	Inverse Multiquadric	58,41%	74,58
	Default	Thin Plate Spline	57,80%	121,38
LPI	Default*	Exponential	24,60%	31,66
	Default	Polynomial5	34,19%	44,87
	Default	Gaussian	31,48%	39,98
	Default	Epanechnikov	35,74%	47,18
	Default	Quartic	34,40%	45,04
	Default	Constant	40,50%	50,40

Keterangan: *Model yang direkomendasikan untuk masing-masing metode interpolasi spasial

Kemungkinan, di antara semua metode interpolasi spasial, IDW merupakan metode yang relatif paling popular. Bahkan di dalam pemetaan sediaan tegakan hutan pada Inventarisasi Hutan Menyeluruh Berkala (IHMB), proses estimasi potensi tegakannya menggunakan IDW. Tentu saja bukan tanpa alasan mengapa IDW bisa begitu popular, khususnya untuk keperluan estimasi potensi hutan. Beberapa hasil riset menunjukkan bahwa IDW cukup akurat, khususnya ketika mengestimasi biomassa tegakan hutan. Hasil penelitian Jaya (2014) menunjukkan bahwa IDW lebih akurat dibandingkan dengan Kriging ketika memetakan Above-Ground Biomass. Selain itu, formula IDW merupakan yang paling sederhana di antara seluruh metode interpolasi spasial. Formula yang sederhana seperti ini memiliki konsekuensi efisien dalam proses komputasi, khususnya ketika jumlah titik sampel sangat banyak atau wilayah yang diinterpolasi cukup luas. Formula IDW yang sederhana juga menyebabkan prasyarat untuk menggunakan metode interpolasi spasial ini tidak terlalu rumit. Maksudnya seorang analis atau operator yang akan menggunakan IDW tidak terlalu dituntut untuk mengerti lebih jauh tentang statistik sebagaimana ketika menggunakan metode RBF, LPI, atau Kriging.

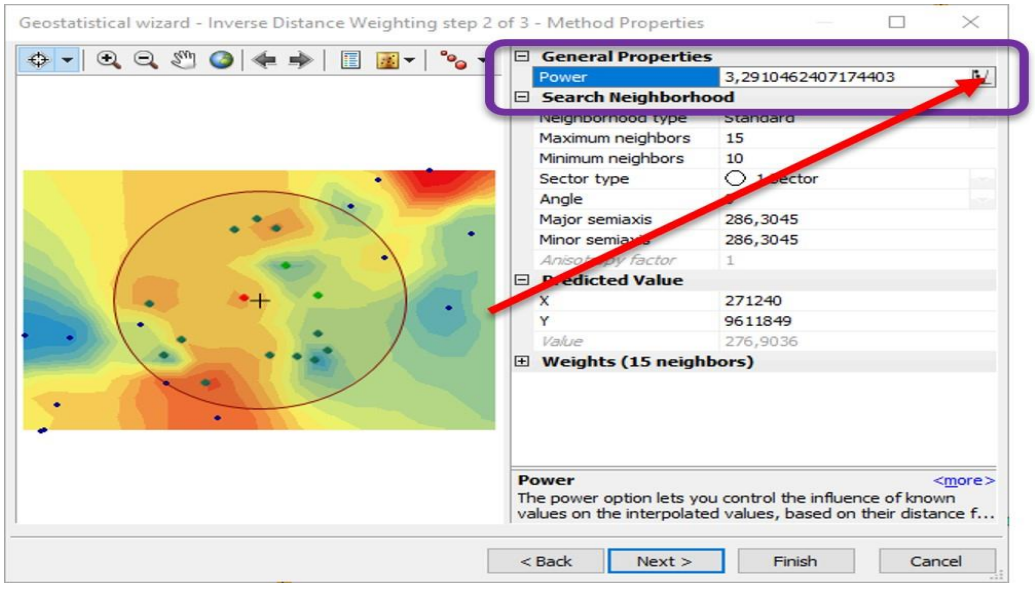
Tabel 2. Nilai-nilai MAPE dan RMSE Interpolasi Geostatistik

Interpolasi Geostatistik	Pengaturan		MAPE	RMSE
	Tipe	Fungsi Inti/ Semivariogram		
Kriging	Ordinary*	-	24,86%	40,08
	Universal	Exponential*	24,86%	40,08
		Polynomial5	56,84%	74,15
		Gaussian	56,84%	74,15
		Epanechnikov	56,84%	74,15
		Quartic	56,84%	74,15
		Constant*	24,85%	40,85
	Empirical Bayesian	Linear*	29,13%	36,92
		Power	31,66%	39,45
		Thin Plate Spline	31,69%	43,49

Keterangan: *Model yang direkomendasikan untuk masing-masing metode interpolasi geostatistik

Secara keseluruhan, sebagaimana terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2, untuk metode interpolasi spasial yang cukup unggul adalah IDW dengan nilai power 2, IDW dengan nilai power teroptimasi (3,29), GPI dengan nilai oder 2, RBF dengan fungsi inti Completely Regularized Spline, dan LPI dengan fungsi inti Exponential. Sementara untuk metode interpolasi geostatistik, metode yang cukup akurat adalah Ordinary Kriging, Universal Kriging dengan fungsi inti Exponential, dan Empirical Bayesian Kriging dengan fungsi inti Linear. Semua output metode interpolasi yang direkomendasikan berdasarkan hasil riset ini dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa beberapa hasil estimasi sebaran biomassa tegakan memberikan kenampakan hasil yang terlihat tidak masuk akal. Yaitu pada metode interpolasi geospasial Kriging, dimana hasil estimasi sebaran biomassa memberikan kenampakan yang lurus. Tentu saja, fenomena sebaran biomassa seperti ini tidak akan ditemukan di hutan alam, terkecuali di hutan tersebut ada jalan raya, jaringan irigasi, ataupun tebing terjal (dinding bukit batu) yang lurus, yang dapat memisahkan tegakan hutan secara lurus.

Faktanya, objek-objek seperti jalan raya, jaringan irigasi, atau pun tebing terjal yang lurus, tidak ditemukan di Bukit Mandiangin. Fenomena estimasi yang tersebar lurus sebagaimana terlihat pada Gambar 5 dapat terjadi karena titik-titik sampel pengukuran lapangan tidak tersebar merata pada keseluruhan wilayah Bukit Mandiangin. Sehingga wilayah-wilayah yang biomassanya terpetakan berbentuk lurus tersebut pada dasarnya adalah hasil ekstrapolasi, bukan interpolasi. Berdasarka fenomena ini dapat kita perkirakan bahwa untuk menghasilkan output interpolasi spasial yang optimal, sebaiknya titik-titik sampel harus tersebar merata di seluruh wilayah yang akan dipetakan. Memang proses pekerjaan akan menjadi tidak efisien, dan hal ini menjadi kekurangan dari estimasi biomassa tegakan hutan berbasis metode interpolasi spasial murni, tanpa didukung teknologi penginderaan jauh. Akan tetapi, hasil penelitian ini sudah cukup memberikan gambaran praktis, metode-metode interpolasi spasial yang mana yang akan memberikan hasil estimasi biomassa tegakan yang paling akurat. Sehingga jika nantinya kita akan mengkombinasikan antara metode interpolasi spasial dengan teknologi penginderaan jauh dalam proses estimasi biomassa tegakan hutan, maka kita sudah memiliki informasi metode-metode interpolasi spasial apa yang harus dipilih dari hasil riset ini.

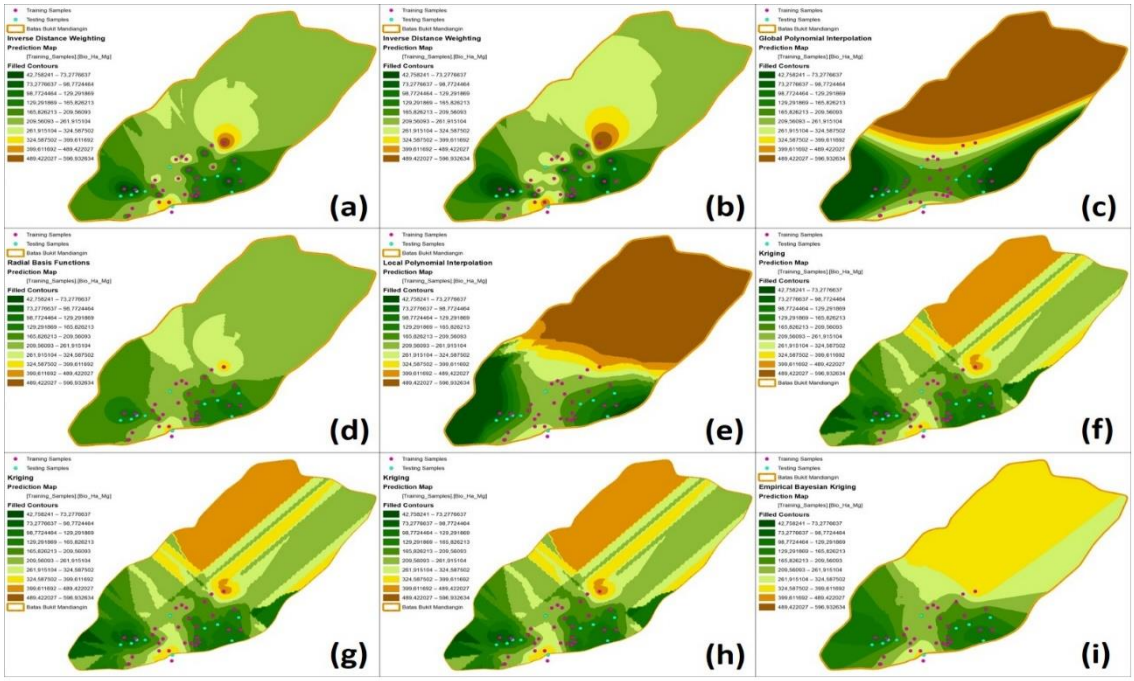


Gambar 4. Optimasi power IDW menggunakan tool Geostatistical Analyst ArcGIS

Masing-masing metode interpolasi spasial dan interpolasi geostatistik memiliki keleluasaan untuk disesuaikan beberapa parameternya, seperti nilai power, nilai order, atau pun fungsi inti. Hanya saja tidak mungkin jika harus menguji seluruh pengeturan parameter dalam satu riset. Untuk menguji semua kombinasi parameter,

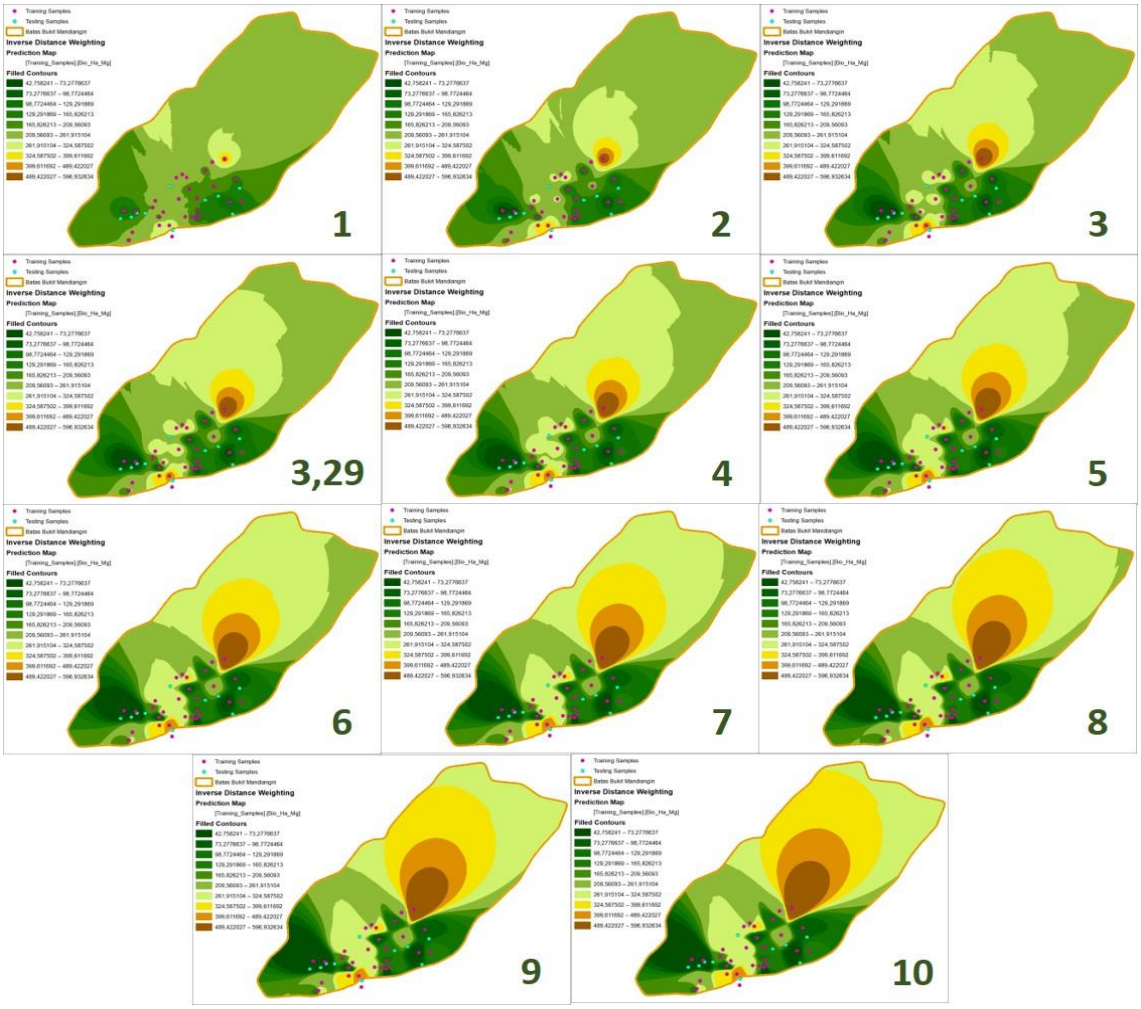
akan diperlukan sebuah riset yang sangat Panjang. Khusus untuk IDW, selain parameter nilai power diatur secara manual dari 1 sampai 10, didalam riset ini parameter power IDW juga ditentukan nilainya yang paling optimal secara otomatis menggunakan tool Geostatistical Analyst ArcGIS, sebagaimana terlihat pada Gambar 4. Berdasarkan hasil proses optimasi power IDW secara otomatis ini, diperolah nilai power 3,2910462407174403. Akan tetapi, meskipun sudah dioptimasi, akurasi IDW dengan parameter power teroptimasi tersebut ternyata akurasinya belum dapat mengungguli IDW dengan power 2, sehingga jika nantinya kita akan memanfaatkan fasilitas optimasi power IDW ini di kemudian hari, kita tetap harus ekstra hati-hati, dan tentu saja akan lebih baik jika setiap kali kita melalukan proses interpolasi spasial, dilakukan validasi atau uji akurasi sesudahnya.

Jika dilihat berdasarkan Tabel 1, secara keseluruhan GPI dengan order 2 merupakan metode interpolasi spasial yang terakurat dalam mengestimasi biomassa tegakan hutan di Bukit Mandiangin. Terlihat bahwa kesalahannya (nilai MAPE) hanya sekitar 16%, yang berarti akurasinya hamper 84%. Sementara nilai RMSE atau rata-rata akar kuadrat perbedaan antara biomassa hasil estimasi dan biomassa hasil pengukuran lapangannya adalah sekitar 26,7 Mg/ha. Akan tetapi, jika dilihat secara visual kenampakan hasil estimasi sebaran biomassa tegakan pada Gambar 5 (c), kita dapat melihat bahwa sebaran hasil interpolasinya sangat tidak natural untuk kasus sebaran biofisik tegakan hutan seperti biomssa. Kalau untuk interpolasi spasial fenomena cuaca seperti temperatur udara hal seperti ini mungkin cukup natural. Sehingga hasil uji akurasi yang tinggi pada GPI dengan order 2 sebagaimana terlihat pada Tabel 1, lebih mirip dengan hasil yang terjadi secara kebetulan. Meskipun pernyataan ini masih perlu untuk diuji kembali pada kasus-kasus atau data yang berbeda, atau dengan sebaran titik-titik sampel yang lebih merata.



Gambar 5. Estimasi sebaran biomassa tegakan hutan Bukit Mandiangin menggunakan beberapa model interpolasi spasial yang direkomendasikan: a) IDW dengan power 2; b) IDW dengann oprimized power; c) GPI dengan order 2; d) RBF dengan kernel function Completely Regularized Spline; e) LPI dengan kernel function Exponential; f) Ordinary Kriging; g) Universal Kriging dengan kernel function Exponential; h) Universal Kriging dengan kernel function Constant; dan i) Empirical Bayesian Kriging dengan kernel function Linear.

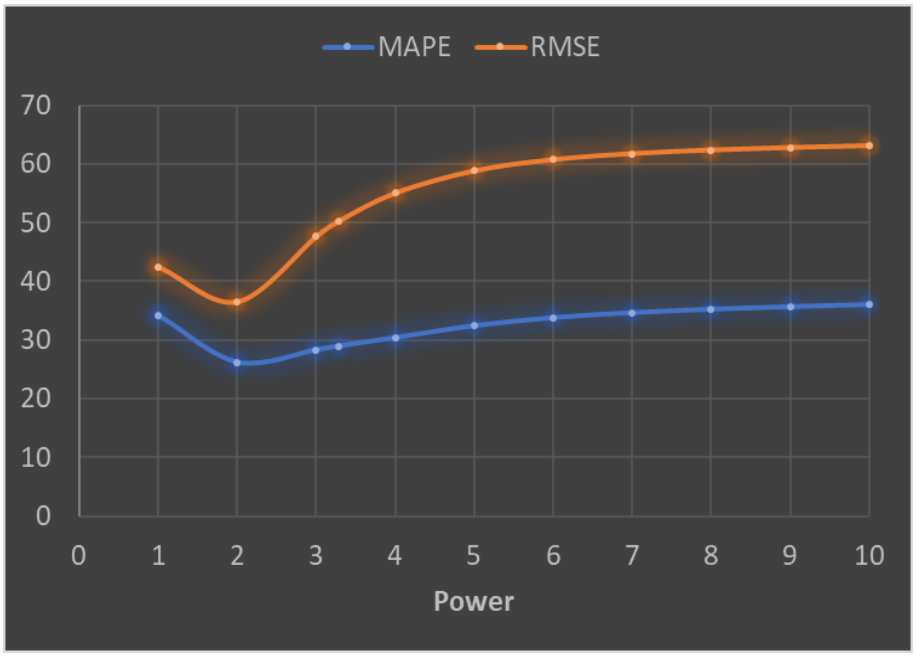
Metode RBF dan LPI cukup bersaing akurasinya dengan metode IDW. Kecuali kedua metode ini memiliki fungsi inti sebagaimana metode interpolasi geostatistik. Sehingga pengguna yang akan mengimplementasikan RBF, LPI, dan Kriging, sedikit banyaknya harus mengerti tentang statistik. Minimal fungsi-fungsi seperti Exponential, Gaussian, Spline, dan sebagainya. Lebih jauh, untuk metode LPI, sesuai dengan namanya (lokal) metode ini seperti kesulitan di dalam melakukan ekstrapolasi atau mengestimasi nilai di luar wilayah-wilayah sampel di lapangan. Sehingga LPI lebih memerlukan titik-titik sampel yang tersebar merata dibandingkan dengan IDW dan Kriging. Kecuali LPI lebih baik dibanding Kriging didalam memberikan hasil ekstrapolasi yang lebih natural, tidak lurus sebagaimana Kriging. Khusus untuk interpolasi geostatistik, yaitu Kriging, sebenarnya ada beberapa tahapan yang harus dilakukan sebelum melakukan proses interpolasi, misalnya mengamati trend atau kecenderungan data, normalitas data, dan sebagainya. Ketika ditemukan trend secara spasial di dalam data, maka sebaiknya trend data ini dihilangkan terlebih dahulu sebelum interpolasi menggunakan Kriging. Dan ketika data tidak terdistribusi normal, sebaiknya dilakukan transformasi data sebelum proses interpolasi geostatistik. Dimana hal-hal ini tidak diimplementasikan di dalam penelitian ini. Untuk meningkatkan akurasi hasil estimasi interpolasi menggunakan Kriging, sebaiknya tahapan-tahapan pra-interpolasi ini dijalankan terlebih dahulu.



Gambar 6. Kenampakan Estimasi Biomassa Tegakan Hutan Bukit Mandiangin menggunakan Metode IDW dengan berbagai Opsi Power (dari 1 sampai 10)

Sebagai metode yang tergolong cukup mumpuni, IDW menjadi semacam fokus atensi kami di dalam riset ini. Gambar 6 terlihat luaran hasil estimasi biomassa

tegakan hutan tropis Bukit Mandiangin, dengan menggunakan IDW untuk semua nilai power yang diuji didalam penelitian ini. Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa, semakin tinggi nilai power, maka pengaruh titik-titik yang memiliki nilai biomassa yang lebih tinggi dibanding titik-titik di sekitarnya akan semakin mendominasi. Hal ini dapat dimaklumi, mengingat bahwa pada fungsi atau persamaan perpangkatan (power), nilai hasil perpangkatan akan meningkat drastis ketika nilai pangkatnya dinaikkan sedikit. Misalnya ketika bilangan 2 dan 3 sama-sama dipangkatkan 2, maka 2 pangkat 2 hasilnya adalah 4 dan 3 pangkat 2 hasilnya adalah 9. Selanjutnya, bilangan 2 dan 3 sama-sama dinaikkan pangkatnya menjadi pangkat 3, maka 2 pangkat 3 hasilnya adalah 8 sementara 3 pangkat 3 hasilnya adalah 27. Terlihat sekali ketika pangkat (power)-nya dinaikkan sedikit hasil 2 pangkat 3 dan 3 pangkat 3 berbeda sangat jauh (antara 8 dan 27). Apalagi jika kemudian pangkatnya dinaikkan menjadi 4, 5, 6, dan seterusnya, maka bilangkan 3 yang hanya sedikit lebih besar dari 2, hasil perpangkatannya akan semakin mendominasi. Berdasarkan fakta ini, maka kita dapat memprediksi, bahwa peningkatan nilai power IDW akan semakin memperbesar nilai hasil estimasi biomassa tegakan hutan. Hal ini akan berpotensi hasil estimasi akan over estimate. Tentu saja kita sudah melihat buktinya pada Tabel 1, dimana ketika nilai power IDW dinaikkan semakin tinggi melebihi nilai optimumnya, akurasinya akan semakin turun. Menurut Tabel 1 tersebut kita juga dapat berargumentasi, bahwa IDW akan memberikan hasil interpolasi yang akurat ketika nilai powernya berkisar dari 2 hingga nilai optimumnya (hasil optimasi otomatis).



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara MAPE dan RMSE terhadap Nilai Power IDW

Untuk melihat lebih jauh bagaimana korelasi dan fluktuasi akurasi IDW terhadap nilai powernya, kami juga memplotkan nilai power, MAPE, RMSE IDW pada sebuah grafik, sebagaimana terlihat pada Gambar 7. Grafik pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa kesalahan IDW turun ketika power mendekati 2, dan kesalahannya akan naik kembali secara dratis ketika nilai power mendekati optimum. Setelah nilai optimum, kenaikan kesalahannya cenderung landai dan menyerupai fungsi logaritmik. Dari hasil penelitian ini kita dapat melihat bahwa nilai power optimum IDW lebih berfungsi sebagai nilai threshold atau nilai pembatas untuk mendapatkan hasil interpolasi yang akurat. Tentu saja, diperlukan studi lebih lanjut dengan titik-titik sampel yang lebih banyak dan tersebar lebih merata untuk lebih membuktikan hal tersebut. Fakta yang mengejutkan adalah nilai power 2 yang memberikan kesalahan terendah dalam metode IDW. Hal ini mengingat bahwa semua perangkat lunak SIG, seperti ArcGIS, QGIS, dan sebagainya, menjadikan nilai power 2 sebagai nilai default untuk IDW.

Sebenarnya, parameter lainnya pada IDW masih dapat diatur di dalam proses interpolasi, seperti jumlah titik-titik terdekat yang dijadikan input dan neighborhood type atau cara IDW membaca titik-titik yang terdekat. Dimana di dalam penelitian ini, pengaturan parameter jumlah titik-titik terdekat dan neighborhood type IDW dibiarkan default.

SIMPULAN DAN SARAN

Metode interpolasi spasial untuk mengestimasi distribusi biomassa tegakan di hutan tropis di bukit Mandiangin adalah Inverse Distance Weighting (IDW), dibandingkan dengan metode yang lain seperti: Global Polynomial Interpolation (GPI), Radial Basis Function (RBF), dan Local Polynomial Interpolation (LPI). IDW merupakan metode interpolasi spasial yang paling optimum untuk estimasi biomassa tegakan hutan, dan yang paling rendah kesalahannya, dibandingkan dengan metode interpolasi spasial lainny. Akurasinya yang dapat diandalkan dan proses komputasi interpolasinya yang cukup efisien, IDW juga dapat digunakan secara praktis. Nilai power 2 pada IDW merupakan nilai power yang mampu memberikan akurasi tertinggi untuk IDW,

Penelitian selanjutnya diharapkan titik-titik sampel atau plot-plot pengukuran lapangan disebarkan secara stratiefied random sampling dengan alokasi secara proporsional berdasarkan luas unit sampel dan kerapatan relative vegetasi dari citra satelit. Hal ini supaya setiap unit sampel akan tersebar secara merata. Beberapa metode interpolasi spasial, mensyaratkan agar titik-titik sampel terdistribusi secara merata di dalam wilayah yang akan diestimasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Rektor Universitas Lambung Mangkurat melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM) memberi kesempatan dan mendanai penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pihak-pihak yang membantu pelaksanaan penelitian ini Dekan Fakultas Kehutanan ULM, Ketua KHDTK ULM dan mahasiswa S1 dan S2 yang mendampingi saat pengambilan data di lapangan, seperti Ishadi, Rangga dan Agus Hadi. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada pihak Environmental Systems Research Institue (ESRI) yang sudah menyediakan Educational License software ArcGIS Desktop yang digunakan di dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Babcock, C., Finley, A. O., Andersen, H-E., Pattison, R., Cook, B. D., Morton, D. C., Alonzo, M., Nelson, R., Gregoire, T., Ene, L., Gobakken, T. and Naesset E. 2018. Geostatistical estimation of forest biomass in interior Alaska combining Landsat-derived tree cover, sampled airborne lidar and field observations. Remote Sensing of Environment 212: 212-230. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.044.

Benítez, F. L., Anderson, L. O. and Formaggio, A. R. 2016. Evaluation of geostatistical techniques to estimate the spatial distribution of aboveground biomass in the Amazon rainforest using high-resolution remote sensing data. Acta Amazonica 46(2): 151-160. https://doi.org/10.1590/1809-4392201501254.

Chapin, III, F. S., Matson, P. A. and Vitousek, P. M. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer Science+Business Media, LLC.

Dai, S., Zheng, X., Gao, L., Xu, C., Zuo, S., Chen, Q., Wei, X. and Ren, Y. Improving Plot-Level Model of Forest Biomass: A Combined Approach Using Machine Learning with Spatial Statistics. Forests 12(12): 1663. https://doi.org/10.3390/f12121663.

Dai, W., Fu, W., Jiang, P., Zhao, K., Li, Y. and Tao, J. 2018. Spatial pattern of carbon stocks in forest ecosystems of a typical subtropical region of southeastern China. Forest Ecology and Management 409: 288-297. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.036.

FAO and UNEP. 2020. The State of the World's Forests: Forests, Biodiversity

and People. Rome: FAO and UNEP. https://doi.org/10.4060/ca8642en.

Kumar, L. and Mutanga, O. 2017. Remote Sensing of Above-Ground Biomass. Remote Sensing 9(9): 935. https://doi.org/10.3390/rs9090935.

Hengl, T. 2009. A Practical Guide to Geostatistical Mapping (Second Edition). Luxembourg: EUR 22904 EN Scientific and Technical Research series report published by Office for Official Publications of the European Communities.

Houghton, R. A. 2005. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. Global Change Biology 11(6): 945-958. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x.

Jaya, I. N. S. 2014. The Interpolation Method for Estimating the Above-Ground Biomass Using Terrestrial-Based Inventory. Jurnal Manajemen Hutan Tropika 20(2): 121-130. http://dx.doi.org/10.7226/jtfm.20.2.121

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. Laporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan Monitoring, Pelaporan, Verifikasi (MPV) 2020. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Direktorat Jenderal Pengendalian Perubahan Iklim, Direktorat Inventarisasi GRK dan MPV.

Li, Y., Li, M., Liu, Z. and Li, C. 2020. Combining Kriging Interpolation to Improve the Accuracy of Forest Aboveground Biomass Estimation Using Remote Sensing Data. IEEE Access 8: 128124-128139. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008686.

Mardiatmoko, G. 2012. Pemetaan Distribusi Biomassa Hutan dan Kaitannya dengan Suhu dan Intensitas Cahaya Melalui Pendekatan Sistem Informasi Geografi. Biota 17(1): 35-44. https://doi.org/10.24002/biota.v17i1.127.

Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia. 2020. The State of Indonesia's Forest 2020. Jakarta: Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia (KLHK).

Roa-Ureta, R. and Niklitschek, E. 2007. Biomass estimation from surveys with likelihood-based geostatistics. ICES Journal of Marine Science 64(9): 1723-1734. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm149.

Robertson, G., Gualke, P., McWilliams, R., LaPlante, S. and Guldin, R. (editors). 2011. National Report on Sustainable Forests-2010. Washington D.C.: USDA Forest Service.

Sales, M. H., Souza Jr., C. M., Kyriakidis, P. C., Roberts, D. A. and Vidal, E. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil. Ecological Modelling 205(1-2): 221-230. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.033.

Santoro, M. and Cartus, O. 2019. ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the year 2017, v1. Centre for Environmental Data Analysis, 02 December 2019. http://dx.doi.org/10.5285/bedc59f37c9545c981a839eb552e4084.

Scolforo, H. F., Scolforo, J. R. S., de Mello, J. M., de Mello, C. R. and Morais, V. A. Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. Forest Ecology and Management 376: 24-35. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.047.

Shen, G., Wang, Z., Liu, C. and Han, Y. 2020. Mapping aboveground biomass and carbon in Shanghai's urban forest using Landsat ETM+ and inventory data. Urban Forestry & Urban Greening 51: 126655. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126655.

Su, H., Shen, W., Wang, J., Ali, A. and Li, M. 2020. Machine learning and geostatistical approaches for estimating aboveground biomass in Chinese subtropical forests. Forest Ecosystems 7(64): 1-20. https://doi.org/10.1186/s40663-020-00276-7.

Sun, W. and Liu, X. 2020. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. Forest Ecosystems 7(4): 1-14. https://doi.org/10.1186/s40663-019-0210-2.

Zhang, Y., Liang, S. and Yang, Lu. 2019. A Review of Regional and Global Gridded Forest Biomass Datasets. Remote Sensing 11(23): 2744. https://doi.org/10.3390/rs11232744.

Zhu, Y., Feng, Z., Lu, J. and Liu, J. 2020. Estimation of Forest Biomass in Beijing (China) Using Multisource Remote Sensing and Forest Inventory Data. Forests 11(2): 163. https://doi.org/10.3390/f11020163.