
Estimasi Nilai Respirasi Tanah Menggunakan Metode Tabung Mikrorespirasi Dengan Pengolahan Citra

Estimation Of Soil Respiration Based On Microrespiration Tube Method Using Image Processing

Ni Luh Gede Enjelina Ayu Maheswari, Ni Nyoman Sulastris*, I Putu Gede Budisanjaya, I Gusti Ketut Arya Arthawan

Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

*email: sulastris@unud.ac.id

ABSTRAK

Respirasi tanah merupakan salah satu indikator penting dalam suatu ekosistem tanah yang menunjukkan aktivitas mikroorganisme dan metabolisme dalam tanah. Respirasi tanah diukur dengan metode tabung mikrorespirasi sebagai pengukuran lapangan dan titrasi asam basa sebagai analisis laboratorium. Metode tabung mikrorespirasi ini adalah cara cepat mengukur respirasi tanah, namun data yang dihasilkan hanya dapat dilihat secara visual dan tidak diketahui nilainya. Oleh karena itu, dilakukan pengolahan citra dari metode tabung mikrorespirasi ini untuk mengestimasi nilai respirasi tanah serta mengetahui model estimasi terbaik menggunakan *machine learning*. Citra diakuisisi kemudian diolah dengan pengolahan citra meliputi konversi *Red, Green, Blue* (RGB) ke *Hue Saturation Value* (HSV), augmentasi citra, serta ekstraksi fitur data citra. Pengembangan model estimasi respirasi tanah menggunakan tiga algoritma yaitu *Multiple Linear Regression* (MLR), *Back Propagation* (BP), dan *Random Forest* (RF). Hasil dari penelitian ini adalah diperoleh akurasi model dengan nilai R^2 dari ketiga model yaitu MLR = 0,28, BP = 0,53, RF = 0,77 dan nilai estimasi dari ketiga model MLR = 7,62 mg/g, BP = 4,38 mg/g, RF = 4,57 mg. Dari hasil tersebut, dinyatakan bahwa model dengan algoritma RF merupakan model terbaik untuk mengestimasi nilai respirasi tanah.

Kata kunci : *Back Propagation, Multiple Linear Regression, Pengolahan Citra, Random Forest, Respirasi Tanah*

ABSTRACT

Soil respiration is one of the important indicators in a soil ecosystem, reflecting the activity of microorganisms and soil metabolism. Soil respiration is measured using the microrespiration tube method as a field measurement and acid-base titration as a laboratory analysis. This microrespiration tube method is a quick way to measure soil respiration, but the resulting data can only be seen visually and its value is unknown. Therefore, image processing from this microrespiration tube method was carried out to estimate soil respiration values and determine the best estimation model using machine learning. Images were acquired and then processed with image processing including conversion *Red, Green, Blue* (RGB) to *Hue Saturation Value* (HSV), image augmentation, and feature extraction from the image data. The soil respiration estimation model was developed using three algorithms: *Multiple Linear Regression* (MLR), *Back Propagation* (BP), and *Random Forest* (RF). The results showed model accuracy with R^2 values of 0.28 for MLR, 0.53 for BP, and 0.77 for RF and soil respiration estimation of 7.62 mg/g for MLR, 4.38 mg/g for BP, and 4.57 mg/g for RF. Based on these results, it is concluded that the RF algorithm is the best model for estimating soil respiration values.

Keywords: *Back Propagation, Multiple Linear Regression, Image Processing, Random Forest, Soil Respiration*

PENDAHULUAN

Respirasi merupakan proses aktivitas biologis yang menjadi indikator kualitas tanah dan sering dipakai untuk mengukur aktivitas biota tanah (Parkin et al., 2015). Respirasi tanah adalah proses pelepasan CO₂ dari tanah ke atmosfer yang merupakan salah satu bagian dari siklus karbon yang bertanggungjawab terhadap perubahan iklim (Tong et al., 2021). Terdapat dua jenis respirasi, yaitu respirasi mikroba dan respirasi tanah. Respirasi mikroba adalah proses produksi CO₂ atau serapan O₂ sebagai hasil metabolisme dari mikroorganisme seperti bakteri, jamur, alga, dan protozoa (Parkin et al., 2015). Sedangkan respirasi tanah adalah proses evolusi CO₂ dari dalam tanah yang dihasilkan oleh aktivitas mikroorganisme dalam tanah seperti cacing tanah, nematoda, serangga dan juga akar tanaman (Menti et al., 2020). Respirasi tanah merupakan salah satu indikator penting pada suatu jaringan ekosistem yang meliputi seluruh aktivitas mikroorganisme yang berkaitan dengan proses metabolisme dalam tanah, dekomposisi bahan organik dalam tanah, dan juga konversi bahan organik tanah menjadi CO₂ (Putri et al., 2020). Respirasi tanah ini dipengaruhi oleh adanya faktor lingkungan, mikroba tanah, respirasi, suhu tanah, tingkat kelembaban tanah, pH, dan faktor budidaya tanaman (Putri et al., 2020).

Penentuan respirasi tanah dapat dilakukan dengan 2 (dua) metode yaitu pengukuran di lapangan (*Field Measurement*), dan analisis laboratorium (*Laboratory Measurement*) (Anderson, 1982). Salah satu metode pengukuran lapangan yang cukup sederhana untuk dilakukan adalah menggunakan metode tabung mikrorespirasi dengan indikator *Bromothymol Blue* (BTB). Produksi CO₂ dari proses respirasi tanah ini dapat dianalisis menggunakan indikator BTB dan apabila CO₂ yang diproduksi bereaksi dengan air dan BTB maka menurunkan pH dan merubah warna BTB menjadi kuning seiring semakin menurunnya pH. Metode ini menggunakan sampel tanah yang sangat segar dan belum tercemar zat apapun walaupun tetap dipengaruhi oleh kondisi alam di lapangan, namun respirasi tanah yang tercatat mirip seperti aslinya. Meskipun penentuan respirasi tanah dengan metode ini lebih efisien, namun informasi yang didapatkan sulit untuk diinformasikan (Anderson, 1982).

Penentuan respirasi tanah di laboratorium umumnya dilakukan dengan metode titrasi asam basa. Pada metode ini tanah diinkubasi selama 24 jam dalam wadah tertutup yang setelah diinkubasi dilakukan titrasi menggunakan larutan HCl. Kelebihan pengukuran di laboratorium adalah kondisinya dapat dikontrol serta lebih nyaman saat melakukan

pengukuran, namun analisis di laboratorium juga dianggap membutuhkan waktu yang lebih lama dan keahlian yang lebih (Anderson, 1982). Penentuan respirasi tanah baik dengan menggunakan indikator BTB ataupun titrasi asam basa memiliki kelebihan dan kekurangan. Berdasarkan hal tersebut, pengolahan citra dan *machine learning* digunakan untuk mendeteksi perubahan warna akibat adanya CO₂ hasil respirasi tanah dari metode pengukuran dengan indikator BTB.

Pengolahan citra (*Image Processing*) adalah bidang ilmu yang mempelajari tentang bagaimana suatu citra atau gambar dapat dibentuk, diolah, dan dianalisis sehingga menghasilkan suatu informasi yang mampu dipahami oleh manusia (Ratna, 2020). Berdasarkan nilai pikselnya, citra digital dikelompokkan dalam 3 jenis, yaitu citra warna, citra *grayscale*, dan citra biner (Fadjeri et al., 2020). Manfaat dari pengolahan citra ini adalah untuk memperbaiki kualitas citra agar dapat diinterpretasikan oleh manusia maupun komputer (Chairi & Mukhaiyar, 2023). Pengolahan citra dapat diaplikasikan pada berbagai aspek di bidang pertanian misalnya pada penentuan jenis tanaman pada kemiringan lahan pertanian. Penentuan ini menggunakan algoritma *linear programming* untuk mengukur tingkat akurasi kemiringan lahan pertanian dalam menentukan jenis tanaman (Dengen et al., 2019). Perubahan warna pada daun stroberi untuk deteksi awal penyakit juga di analisa dengan pengolahan citra. Perubahan warna ini diolah menggunakan algoritma *K-Means Clustering* untuk mengelompokkan objek-objek yang terdapat sesuai dengan jenis warna (Sonata et al., 2020). Penentuan respirasi tanah ini juga akan menggunakan *machine learning* untuk mengukur laju respirasi tanah dengan metode pengukuran laboratorium.

Machine learning adalah salah satu cabang ilmu komputer yang secara luas memiliki tujuan untuk memungkinkan komputer untuk "belajar" tanpa diprogram secara langsung (Bi et al., 2019). Tujuan pembuatan *machine learning* ini adalah untuk mengotomatisasi pembuatan model analitis misalnya untuk mendeteksi objek. Berdasarkan permasalahan dan data yang tersedia, *machine learning* ini dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu *supervised learning*, *unsupervised learning* dan *reinforcement learning* (Janiesch et al., 2021). *Machine learning* dapat diaplikasikan pada bidang pertanian misalnya pada prediksi produksi bawang merah. Penelitian ini menggunakan data *mining* pada metode regresi linier berganda dengan tujuan melakukan prediksi jumlah produksi di bidang pertanian (Suyono et al., 2024). Curah hujan juga dapat di analisa menggunakan *machine learning*. Analisis curah hujan ini menggunakan metode regresi linier berganda dengan

variabel yang digunakan yaitu kecepatan angin, suhu maksimum dan suhu minimum (Pebralia, 2022).

Berdasarkan hal-hal di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi nilai respirasi tanah dengan memanfaatkan pengolahan citra menggunakan data uji dari data tabung mikrorespirasi dan data target respirasi tanah dari hasil titrasi asam basa menggunakan *machine learning*.

METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Subak Suala, Desa Pitra, Kecamatan Penebel, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali untuk pengambilan sampel tanah serta pengukuran lapangan. Analisis laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Pengelolaan Sumber Daya Alam, Laboratorium Analisis Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Kampus Sudirman. Pelaksanaan penelitian ini dilakukan pada bulan Desember 2024 sampai dengan bulan Februari 2025.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel tanah di lahan Subak Suala, Desa Pitra, Kecamatan Penebel, Kabupaten Tabanan. Bahan-bahan yang digunakan untuk analisis menggunakan tabung mikrorespirasi meliputi: agar, *aquades*, NaOH, dan *Bromothymol Blue* (BTB). Bahan-bahan yang digunakan untuk analisis titrasi asam basa yaitu : NaOH 0,1 N, HCl 0,1 N, barium klorida ($BaCl_2$) 0,5 M, indikator *fenolptalein*, dan kantong kain poliester.

Alat yang digunakan dalam pengambilan sampel tanah meliputi cangkul, kantong plastik, spidol, kertas label. Alat analisis yang digunakan di laboratorium meliputi *erlenmeyer*, labu ukur volumetrik 100 ml, labu ukur volumetrik 1000 ml, timbangan analitik, timbangan digital, *autoclave*, *water bath*, *magnet stirrer*, kertas pH, tabung mikrorespirasi, pipet 2 ml, pipet 10 ml, pipet mikro, pipet tetes, botol kedap udara 250 ml (*Schot Duran*), buret, inkubator. Alat yang digunakan untuk pengolahan data meliputi kotak akuisisi citra, *smartphone* Samsung A12 dengan resolusi kamera sebesar 48 MP, laptop Lenovo *Ideapad 3 Slim 3* dengan spesifikasi *processor 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-1135G7*, RAM 8,00 GB dan *Visual Studio Code*.

Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan diantaranya, pengambilan sampel, analisa sampel dan dilanjutkan dengan akuisisi citra. Data yang digunakan untuk analisa sampel diperoleh dari 30 plot tanah yang diambil sebanyak dua kali dari lahan

Subak Suala dan sampel diambil pada kedalaman 0 – 10 cm. Tahapan analisa sampel dilakukan dengan dua metode yaitu pengukuran lapangan menggunakan metode tabung mikrorespirasi dan pengukuran laboratorium menggunakan metode titrasi asam basa (Anderson, 1982). Tahapan selanjutnya yaitu akuisisi citra untuk data tabung mikrorespirasi yang dilakukan menggunakan *smartphone* Samsung A12 dengan resolusi kamera sebesar 48 MP, kamera disetel dengan ISO 800, *white balance* 5500K, serta *eksposure* kamera +0.2 dengan jarak antara objek citra dan kamera sejauh 10 cm serta menggunakan sampel dari tabung mikrorespirasi dan kotak akuisisi citra dengan dimensi 20 cm x 8 cm x 15 cm. Akuisisi citra dilakukan dengan tahapan yaitu *resize* citra, *cropping* citra, konversi RGB ke HSV, dan augmentasi citra.

Analisis Data

Analisis data dimulai dari proses ekstraksi fitur, pembangunan model dengan algoritma MLR, BP dan RF serta validasi model. Tahapan ekstraksi fitur menggunakan dua fitur yaitu ekstraksi rerata intensitas dan standar deviasi (Ciputra et al., 2018). Tahapan pembangunan model dengan algoritma MLR, BP dan RF dilakukan dengan tahapan yaitu *Exploratory Data Analysis* (EDA) yang dilakukan untuk meringkas suatu data dengan mengambil karakteristik utama data kemudian divisualisasikan dengan representasi yang tepat (Sahoo et al., 2019). Tahapan selanjutnya yaitu pembagian data latih dan data uji, di mana jumlah data sebanyak 660 yang di *split* menjadi dua dengan perbandingan 70:30. Data latih dan data uji menggunakan data dari tabung mikrorespirasi dan data titrasi asam basa digunakan sebagai data target. Tahapan terakhir adalah validasi model menggunakan tiga metrik yaitu *Mean Square Error* (MSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Coefficient of determination* (R^2). Ketiga metrik ini digunakan untuk uji akurasi atau hasil seberapa baik atau buruknya model yang dibuat (Hair et al., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangunan Model

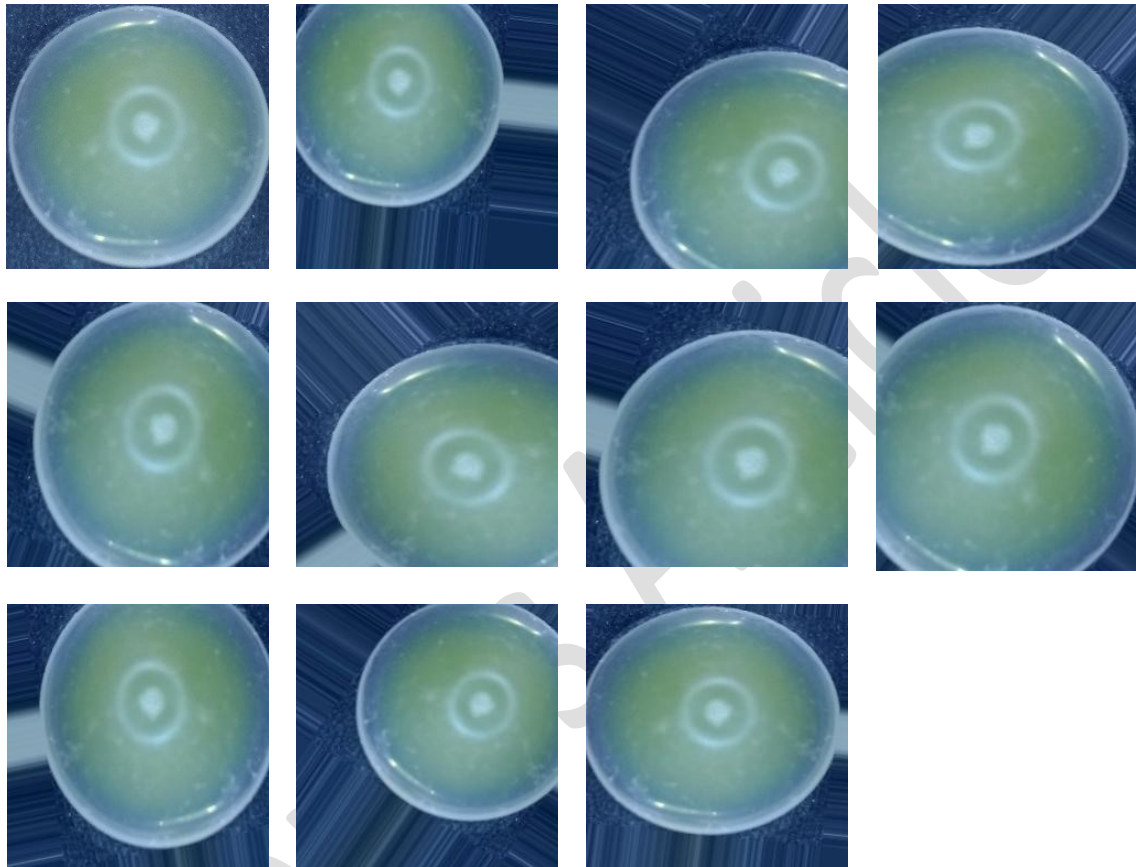
Penelitian ini membangun model estimasi respirasi tanah menggunakan metode tabung mikrorespirasi dengan pengolahan citra digital. Pembangunan model ini melalui beberapa tahapan diantaranya, *resize* citra, *cropping* citra, konversi RGB ke HSV, augmentasi citra, ekstraksi fitur, dan implementasi algoritma MLR, BP, dan RF.

Tahapan *resize* citra ini mengubah ukuran citra yang semula berdimensi 3000 x 4000 menjadi 600 x 800. Selanjutnya tahap *cropping* citra dilakukan secara manual pada setiap foto citra dengan cara yaitu

menjalankan *coding* terlebih dahulu kemudian menyeret kursor ke bagian citra yang ingin di-*crop*.

Tahap augmentasi citra adalah teknik yang digunakan guna meningkatkan pembelajaran lebih mendalam pelatihan citra pada proses variasi citra (Rasyid & Wisudawati, 2024). Augmentasi dilakukan dengan jumlah data inti sebanyak 60 citra dan di akuisisi sebanyak 10 kali sehingga jumlah total

data citra sebanyak 600 data citra yang ditambah juga dengan 60 data inti. 660 data citra ini dibagi menjadi dua yaitu sebagai data latih sebanyak 462 citra dan 198 citra digunakan sebagai data uji. Contoh citra hasil augmentasi dapat dilihat pada Gambar 1, dimana citra ini telah mengalami rotasi, pergeseran, *zoom*, serta horizontal dan *vertical flipping* (Shorten & Khoshgoftaar, 2019; Maulida et al., 2024).



Gambar 1. Hasil augmentasi citra

Tahapan ekstraksi fitur adalah salah satu tahapan penting dalam proses pengolahan citra agar ciri khusus suatu citra dapat dikenali (Syarifah et al., 2022). Keseluruhan data melalui proses ekstraksi

fitur dengan skenario pada Tabel 1. Hasil ekstraksi fitur kemudian disimpan dalam bentuk excel.

Tabel 1. Skenario ekstraksi fitur

Mean	Standar Deviasi
H Mean	H Standar Deviasi
S Mean	S Standar Deviasi
V Mean	V Standar Deviasi

Tahap implementasi algoritma MLR, BP dan RF melibatkan pembuatan arsitektur, pelatihan, penyimpanan dan pengujian akurasi model untuk mengetahui seberapa baik kinerja model dalam melakukan estimasi. Adapun beberapa library yang digunakan pada implementasi algoritma yaitu *Pandas* yang berfungsi untuk memproses data,

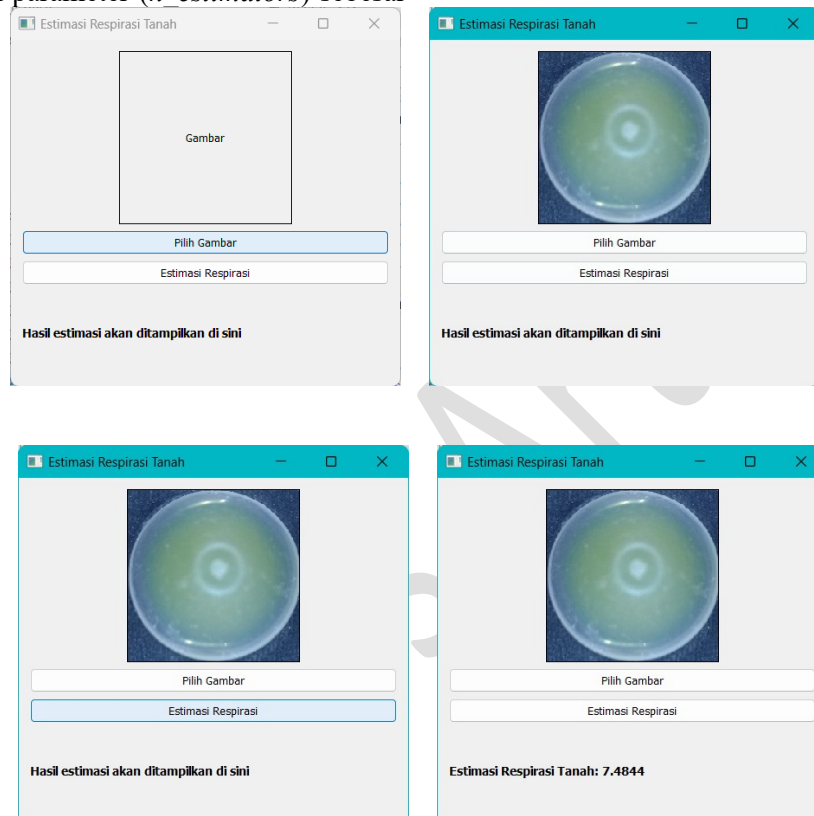
manipulasi data, dan analisis data, *Scikit-Learn* yang digunakan untuk membangun model pada *machine learning* seperti pada penelitian ini, *matplotlib* yang digunakan untuk memvisualisasikan gambar dengan kualitas tinggi dan disimpan dalam berbagai format seperti JPEG dan PNG (Haryanto et al., 2023). Pembangunan model MLR menggunakan fungsi *LinearRegression()*.

Pada algoritma BP ini pembangunan model dilakukan menggunakan fungsi yaitu *Sequential()*. Selain fungsi, algoritma BP juga menggunakan beberapa parameter, diantaranya hidden layer, fungsi aktivasi yaitu ReLU (*Rectified Linear Unit*), learning rate dengan nilai 0,001, dan solver yang digunakan adalah adam.

Pada implementasi algoritma RF, pembangunan model dilakukan menggunakan fungsi *RandomForestRegressor()* pada *library Scikit-learn* dan menggunakan parameter (*n estimators*) sebesar

100 yang berarti bahwa model akan membuat pohon keputusan sebanyak 100 pohon.

Untuk mendukung dan memudahkan pengguna dalam mengetahui nilai respirasi tanah, maka dibangun juga GUI (*Graphical User Interface*). GUI merupakan suatu tampilan grafis yang dapat memudahkan pengguna berinteraksi dengan perintah teks (Chapman, 2001; Kurniastuti & Andini, 2018). Pada pembangunan GUI ini, data yang digunakan adalah 60 data citra yang sudah *dicropping*.

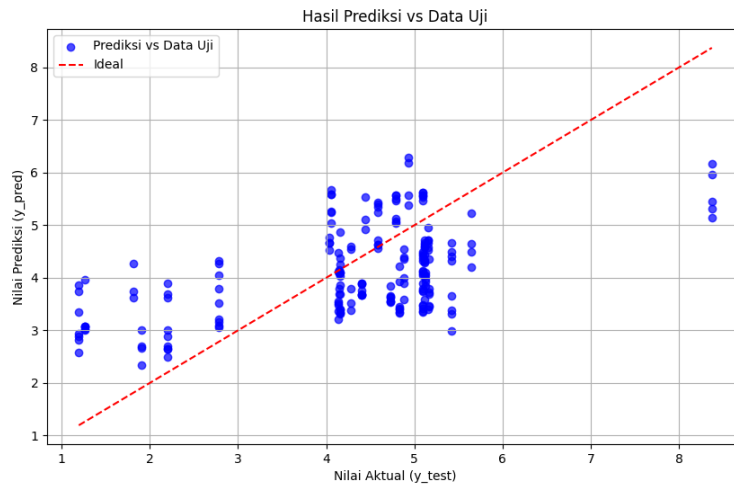


Gambar 2. Tampilan GUI

Estimasi dan Akurasi Model

Nilai estimasi respirasi tanah di area persawahan berkisar 4-7 mg/g (Handayani et al., 2024). Penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk mengetahui respirasi tanah yang di uji. Pada penelitian ini, nilai estimasi yang dihasilkan dari model BP dan RF berkisar antara nilai 4-7 mg/g, namun pada model MLR nilai estimasi berada di angka 7,62 mg/g yang dimana nilai tersebut sedikit lebih besar dari kisaran tersebut dikarenakan akurasi dari model MLR bernilai rendah.

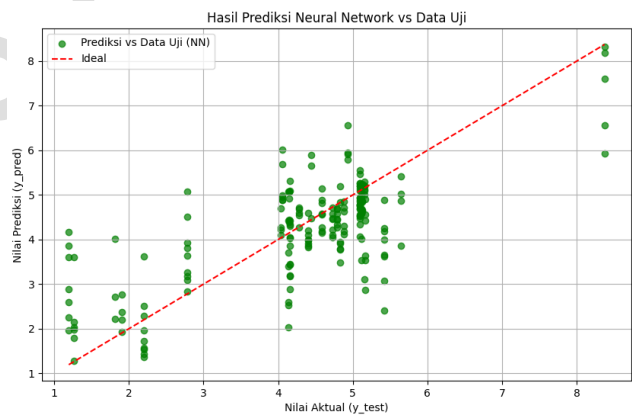
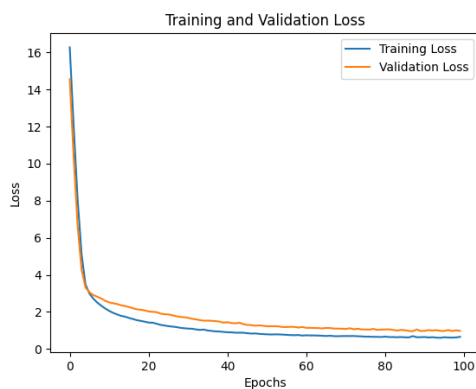
Akurasi model menggunakan metrik MSE, MAE, R^2 dan *adjusted R²*. Pada algoritma MLR, dihasilkan grafik perbandingan hasil prediksi dengan data uji sekaligus hasil evaluasi model yang menyatakan bahwa algoritma MLR kurang ideal dalam mengestimasi nilai respirasi tanah. Grafik dapat dilihat pada Gambar 3. Dilihat dari gambar, penempatan titik banyak yang tidak berada tepat di garis merah yang menyatakan bahwa model mengalami *error* pada saat melakukan prediksi.



Gambar 3. Grafik hasil prediksi dan data uji

Pada algoritma BP, dilakukan kompilasi model menggunakan *optimizerAdam* dan *learning rate* 0,001. Setelah itu, model dilatih sebanyak 100 *epoch*, ukuran *batch* sebesar 32 dan *validation split* sebesar 0,3. Pada penelitian ini, digunakan *learning rate* 0,001 yang menunjukkan bahwa penyesuaian parameter model dilakukan dengan perubahan yang kecil. Model kemudian melakukan *epoch* sebanyak 100 kali yang berarti model dapat melatih data hingga

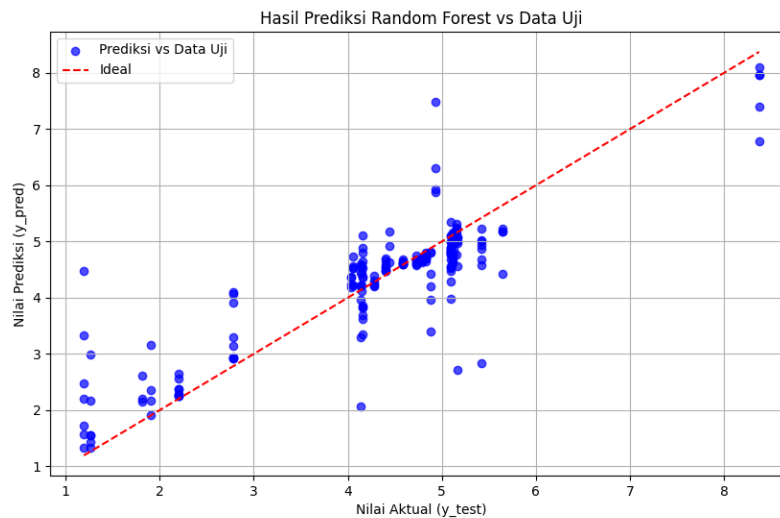
100 kali dengan nilai loss sebesar 0,67. Visualisasi performa model dan grafik perbandingan hasil prediksi dengan data uji dapat dilihat pada . Dilihat dari Gambar 4, penempatan titik sudah banyak yang tersebar di sekitar garis ideal, namun masih cukup banyak titik yang berada jauh dari garis ideal. Hal ini menyatakan bahwa model masih mengalami beberapa *error* pada prediksi.



Gambar 4. Visualisasi model dan grafik hasil prediksi dengan data uji BP

Pada algoritma RF, penempatan titik sudah mewakili satu sampel yang ada dalam data uji dan keseluruhan titik sudah mendekati garis ideal. Hal ini menyatakan bahwa model sudah berjalan cukup stabil, namun

masih ada beberapa *outlier* yang menunjukkan bahwa beberapa sampel masih salah dalam memprediksi. Grafik dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hasil prediksi dan data uji RF

Adapun perbandingan nilai estimasi dan evaluasi metrik dari ketiga algoritma dapat dilihat pada Tabel 2 menunjukkan bahwa ketiga algoritma menghasilkan perbedaan nilai estimasi dan evaluasi metrik yang signifikan. Berdasarkan perbandingan ketiga algoritma tersebut, hasil estimasi nilai respirasi tanah metode tabung mikrorespirasi dengan pengolahan citra yang paling baik adalah dengan menggunakan algoritma RF yaitu sebesar 0,7733

yang berarti sebesar 77,33% data dapat dijelaskan variasinya. Hal ini sejalan dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa algoritma RF memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan algoritma BP dalam menghasilkan model estimasi (Apriliani et al., 2024). Pernyataan ini didukung dengan keunggulan algoritma RF karena kemampuannya mengatasi *overfitting*, menangani data yang hilang, dan bekerja baik dengan data dimensi tinggi (Mienye & Sun, 2022).

Tabel 2. Perbandingan ketiga algoritma

Metrik	Algoritma		
	MLR	BP	RF
Estimasi	7,62 mg/g	4,38 mg/g	4,57 mg/g
MSE	1,36	0,89	0,42
MAE	0,98	0,69	0,41
R ²	0,27	0,53	0,77
Adjusted R ²	0,25	0,51	0,77

Dari analisa yang dilakukan, didapatkan kategori bahwa hasil citra dengan warna Kuning berkisar antara 5-7 mg/g, dengan warna Hijau berkisar antara 3-4 mg/g, serta warna Biru dan Hijau Tua berkisar antara 1-2 mg/g.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membangun model estimasi respirasi tanah menggunakan metode tabung mikrorespirasi dengan pengolahan citra dan *machine learning*. Pembangunan model dilakukan dengan

menggunakan tiga algoritma yaitu *Multiple Linear Regression* (MLR), *Back Propagation* (BP), dan *Random Forest* (RF). Selain pembangunan model, dibuat juga tampilan *Graphical User Interface* (GUI) yang dapat digunakan sebagai interaksi antara perangkat dengan pengguna. Dari tiga algoritma yang digunakan, yaitu *Multiple Linear Regression* (MLR) didapatkan nilai estimasi sebesar 7,62 mg/g, *Back Propagation* (BP) didapatkan nilai estimasi sebesar 4,38 mg/g dan *Random Forest* (RF) didapatkan nilai estimasi sebesar 4,57 mg/g. Dan dari ketiga algoritma, model RF menunjukkan akurasi

terbaik dengan nilai R^2 sebesar 0,77 dan MSE sebesar 0,42.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In *Agronomy Monographs* (1st ed., Vol. 9, pp. 831–833). Wiley.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Apriliani, L. M. P., Sulastri, N. N., Widia, I. W., & Budisanjaya, I. P. G. (2024). Estimasi evapotranspirasi potensial menggunakan algoritma random forest di daerah Irigasi Tungkub, Bali. *JURNAL BETA (BIOSISTEM DAN TEKNIK PERTANIAN)*, 12(02), 198.
- Bi, Q., Goodman, K. E., Kaminsky, J., & Lessler, J. (2019). What is machine learning? A primer for the epidemiologist. *American Journal of Epidemiology*, 222. <https://doi.org/10.1093/aje/kwz189>
- Chairi, A., & Mukhaiyar, R. (2023). Sistem kontrol color sorting machine dengan pengolahan citra digital. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(1), 387–396. <https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.393>
- Ciputra, A., Setiadi, D. R. I. M., Rachmawanto, E. H., & Susanto, A. (2018). Klasifikasi tingkat kematangan buah Apel manalagi dengan algoritma naive bayes dan ekstraksi fitur citra digital. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 9(1), 465–472. <https://doi.org/10.24176/simet.v9i1.2000>
- Dengen, C. N., Nurcahyo, A. C., & Kusriani, K. (2019). Penentuan jenis tanaman berdasarkan kemiringan lahan pertanian menggunakan adopsi linier programming berbasis pengolahan citra. *Jurnal Buana Informatika*, 10(2), 99. <https://doi.org/10.24002/jbi.v10i2.2253>
- Fadjeri, A., Setyanto, A., & Kurniawan, M. P. (2020). Pengolahan citra digital untuk menghitung ekstraksi ciri greenbean kopi robusta dan arabika (studi kasus: Kopi Temanggung). *Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIKOMSiN)*, 8(1), 8–10. <https://doi.org/10.30646/tikomsin.v8i1.462>
- Hair, J. F., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Black, W. C. (2022). *Multivariate data analysis*. Cengage Learning.
<https://books.google.co.id/books?id=PONXEAAAQBAJ>
- Handayani, I. A. K. T., Sulastri, N. N., & Arthawan, I. G. K. A. (2024). Dampak jangka pendek pengelolaan jerami padi terhadap karbon organik dan rasio CN tanah. *JURNAL BETA (BIOSISTEM DAN TEKNIK PERTANIAN, Inpress)*, 1–7.
- Haryanto, C., Rahaningsih, N., & Muhammad Basysyar, F. (2023). Komparasi algoritma machine learning dalam memprediksi harga rumah. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 7(1), 533–539. <https://doi.org/10.36040/jati.v7i1.6343>
- Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*, 31(3), 685–695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
- Kurniastuti, I., & Andini, A. (2018). Perancangan program penentuan histogram citra dengan graphical user interface (GUI). *Applied Technology and Computing Science Journal*, 1(1), 11–17. <https://doi.org/10.33086/atcsj.v1i1.4>
- Maulida, Z. H., Budisanjaya, I. P. G., Utama, I. M. S., Chaicana, C., & Syahputra, N. H. (2024). Deteksi residu insektisida profenofos pada cabai merah (*Capsium annum L.*) melalui augmentasi citra dan CNN (Convolutional Neural Network). *12 No 02*, 2–3.
- Menti, Y., Yusnaini, S., Buchari, H., & Niswati, A. (2020). Respirasi tanah akibat sistem olah tanah dan aplikasi mulsa in situ pada pertanaman kacang hijau (*Vigna radiata L.*) di Laboratorium Lapang Terpadu, Universitas Lampung. *Jurnal Agrotek Tropika*, 8(2), 365. <https://doi.org/10.23960/jat.v8i2.3911>
- Mienye, I. D., & Sun, Y. (2022). A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects. *IEEE Access*, 10, 99129–99149. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3207287>
- Parkin, T. B., Doran, J. W., & Franco-Vizcaíno, E. (2015). Field and laboratory tests of soil respiration. In J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 231–245). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c14>

- Pebralia, J. (2022). Analisis curah hujan menggunakan machine learning metode regresi linier berganda berbasis python dan jupyter notebook. *Jurnal Ilmu Fisika Dan Pembelajarannya (JIFP)*, 6(2), 23–30. <https://doi.org/10.19109/jifp.v6i2.13958>
- Putri, D. A., Yusnaini, S., Utomo, M., & Niswati, A. (2020). Pengaruh sistem olah tanah dan pemupukan N jangka panjang terhadap respirasi tanah pada pertanaman kedelai (*Glycine max L.*) di lahan Politeknik Negeri Lampung ke-29. 8, 587–595.
- Rasyid, M. I., & Wisudawati, L. M. (2024). Klasifikasi hama ulat pada citra daun sawi berbasis convolutional neural network dengan model Xception. *Jutisi: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, 13(2), 870. <https://doi.org/10.35889/jutisi.v13i2.1801>
- Ratna, S. (2020). Pengolahan citra digital dan histogram dengan python dan text editor Pycharm. *Technologia: Jurnal Ilmiah*, 11(3), 181. <https://doi.org/10.31602/tji.v11i3.3294>
- Sahoo, K., Samal, A. K., Pramanik, J., & Pani, S. K. (2019). Exploratory Data Analysis using Python. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12), 4727–4735. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3591.1081219>
- Sonata, Y., Sulistyono, S. B., & Wijaya, K. (2020). Deteksi dini penyakit pada daun stroberi berbasis pengolahan citra. 1, 30–36.
- Suyono, S., Astuti, R., & M. Basysyar, F. (2024). Implementasi data mining untuk prediksi produksi bawang merah di Kabupaten Brebes. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(1), 734–740. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i1.8399>
- Syarifah, A., Riadi, A. A., & Susanto, A. (2022). Klasifikasi tingkat kematangan jambu bol berbasis pengolahan citra digital menggunakan metode K-Nearest Neighbor. *JIMP: Jurnal Informatika Merdeka Pasuruan*, 7, 27–30. <https://dx.doi.org/10.37438/jimp.v7i1.417>
- Tong, D., Li, Z., Xiao, H., Nie, X., Liu, C., & Zhou, M. (2021). How do soil microbes exert impact on soil respiration and its temperature sensitivity? *Environmental Microbiology*, 23(6), 3048–3058. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15520>