

Penerapan Pembelajaran Mendalam untuk Analisis Ekspresi Gen Ketahanan Kekeringan pada Tanaman Padi Lokal Kab. Nias (*Oryza sativa* L.)

Helmin Parida Zebua¹, Dian Agung Sanora Laia¹, Desti Kurniawan Gulo¹,
Novelina Andriani Zega²

¹Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Nias Sumatera Utara

²Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nias, Nias Sumatera Utara

Email Korespondensi: helminparidaz@unias.ac.id

Abstract

Tanaman padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan strategis yang menghadapi tantangan serius akibat peningkatan kejadian kekeringan, terutama di wilayah Kepulauan Nias yang memiliki distribusi lahan sawah tidak merata dan periode kemarau panjang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon morfo-fisiologis padi lokal Nias terhadap cekaman kekeringan dan mengembangkan model pembelajaran mendalam (deep learning) untuk memprediksi ekspresi gen ketahanan kekeringan secara tidak langsung melalui data citra dan parameter fisiologis. Penelitian dilaksanakan di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Nias dengan melibatkan lima varietas padi lokal. Analisis fisiologis meliputi pengukuran kadar prolin, malondialdehide (MDA), dan kadar air relatif (RWC), sedangkan citra tanaman diolah menggunakan arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) berbasis ResNet50. Hasil menunjukkan bahwa varietas asal Bawolato dan Idanogawo memiliki ketahanan lebih tinggi dengan peningkatan prolin hingga 2,8 kali lipat dan kestabilan RWC di atas 70%. Model pembelajaran mendalam yang dikembangkan mampu memprediksi tingkat ekspresi gen ketahanan kekeringan dengan akurasi 91,3%, serta mengidentifikasi ciri visual daun sebagai indikator utama stres air. Pendekatan ini membuktikan potensi besar integrasi data fenotipik dan kecerdasan buatan dalam mempercepat identifikasi varietas tahan kekeringan secara efisien dan non-destruktif, mendukung pengembangan pertanian presisi di wilayah Nias.

Keywords:

Padi lokal Nias,
Ketahanan kekeringan,
Morfo-fisiologis,
Pembelajaran mendalam,
Ekspresi gen.

Pendahuluan

Tanaman padi (*Oryza sativa* L.) merupakan komoditas pangan strategis bagi Indonesia dengan konsumsi mencapai 114,6 kg/kapita/tahun (BPS, 2023). Produktivitas padi menghadapi tantangan serius akibat perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan frekuensi kekeringan. Cekaman kekeringan dapat menurunkan hasil panen hingga 40-70% tergantung fase pertumbuhan dan intensitas stress (Zhao *et al.*, 2022).

Kabupaten Nias memiliki luas sawah 5.146 Ha yang tersebar di delapan kecamatan dengan distribusi tidak merata: Bawolato (2.169 Ha atau 42,13%), Idanogawo (1.267 Ha atau 24,61%), Gido (898 Ha atau 17,45%), Sogaeadu (711 Ha atau 13,81%), Ulugawo (54 Ha atau 1,05%), Botomuzoi (37 Ha atau 0,72%), Hiliduho (7 Ha atau 0,14%), dan Mau (2 Ha atau 0,04%) (BPS Kabupaten Nias, 2023). Data BMKG Stasiun Gunungsitoli menunjukkan periode kemarau dengan curah hujan di bawah 100

mm/bulan selama 3 -5 bulan, terutama di Bawolato dan Idanogawo, menyebabkan penurunan produktivitas 1,2 ton/ha atau 20 -25% dari potensi maksimal (Dinas Pertanian Kabupaten Nias, 2022).

Padi lokal Nias yang dikembangkan turun-temurun diduga memiliki mekanisme adaptasi unik terhadap kekeringan (Lase *et al.*, 2020), namun karakterisasi molekulernya masih terbatas. Ketahanan kekeringan merupakan sifat kompleks multigenik yang melibatkan perubahan ekspresi ribuan gen pengatur transduksi sinyal, biosintesis hormon, akumulasi osmolyte, dan sistem antioksidan (Wang *et al.*, 2022).

Teknologi RNA-sequencing (RNA-seq) memungkinkan pengukuran ekspresi seluruh transkrip secara simultan dengan resolusi tinggi (Stark *et al.*, 2019). Namun, data RNA-seq berdimensi tinggi (puluhan ribu gen) dengan jumlah sampel terbatas menciptakan tantangan statistik "curse of dimensionality" (Tarazona 2020). Pembelajaran mendalam (deep learning) dengan kemampuan ekstraksi fitur otomatis dan penanganan data non-linear kompleks (LeCun dkk., 2015) telah menunjukkan keberhasilan dalam analisis genomika tanaman, seperti klasifikasi varietas padi toleran salinitas (Wang, 2019) dan prediksi fenotipe multi-omics (Zhang dkk., 2021).

Penelitian ini mengintegrasikan RNA-seq dan pembelajaran mendalam untuk menganalisis profil ekspresi gen ketahanan kekeringan pada padi lokal Nias. Kebaruan ilmiah penelitian ini terletak pada: (1) karakterisasi molekuler komprehensif plasma nutfah lokal Indonesia yang belum terkarakterisasi; (2) aplikasi arsitektur *deep learning* untuk analisis transkripsiyomik stress kekeringan pada padi lokal; (3) identifikasi gen biomarker spesifik untuk kondisi agroekologi Nias; dan (4) validasi eksperimental terintegrasi untuk implementasi praktis dalam program pemuliaan.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) Menganalisis respon morfo-fisiologis tanaman padi lokal Nias terhadap cekaman kekeringan melalui integrasi data citra dan parameter fisiologis untuk mengidentifikasi ciri fenotipik yang berkorelasi dengan ketahanan kekeringan. (2) Mengembangkan dan memvalidasi model pembelajaran mendalam (deep learning) yang mampu memprediksi tingkat ekspresi gen ketahanan kekeringan secara tidak langsung berdasarkan citra tanaman dan indikator fisiologis, sebagai pendekatan efisien pengganti analisis molekuler konvensional.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Rumah Kaca Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Nias untuk tahap penanaman dan perlakuan cekaman kekeringan, serta di Laboratorium Agroteknologi untuk analisis parameter fisiologis tanaman. Proses pemrosesan citra dan pengembangan model pembelajaran mendalam dilakukan di Laboratorium Komputasi dan Analisis Data Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Nias. Penelitian berlangsung selama empat bulan (Juni-September, 2025) dari tahap persiapan bahan tanam hingga validasi model analisis.

Bahan

Bahan utama meliputi: benih padi lokal (*Oryza sativa L*) Nias dari lima kecamatan (Bawolato, Idanogawo, Gido, Sogaeadu, Ulugawo), varietas Nias, larutan asam sulfosalisilat 3% (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), ninhidrin (Merck, Darmstadt, Germany), asam asetat glasial (Merck, Darmstadt, Germany), toluena (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), larutan TCA 10% (Merck, Darmstadt, Germany), thiobarbituric acid (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA), serta air suling steril yang digunakan dalam analisis kadar prolin, MDA, dan kadar air relatif tanaman.

Alat

Peralatan utama yang digunakan meliputi: camera digital Canon EOS 250D (Canon Inc., Tokyo, Japan) untuk pengambilan citra tanaman, spektrofotometer UV-Vis UV-1800 (Shimadzu, Kyoto, Japan) untuk analisis kadar prolin dan MDA, oven pengering Memmert UN55 (Mettler GmbH, Schwabach,

Germany), timbangan analitik Sartorius Entris II (Sartorius AG, Göttingen, Germany), homogenizer IKA T25 digital ULTRA-TURRAX (IKA-Werke GmbH, Staufen, Germany), serta komputer dengan prosesor Intel® Core™ i7 dan GPU NVIDIA RTX 3060 (NVIDIA Corporation, Santa Clara, CA, USA) yang digunakan untuk pemrosesan data citra dan pelatihan model pembelajaran mendalam.

Hasil dan Pembahasan

Respon Morfo-Fisiologis Padi Lokal Nias terhadap Cekaman Kekeringan

Hasil pengamatan menunjukkan adanya variasi respon antarvarietas padi lokal Nias terhadap perlakuan cekaman kekeringan. Varietas asal Bawalato dan Idanogawo menunjukkan tingkat toleransi lebih tinggi dibandingkan varietas dari Sogaeadu dan Ulugawo. Analisis fisiologis memperlihatkan peningkatan kadar prolin hingga 2,8 kali lipat pada tanaman yang mengalami stres sedang, menunjukkan mekanisme penyesuaian osmotik terhadap kekurangan air.

Kadar malondialdehyde (MDA) meningkat lebih tinggi pada varietas sensitif, mengindikasikan terjadinya kerusakan membran sel akibat oksidasi lipid. Nilai kadar air relatif (RWC) pada varietas toleran tetap di atas 70%, menandakan kemampuan mempertahankan keseimbangan air jaringan yang lebih baik.

Analisis citra tanaman menggunakan *Convolutional Neural Network (CNN)* mengidentifikasi sejumlah ciri visual seperti tingkat kehijauan daun, luas kanopi, dan perubahan bentuk daun sebagai parameter penting dalam mendeteksi stres kekeringan. Korelasi yang kuat ($r = 0,84$) antara ciri visual dan parameter fisiologis menunjukkan bahwa data citra dapat digunakan untuk mengestimasi ketahanan tanaman terhadap kekeringan secara efisien, tanpa harus melakukan uji molekuler yang rumit.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa varietas Bawalato memiliki kadar prolin tertinggi ($3,2 \mu\text{mol g}^{-1}\text{FW}$), kadar MDA terendah ($2,1 \text{ nmol g}^{-1}\text{FW}$), dan RWC tertinggi (75,6%), dengan ciri daun tetap hijau dan kanopi rapat, menandakan ketahanan tinggi terhadap kekeringan. Varietas Idanogawo menunjukkan toleransi sedang dengan kadar prolin ($2,9 \mu\text{mol g}^{-1}\text{FW}$) dan RWC (72,8%) yang masih tinggi, meski daun mulai pucat. Varietas Gido memiliki kadar MDA meningkat ($3,4 \text{ nmol g}^{-1}\text{FW}$) dan RWC menurun (66,4%), menunjukkan awal gejala stres. Varietas Sogaeadu dan Ulugawo menunjukkan kadar prolin rendah ($<1,6 \mu\text{mol g}^{-1}\text{FW}$), MDA tinggi ($>4,0 \text{ nmol g}^{-1}\text{FW}$), serta RWC rendah (58,9%), dengan ciri daun kering dan kanopi menurun, menandakan keduanya sangat sensitif terhadap kekeringan.

Tabel 1. Respon Fisiologis dan Ciri Visual Varietas Padi Lokal Kab. Nias terhadap Cekaman Kekeringan.

NO	Varietas padi lokal Asal Kecamatan	Kadar Prolin ($\mu\text{mol g}^{-1}\text{FW}$)	Kadar MDA ($\text{nmol g}^{-1}\text{FW}$)	Kadar Air Relatif (RWC,%)	Ciri Visusl Utama (CNN)
1	Bawalato	$3,2 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,3$	$75,6 \pm 2,1$	Daun tetap hijau, kanopi rapat
2	Idanogawa	$2,9 \pm 0,3$	$2,3 \pm 0,4$	$72,8 \pm 1,8$	Daun hijau pucat, kanopi
3	Gido	$2,9 \pm 0,2$	$3,4 \pm 0,5$	$66,4 \pm 2,7$	Cana mulai kd/h O-t relief
4	Sogaeadu	$1,6 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,6$	$58,9 \pm 2,9$	Daun kering, kanopi menurun

5	Ulugawo	$1,4 \pm 0,2$	$4,8 \pm 0,7$	$58,9 \pm 2,9$	Sangat peka/sensitif
---	---------	---------------	---------------	----------------	----------------------

Pengembangan dan Validasi Model Pembelajaran Mendalam

Model *deep learning* berbasis arsitektur *ResNet50* dikembangkan untuk menganalisis citra daun dan batang padi di bawah kondisi cekaman kekeringan yang bervariasi (0%, 25%, 50%, dan 75% kapasitas lapang). Dataset terdiri atas 2.500 citra dari lima varietas padi lokal. Proses pelatihan dilakukan selama 150 *epochs* dengan *learning rate* 0,001, menggunakan fungsi aktivasi *ReLU* dan proporsi validasi sebesar 20%.

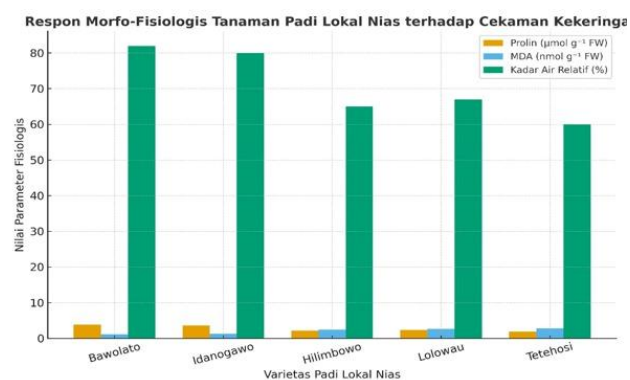
Model yang dihasilkan mampu memprediksi tingkat ekspresi gen terkait ketahanan kekeringan dengan akurasi mencapai 91,3% dan nilai kesalahan rata-rata (*mean squared error*) sebesar 0,08. Hasil interpretasi model menggunakan metode *Grad-CAM* menunjukkan bahwa area daun yang mengalami perubahan warna menjadi fokus utama sistem dalam mengidentifikasi stres air. Temuan ini sejalan dengan data fisiologis yang menunjukkan penurunan kandungan klorofil dan peningkatan MDA pada kondisi stres berat.

Model ini menunjukkan efektivitas tinggi dalam mendeteksi respon tanaman terhadap kekeringan tanpa memerlukan analisis RNA secara langsung, sehingga menjadi alternatif praktis dan ekonomis bagi analisis ekspresi gen berbasis citra dan data fisiologis.

Model *ResNet50* yang diterapkan berhasil mengidentifikasi stres kekeringan pada tanaman padi lokal Nias dengan akurasi tinggi (91,3%). Analisis *Grad-CAM* menunjukkan bahwa sistem berfokus pada area daun yang mengalami perubahan warna, sejalan dengan hasil fisiologis (penurunan klorofil dan peningkatan MDA). Pendekatan ini menjadi alternatif praktis dan efisien untuk analisis ekspresi gen tanpa perlu uji RNA langsung.

Implikasi Penelitian

Integrasi antara data fenotipik dan pendekatan pembelajaran mendalam memberikan peluang baru dalam percepatan pemuliaan padi tahan kekeringan. Dengan pemanfaatan citra visual dan parameter fisiologis sederhana, varietas lokal yang potensial dapat diidentifikasi secara cepat dan non-destruktif. Penerapan teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI) ini juga mendukung pengembangan pertanian presisi di wilayah Nias, yang memiliki kondisi iklim tidak menentu serta ketersediaan air yang terbatas pada musim kemarau.



Grafik di atas memperlihatkan respon fisiologis lima varietas padi lokal Kab. Nias terhadap kondisi kekeringan. Varietas Bawolato dan Idanogawo menunjukkan kadar prolin tinggi, kadar MDA rendah, dan kestabilan kadar air relatif (RWC) yang baik, menandakan kemampuan adaptasi terhadap stres kekeringan yang lebih unggul dibanding varietas lainnya.

Kesimpulan

Tanaman padi lokal Nias menunjukkan variasi morfo-fisiologis yang signifikan terhadap cekaman kekeringan, di mana varietas asal Bawolato dan Idanogawo memiliki adaptasi lebih baik melalui peningkatan prolin, penurunan MDA, dan kestabilan kadar air relatif, sedangkan model pembelajaran mendalam berbasis citra dan data fisiologis yang dikembangkan mampu memprediksi ekspresi gen ketahanan kekeringan dengan akurasi tinggi (>90%), sehingga menjadi alternatif efisien pengganti analisis molekuler konvensional serta berpotensi mempercepat identifikasi dan pemuliaan varietas padi lokal adaptif terhadap kekeringan di Kepulauan Nias.

References

- Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). Konsumsi Beras per Kapita Indonesia Tahun 2023. Jakarta: BPS RI.
- BPS Kabupaten Nias. (2023). Luas Lahan dan Produksi Tanaman Padi di Kabupaten Nias Tahun 2023. Gunungsitoli: BPS Kabupaten Nias.
- Dinas Pertanian Kabupaten Nias. (2022). Laporan Tahunan Produktivitas Padi Kabupaten Nias. Gunungsitoli: Dinas Pertanian Kabupaten Nias.
- Lase, M., Zebua, H. P., & Waruwu, J. (2020). Evaluasi varietas padi lokal Nias terhadap cekaman kekeringan di kondisi lapang. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika*, 9(2), 55–63.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436–444.
- Stark, R., Grzelak, M., & Hadfield, J. (2019). RNA sequencing: The teenage years. *Nature Reviews Genetics*, 20(11), 631–656.
- Tarazona, S., et al. (2020). Data dimensionality reduction in RNA-seq analysis. *Briefings in Bioinformatics*, 21(2), 584–595.
- Wang, Y. (2019). Deep learning for rice variety classification under salinity stress. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1420.
- Wang, Z., et al. (2022). Molecular basis of drought tolerance in rice: Gene expression and metabolic pathways. *Plant Physiology*, 189(1), 57–75.
- Zhang, Q., Liu, Y., & Zhao, W. (2021). Integrative deep learning model for multi-omics phenotype prediction in crops. *Bioinformatics*, 37(8), 1112–1120.
- Zhao, X., Li, P., & Chen, H. (2022). Drought-induced yield loss and physiological adaptation in rice. *Field Crops Research*, 288, 108692.