

## Perubahan Karakter Agronomi, Fisiologi, dan Biokimia pada Beberapa Varietas Tebu Selama Cekaman Kekeringan

### *Agronomic and Physiological Characteristics Changes of Several Sugarcane Varieties During Drought Stress*

Muslimah Arniyanti<sup>1</sup>, Risky Mulana Anur<sup>2</sup>, Bambang Sugiharto<sup>3,4\*</sup>, Tri Handoyo<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Magister Bioteknologi, Fakultas Pascasarjana, Universitas Jember, Jember, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember, Jember, Indonesia

<sup>3</sup>Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember, Jember, Indonesia

<sup>4</sup>UPA. Pengelolaan Limbah dan Laboratorium Terpadu, Universitas Jember, Jember, Indonesia

\*Penulis untuk korespondensi E-mail: [sugiharto.fmipa@unej.ac.id](mailto:sugiharto.fmipa@unej.ac.id)

**Diajukan:** 31 Oktober 2025 **Diterima:** 16 Desember 2025 **Dipublikasi:** 28 Februari 2026

#### ABSTRACT

*Climate change in Indonesia has led to an increase in abiotic stress, particularly drought, which significantly affects sugarcane productivity. This research was conducted from 2024 to 2025 at the Laboratory of Molecular Biology and Biotechnology, Waste Management Unit, and Integrated Laboratory, University of Jember. The aim of this study was to evaluate the agronomic, physiological, and biochemical responses of five sugarcane varieties under drought stress conditions. The results showed that drought stress had varying impacts depending on the tolerance of each variety. The drought-tolerant transgenic variety (NXI4T) exhibited more stable responses, as indicated by lower drought and leaf rolling scores, higher soil water content (SWC) and relative water content (RWC), and relatively stable levels of chlorophyll, phenolics, and flavonoids. In addition, lower H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation and a stronger root system supported better adaptation to drought conditions.*

**Keywords:** agronomy; antioxidants; drought; sugarcane; varieties

#### ABSTRAK

Perubahan iklim yang terjadi di Indonesia menyebabkan peningkatan cekaman abiotik, terutama kekeringan, yang berdampak pada produktivitas tanaman tebu. Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober tahun 2024 hingga Mei 2025 di Laboratorium Biologi Molekuler dan Bioteknologi, UPA. Pengelolaan Limbah, dan Laboratorium Terpadu Universitas Jember. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi respons agronomi, fisiologis, dan biokimia dari lima varietas tebu terhadap cekaman kekeringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cekaman kekeringan memberikan dampak yang berbeda tergantung pada ketahanan varietas. Varietas transgenik tahan kekeringan (NXI4T) menunjukkan respons yang lebih stabil, ditunjukkan melalui skor kekeringan dan lengkung daun yang lebih rendah, kadar air media (KAM) dan kadar air relatif (KAR) yang lebih tinggi, serta kandungan klorofil, fenolik, dan flavonoid yang relatif stabil. Selain itu, akumulasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> lebih rendah dan sistem perakarannya lebih kuat, mendukung kemampuan adaptasi terhadap kekeringan.

**Kata kunci:** agronomi; antioksidan; kekeringan; tebu; varietas

## PENDAHULUAN

Perubahan lahan produktif menjadi lahan marginal akibat alih fungsi lahan dan degradasi lingkungan mendorong perlunya optimalisasi tanaman yang mampu tumbuh pada kondisi sub-optimal (Arvianti *et al.*, 2024). Salah satu tanaman yang berpotensi dikembangkan pada lahan marginal adalah tebu yang termasuk kelompok C4 dengan efisiensi fotosintesis, penyerapan air dan nitrogen lebih tinggi dibandingkan tanaman C3 (Verma *et al.*, 2023). Meskipun demikian, adanya cekaman terutama kekeringan akibat perubahan iklim tetap menjadi faktor pembatas produktivitas tebu di Indonesia (Surmaini & Faqih, 2016). Untuk memahami ketahanan tebu terhadap kondisi tersebut, diperlukan kajian perubahan karakter agronomi, fisiologi, dan biokimia (Qin *et al.*, 2021).

Parameter agronomis dan fisiologis merupakan karakter penting dalam mengevaluasi respon tanaman terhadap cekaman kekeringan. Kadar air media (KAM) (*soil water content*) dan Kadar Air Relatif (KAR) (*relative water content*) menjadi indikator hidrasi suatu tanaman (Patanè *et al.*, 2022). Gejala visual seperti penggulungan daun sering dijadikan penanda awal stres kekeringan. Tanaman yang sensitif terhadap kekeringan menunjukkan daun menggulung pada tingkat stres ringan, sedangkan tanaman yang toleran akan muncul gejalanya pada tingkat stres moderat atau berat (Wirojsirasak *et al.*, 2024). Oleh karena itu, skoring lengkung daun maupun skoring kekeringan tanaman dapat menjadi indikator agronomi penting dalam seleksi ketahanan terhadap kekeringan (Fen *et al.*, 2015). Selain itu, sistem perakaran juga berperan dalam adaptasi terhadap kekeringan. Tanaman toleran kekeringan umumnya meningkatkan proporsi biomassa perakaran untuk menunjang penyerapan air selama cekaman kekeringan (Khonghintaisong *et al.*, 2018).

Kandungan *Reactive Oxygen Species* (ROS) meningkat selama tanaman mengalami cekaman kekeringan, sehingga mengganggu kesetimbangan seluler dan berpotensi menyebabkan kerusakan oksidatif (Ahmad *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2017). Hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) sebagai produk dari dismutasi radikal superoksida, akan meningkat tajam ketika tanaman terpapar cekaman kekeringan. Untuk mengurangi dampak tersebut, tanaman memiliki sistem pertahanan antioksidan enzimatis seperti

katalase (CAT) dan peroksidase (POD) yang berperan penting dalam menurunkan akumulasi ROS dan menjaga integritas sel (Ngamhui *et al.*, 2015). Enzim katalase yang berlokasi di peroksisom berfungsi mendekomposisi  $H_2O_2$ , sedangkan  $H_2O_2$  yang terbentuk di kloroplas didegradasi oleh enzim peroksidase (Hajiboland, 2014). Kandungan  $H_2O_2$ , aktivitas peroksidase dan katalase merupakan karakter fisiologi dan biokimia penting yang perlu dikaji pada toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan.

Berdasarkan kajian di atas, penelitian ini bertujuan mengkaji aktivitas enzim antioksidan serta perubahan fisiologis dan agronomis pada beberapa varietas tebu ketika kondisi tercekam kekeringan. Penelitian ini menggunakan lima varietas tebu dengan diskripsi toleransi kekeringan yang berbeda-beda: NX03 dan NX04 sebagai varietas peka, Cenning (CN) sebagai varietas moderat, dan NX14T dan Bululawang (BL) sebagai varietas toleran kekeringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa varietas tebu NX14T dan BL memiliki respon agronomi, fisiologis dan biokimia lebih baik dibandingkan varietas lain dan dikategorikan sebagai varietas toleran kekeringan. Varietas tebu tersebut mampu mempertahankan pertumbuhan dan fungsinya selama periode cekaman kekeringan.

## BAHAN DAN METODE

### *Bahan tanam*

Penelitian menggunakan lima macam varietas tebu NX03, NX04, NX14T, BL, dan CN dengan kategori peka, toleran, dan moderat kekeringan berdasarkan keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia. Bagal masing-masing varietas tebu yang didapat dari PT. Perkebunan Nusantara I (PTPN I) Regional 4 dikecambahkan dan ditumbuhkan pada pot percobaan berisi media pasir sebanyak 6 kg per pot di rumah kaca milik UPA. Pengelolaan Limbah dan Laboratorium Terpadu, Universitas Jember pada Oktober 2024 hingga Mei 2025. Setiap perlakuan dilakukan pengulangan sejumlah tiga tanaman dengan total tanaman yang digunakan dalam penelitian ini adalah 45 tanaman (5 varietas, 3 perlakuan cekaman, 3 ulangan tanaman). Pemeliharaan tanaman dilakukan dengan penyiraman setiap hari dan pemupukan urea-NPK (1:1) seminggu sekali hingga satu minggu sebelum dilakukan

perlakuan cekaman. Tanaman tebu ditumbuhkan hingga 60 hari (2 bulan), untuk kemudian penyiraman dihentikan sebagai perlakuan cekaman kekeringan selama 0 hari, 4 hari, dan 8 hari. Pengamatan karakter agronomi, fisiologi, dan biokimia dilakukan pada saat sebelum (0 hari) dan selama cekaman kekeringan (4 hari dan 8 hari).

### **Pengamatan karakter agronomi**

Pengamatan agronomi dilakukan dengan pengamatan tinggi tanaman, skoring lengkung daun, dan morfologi diameter perakaran tanaman selama cekaman kekeringan. Tinggi tanaman diamati dengan mengukur tinggi tanaman pada saat sebelum dan selama cekaman kekeringan, mulai dari pangkal batang sampai titik tumbuh daun. Analisa skoring kekeringan dan lengkung daun tebu dilakukan dengan acuan penelitian oleh Wirojsirasak *et al.*, 2024. Pengamatan lengkung daun dan skoring kekeringan dilakukan dengan memotong daun tanaman tebu sekitar 0,5 cm untuk kemudian dibandingkan dengan skoring lengkung daun (1-5). Skor satu (1) menampakkan daun tebu yang datar, skor dua (2) menampakkan daun yang ujungnya sedikit melengkung ke dalam, skor tiga (3) daun mulai melengkung mendekati tulang daun, skor empat (4) menampakkan daun menggulung, skor 5 menampakkan daun sangat menggulung di dekat tulang daun. Analisa skoring kekeringan tanaman dilakukan dengan mengamati morfologi tanaman seperti jumlah daun yang menguning atau mati untuk kemudian dibandingkan gejalanya dan dilakukan skoring (1-10) berdasarkan tabel tingkat keparahan daun (Fen *et al.*, 2015).

Pengamatan perakaran tebu dilakukan pada satu tanaman dari tiga tanaman ulangan disetiap varietasnya melalui pemisahan perakaran dengan cara pencabutan, didokumentasikan dengan pengambilan foto, dan kemudian analisa panjang dan diameter perakaran dilakukan dengan menggunakan aplikasi *software* SmartRoot (Lobet *et al.*, 2011; Buqori *et al.*, 2025). Pengambilan sampel akar pada hari ke-0 dilakukan dengan bantuan penyiraman air untuk pemisahan akar dari media. Namun pada hari ke-4 dan ke-8 perlakuan kekeringan, penyiraman tidak dilakukan untuk menjaga kondisi kadar air sesuai perlakuan. Kondisi ini menyebabkan sistem perakaran lebih rapuh sehingga terdapat resiko sebagian akar halus terputus selama pemisahan.

### **Pengamatan karakter fisiologi dan biokimia**

Analisa Kadar Air Media (KAM) dan Kadar Air Relatif (KAR) dilakukan berdasarkan metode (Wirojsirasak *et al.*, 2024). Analisa KAM dilakukan dengan mengambil tanah sebanyak 20 gram sampai kedalaman tanah  $\pm$  10 cm sebagai berat segar (BS). Tanah selanjutnya dikeringkan dengan oven pada suhu 80°C sampai kering selama 72 jam, dan kemudian ditimbang sebagai berat kering konstan (BK). Perhitungan Kadar Air Media (KAM) dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut (Wirojsirasak *et al.*, 2024):

$$\text{KAM (\%)} = \left[ \frac{((\text{BS} - \text{BK}))}{\text{BS}} \right] \times 100$$

Analisa KAR dilakukan dengan memotong daun sepanjang 5 cm kemudian ditimbang sebagai berat segar (BS). Daun selanjutnya direndam selama 24 jam dalam akuades dan ditimbang kembali sebagai berat turgor (BT). Selanjutnya daun dikeringkan menggunakan oven 80°C selama 48 jam untuk kemudian ditimbang sebagai berat kering (BK). Perhitungan Kadar Air Relatif (KAR) dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut (Wirojsirasak *et al.*, 2024):

$$\text{KAR (\%)} = \left[ \frac{((\text{BS} - \text{BK}))}{((\text{BT} - \text{BK}))} \right] \times 100$$

Pengukuran aktivitas enzim dilakukan dengan ekstraksi protein menggunakan daun tebu muda yang sudah berkembang penuh berdasarkan metode (Anur *et al.*, 2020). Sebanyak 3 gram daun tebu digerus menggunakan nitrogen cair sampai halus, ditambahkan 3 kali volume buffer ekstraksi (50 mM Mops-NaOH, 10 mM MgCl<sub>2</sub>, 1 mM EDTA, pH 7.5), dan setelah disentrifugasi 12.000 rpm, 4°C, selama 10 menit, bagian yang larut (supernatant) dipisahkan. Supernatan yang telah dipisahkan ini kemudian disaring menggunakan kolom sephadex G-25, dan filtrat yang dihasilkan digunakan untuk menentukan aktivitas enzim. Kandungan total protein ditentukan dengan metode Bradford menggunakan spektrofotometer panjang gelombang 595 nm.

Uji aktivitas katalase dilakukan berdasarkan metode Joseph *et al.*, 2021 menggunakan larutan substrat yang mengandung 0,036% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dalam 50 mM buffer potassium fosfat pH 7 dengan nilai absorbansi berkisar antara 0,48 – 0,52 pada panjang gelombang 240 nm. Analisa dilakukan dengan menambahkan 33  $\mu$ L sampel protein kedalam 967  $\mu$ L larutan substrat, kemudian perubahan

absorbansi diukur pada panjang gelombang 240 nm selama 3 menit. Aktivitas enzim katalase dihitung berdasarkan metode Joseph et al., 2021. Uji aktivitas peroksidase dilakukan berdasarkan metode Yang et al. 2019. Sebanyak 16,6 µL sampel larutan protein (supernatant) ditambahkan dengan 1 mL koktail yang mengandung 5% pyrogallol, 0,5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 0,1 M buffer potassium sulfate pH 6, dan H<sub>2</sub>O. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 420 nm selama 5 menit.

Kandungan klorofil diukur berdasarkan metode (Huang et al., 2023) dengan sedikit modifikasi. Sebanyak 0,1 gram daun digerus dengan nitrogen cair kemudian ditambahkan 3 mL ethanol 96%. Setelah sentrifugasi pada kecepatan 12.000 rpm, 4°C selama 5 menit, sebanyak 200 µL supernatant ditambahkan 1 mL ethanol dingin 96% dan diinkubasi selama 1 jam pada suhu 4°C. Pengukuran klorofil dilakukan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 665 nm dan 649 nm. Kandungan total klorofil dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Klorofil a (mg g}^{-1}\text{)} = (13,95 \times A_{665}) - (6,88 \times A_{649})$$

$$\text{Klorofil b (mg g}^{-1}\text{)} = (24,96 \times A_{649}) - (7,32 \times A_{665})$$

$$\text{Total klorofil (mg g}^{-1}\text{)} = \text{klorofil a} + \text{klorofil b}$$

Kandungan hidrogen peroksidase (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) dan malondialdehida (MDA) diukur berdasarkan metode (Sarker dan Oba, 2018). Sebanyak 0,3 gram daun digerus menggunakan nitrogen cair, kemudian digerus menggunakan 3 mL 10% TCA, dan setelah sentrifugasi 12.000 rpm, 4°C, selama 10 menit, supernatant digunakan untuk pengukuran kandungan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dan MDA. Sebanyak 0,2 mL supernatant ditambahkan 0,8 mL 10 mM buffer kalium fosfat pH 7 dan 1 mL 1 M KI. Setelah inkubasi 1 jam pada kondisi gelap selanjutnya diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 390 nm. Kandungan peroksida ditentukan berdasarkan nilai hasil kurva standar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Sedangkan analisa MDA diukur berdasarkan metode, yaitu sebanyak 0,8 mL supernatant ditambahkan 0,4 mL larutan *thiobarbituric acid* (TBA) 0,67%. Sampel dipanaskan menggunakan *dry block* pada suhu 90°C selama 3 menit kemudian didiamkan suhu ruang selama 3 menit. Sampel diukur nilai absorbansinya menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 450 nm, 532 nm, dan 600 nm.

Kandungan MDA ditentukan berdasarkan metode (Wang et al., 2022) menggunakan rumus  $\text{CMDA } (\mu\text{mol/L}) = 6,45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0,56 \times A_{450}$ .

Kandungan senyawa fenolik ditentukan berdasarkan metode (Sutuliené et al., 2022). Sebanyak 0,3 gram daun direndam (maserasi) dalam 5 ml methanol 80% selama 24 jam. Kandungan total fenolik ditentukan menggunakan 250 µL larutan maserasi dengan menambahkan 250 µL reagen folin-ciocalteu 10%, 500 µL Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, dan 2 mL akuades, kemudian diinkubasi selama 20 menit dalam kondisi gelap. Kandungan total fenolik diukur dengan menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 765 nm.

Analisis data dilakukan dengan menggunakan ANOVA (*Analysis of Varians*) yang kemudian apabila terdapat beda nyata akan dilakukan uji lanjut DMRT dengan signifikansi 5% antar varietas terhadap hari perlakuan cekaman.

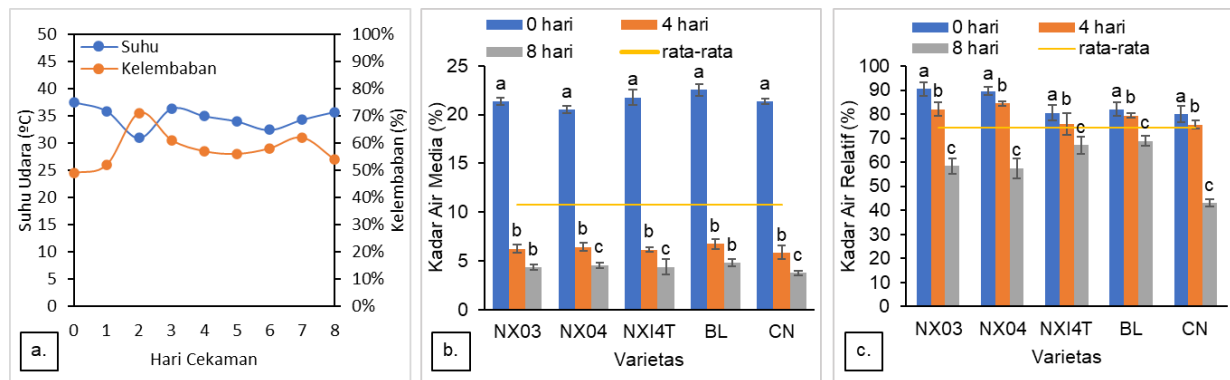
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Cekaman kekeringan pada tanaman tebu dilakukan pada dalam rumah kaca dengan pengukuran suhu udara dan kelembaban udara seperti disajikan pada Gambar 1a. Berdasarkan hasil pengamatan diketahui bahwa suhu rata-rata yang tercatat yaitu 34°C dengan kelembaban rata-rata yaitu 58%. Penghentian pemberian air menyebabkan terjadinya pengurangan kandungan air pada media tumbuh dan tanaman. Kandungan air media (KAM) secara nyata menurun dari kondisi kapasitas lapang (sekitar 17,16%) sampai dengan kondisi cekaman kekeringan air dengan KAM sekitar 3,76 – 4,82% pada 8 hari cekaman tanpa pemberian air pada semua varietas tebu. Penurunan ketersediaan air menyebabkan penurunan kandungan air relatif (KAR) secara nyata pada jaringan tanaman pada saat 8 hari sesudah cekaman kekeringan. Namun demikian, nilai KAR pada varietas BL dan NX14T (68,88 – 67,03%) lebih tinggi dibandingkan KAR pada varietas tebu lainnya yaitu NX03, NX04, dan CN (58,439 – 43,148%). Hal itu menunjukkan bahwa varietas BL dan NX14T sesuai dengan karakternya lebih tahan terhadap cekaman kekeringan. KAR dapat menjadi acuan ketahanan suatu varietas ketika tanaman terpapar cekaman kekeringan dan menjadi indikator hidrasi daun (Kumar et al., 2021).

Nilai KAR pada tanaman juga merupakan pertahanan tanaman untuk mengurangi tekanan

turgor, dan mengurangi penyerapan air oleh perakaran. Tanaman dengan karakter lebih toleran terhadap cekaman kekeringan akan memiliki nilai KAR yang lebih tinggi, karena mampu menekan peningkatan potensi osmotik selular dan memungkinkan akar menyerap air lebih baik untuk menjaga turgiditas tanaman dan hidrasi tanaman (Sarker & Oba, 2018). Selain itu, penurunan KAM merepresentasikan laju transpirasi yang terjadi pada tanaman, dimana nilai KAM menurun drastis pada saat cekaman 4 hari dan menurun perlahan sesudahnya sampai cekaman kekeringan 8 hari. Hal ini menunjukkan

bahwa transpirasi berlangsung cepat sampai cekaman hari ke 4, tetapi transpirasi selanjutnya pada hari ke 8 lebih kecil karena kandungan air sudah sangat rendah. Secara keseluruhan penurunan kadar air tanah tidak berbeda nyata antar varietas uji, sehingga pengamatan KAM tidak bisa digunakan sebagai toleransi tanaman terhadap cekaman kekurangan air pada tanaman tebu. Sebaliknya, nilai KAR dapat berkorelasi dengan toleransi terhadap cekaman kekeringan pada tanaman sesuai yang dinyatakan oleh penelitian sebelumnya (Wirojsirasak *et al.*, 2024).



Gambar 1. Pengamatan meteorologi (suhu dan kelembaban), Kadar Air Media (KAM) dan Kadar Air Relatif (KAR) pada tanaman tebu selama cekaman kekeringan. (a) perubahan suhu dan kelembaban selama cekaman kekeringan, (b) KAM pada jaringan daun dan (c) KAR media tumbuh pada varietas tebu yang diuji. Perbedaan notasi huruf kecil merepresentasikan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ) antar varietas terhadap hari perlakuan

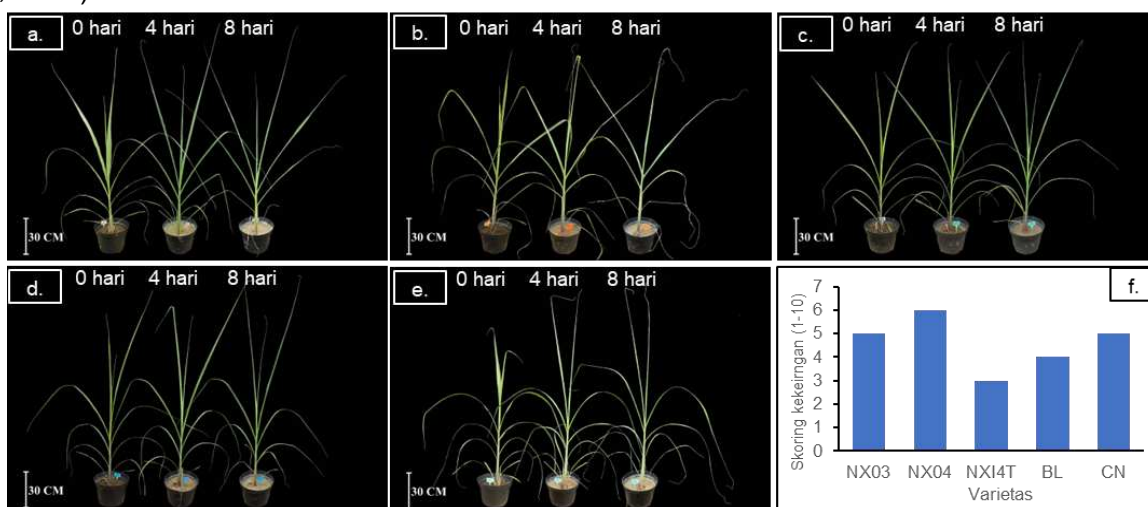
Tabel 1. Pengamatan agronomi tanaman meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas area daun

Varietas	Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun	Luas area daun (cm <sup>2</sup> )
NX03	0 Hari	35,00±1,53 <sup>c</sup>	9	301,635±19,80 <sup>b</sup>
	4 Hari	37,00±1,26 <sup>b</sup>	10	323,304±6,82 <sup>a</sup>
	8 Hari	41,17±1,59 <sup>a</sup>	10	327,936±8,86 <sup>a</sup>
NX04	0 Hari	44,33±0,44 <sup>c</sup>	9	301,872±12,61 <sup>b</sup>
	4 Hari	47,67±0,33 <sup>b</sup>	9	321,432±6,90 <sup>a</sup>
	8 Hari	49,33±0,17 <sup>a</sup>	10	331,968±4,32 <sup>a</sup>
NX14T	0 Hari	39,50±1,76 <sup>b</sup>	9	257,466±7,25 <sup>b</sup>
	4 Hari	42,50±0,29 <sup>a</sup>	9,	273,192±6,45 <sup>b</sup>
	8 Hari	43,23±0,37 <sup>a</sup>	10	303,216±12,84 <sup>a</sup>
Bululawang	0 Hari	38,67±0,17 <sup>c</sup>	9	262,992±14,20 <sup>b</sup>
	4 Hari	42,17±2,19 <sup>b</sup>	10	290,724±35,04 <sup>a</sup>
	8 Hari	46,33±1,36 <sup>a</sup>	10	307,776±17,63 <sup>a</sup>
Cening	0 Hari	40,83±2,09 <sup>b</sup>	9	284,496±11,46 <sup>c</sup>
	4 Hari	45,33±1,67 <sup>a</sup>	10	325,644±9,47 <sup>b</sup>
	8 Hari	46,33±1,01 <sup>a</sup>	10	349,836±17,92 <sup>a</sup>

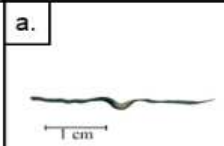
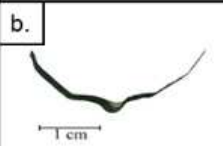


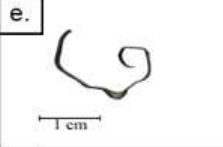

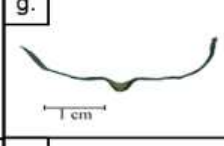
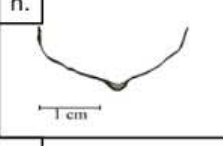

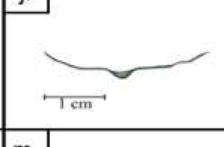
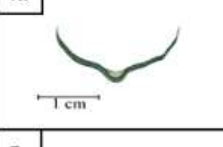

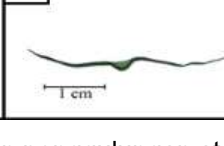
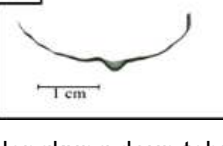
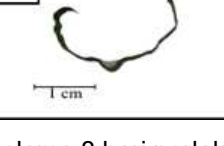
Catatan: Perbedaan notasi kecil merepresentasikan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ) antar varietas terhadap hari perlakuan, sedangkan notasi besar merepresentasikan perbedaan antar hari perlakuan terhadap seluruh varietas

Selama perlakuan, seluruh varietas tebu masih menunjukkan pertumbuhan berupa peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas area daun meskipun berada dalam kondisi tercekam (Tabel 1). Respon agronomis ke-5 varietas tampak beragam dilihat dari pola pertahanan selama 8 hari cekaman kekeringan. Seluruh varietas tebu pada hari ke-0 tampak segar dan hijau. Tanaman pada hari ke-4 cekaman menunjukkan gejala stres berupa ujung daun mengering, daun menguning, dan pada beberapa varietas mulai terjadi penggulungan daun. Varietas NX03 dan NX04 menunjukkan gejala paling parah dengan lebih banyak daun menguning dibandingkan varietas lain. Setelah 8 hari cekaman, NX03 dan NX04 mengalami pengeringan dan penggulungan hampir setengah jumlah daun, sedangkan Bululawang dan Cening mengalami gejala lebih ringan. Varietas NXI4T memperlihatkan ketahanan yang lebih baik, dengan gejala terbatas pada ujung daun mengering dan hanya sedikit daun yang menggulung. Secara umum, daun yang menguning pada hari ke-4 berkembang menjadi kering pada hari ke-8 cekaman. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, didapatkan hasil skoring kekeringan dengan varietas NXI4T memiliki kerusakan paling rendah (skor 3) sedangkan varietas NX04 memiliki kerusakan paling tinggi (skor 6) yang ditunjukkan pada Gambar 2. Skoring kekeringan merupakan penilaian visual untuk mengevaluasi keparahan tanaman yang terpengaruh oleh kekeringan (Fen *et al.*, 2015).

Respon spesifik tanaman tebu terhadap cekaman kekeringan dapat ditunjukkan melalui fenomena daun menggulung. Daun menggulung merupakan bentuk respon tanaman guna menghindari cahaya matahari langsung dan transpirasi berlebih akibat adanya cekaman kekeringan (Wirojsirasak *et al.*, 2024). Intensitas penggulungan daun tampak berbeda antar varietas, varietas rentan yaitu NX03 dan NX04 menunjukkan penggulungan yang lebih parah sedangkan varietas toleran yaitu NXI4T dan BL tampak hanya sedikit penggulungan. Berdasarkan pengamatan penggulungan daun yang telah diamati mulai hari ke-0 perlakuan, tampak perubahan penggulungan daun pada varietas NXI4T lebih ringan dibandingkan penggulungan daun yang terjadi pada varietas BL dan CN, sehingga skor penggulungan daun varietas BL dan CN satu tingkat lebih tinggi (skor 3) dibandingkan NXI4T (skor 2) (Gambar 3.). Penggulungan daun tebu yang ringan dinyatakan dengan skor rendah, sedangkan penggulungan daun lebih parah mempunyai skor yang tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya, Dimana tingkat toleransi tanaman terhadap kekeringan ditunjukkan oleh skor penggulungan daun yang lebih rendah (Wirojsirasak *et al.*, 2024). Cekaman kekeringan secara nyata berpengaruh pada perubahan menggulung daun padi, dengan nilai yang paling baik menunjukkan indikasi toleransi terhadap kekeringan (Fen *et al.*, 2015).



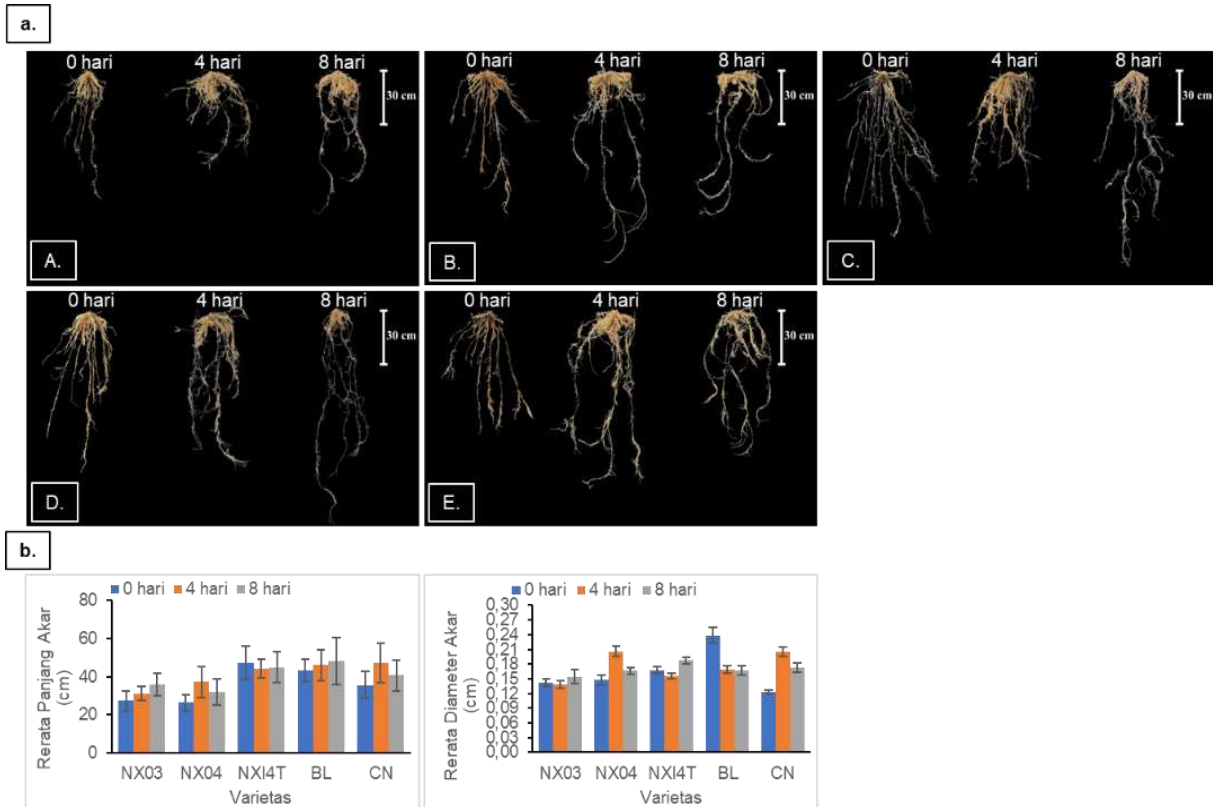
Gambar 2. Kondisi morfologi ke 5 varietas tebu pada saat sebelum (0 hari) dan sesudah cekaman kekeringan 4 dan 8 hari. Selama cekaman kekeringan dilakukan pengamatan pertumbuhan dan toleransi terhadap kekeringan. Foto a – f berturut-turut adalah a. varietas NX03, b. varietas NX04, c. varietas NXI4T, d. varietas bululawang, e. varietas cening, f. skoring kekeringan tanaman.

Varietas	0 hari	4 hari	8 hari	Skor (1-5)
NX03	a. 	b. 	c. 	4
NX04	d. 	e. 	f. 	5
NXI4T	g. 	h. 	i. 	2
BL	j. 	k. 	l. 	3
CN	m. 	n. 	o. 	3

Gambar 3. Pengamatan penggulungan atau lengkung daun tebu selama 8 hari perlakuan cekaman kekeringan (kiri) dan skoring lengkung daun (kanan). Dari kiri ke kanan adalah sebelum (0 hari), sesudah cekaman kekeringan 4 dan 8 hari untuk varietas tebu NX03 (a – c), NX04 (d – f), NXI4T (g – i), bululawang (j – l), cening (m – o).

Adaptasi terhadap cekaman kekeringan tidak hanya terlihat pada organ tanaman bagian atas, tetapi juga pada sistem perakaran. Pengamatan terhadap sistem perakaran menunjukkan adanya variasi panjang dan diameter akar antar varietas (Gambar 4a). Hal tersebut mengindikasikan adanya perbedaan strategi tanaman dalam memperoleh air dari lapisan tanah yang lebih dalam. Berdasarkan pengamatan menggunakan *software* SmartRoot, tampak varietas peka (NX03 dan NX04) memiliki panjang dan diameter akar paling rendah, diikuti oleh varietas moderat CN selama cekaman kekeringan (Gambar 4b). Menariknya pada hari ke-4 perlakuan cekaman, nilai rata-rata panjang akar NX04 tampak lebih rendah dibandingkan NXI4T pada Gambar 4.b dan berbeda dengan visual perakarannya pada Gambar 4.a. Hal tersebut dikarenakan walaupun NXI4T tampak lebih pendek secara visual tetapi memiliki

perakaran primer dengan panjang yang hampir seragam dibandingkan NX04 yang perakaran primernya memiliki panjang yang tidak seragam. Sehingga berdasarkan analisa yang ada, varietas tebu tergolong toleran cekaman kekeringan yaitu NXI4T dan BL memiliki panjang akar lebih baik, walaupun terjadi penurunan diameter perakaran pada varietas BL selama cekaman kekeringan hari ke-4 dan ke-8. Menariknya varietas CN yang dikelompokkan sebagai varietas moderat kekeringan secara nyata meningkatkan diameter akar pada hari ke-4, dan mengalami penurunan pada hari ke-8. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem perakaran varietas NXI4T lebih toleran terhadap cekaman kekeringan. Selain menjadi indikator ketahanan terhadap cekaman kekeringan, sistem perakaran tebu yang lebih baik juga mengindikasikan ketahanan tebu dalam mempertahankan konduktansi stomata (Namwongsa *et al.*, 2019).

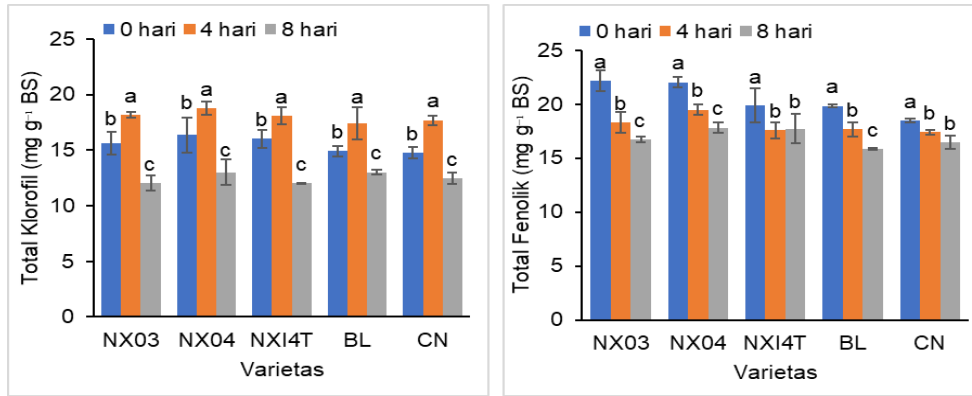


Gambar 4. Pengamatan perakaran selama perlakuan cekaman. Dengan keterangan: a. dokumentasi sistem perakaran (A. varietas NX03, B. varietas NX04, C. varietas NXI4T, D. varietas BL, E. varietas CN), dan b. pengamatan rerata panjang akar (kiri) dan rerata diameter akar (kanan)

Secara umum, cekaman kekeringan pada tanaman tebu memicu pemanjangan sistem perakaran sebagai upaya memperoleh air selama cekaman kekeringan. Mekanisme ini memungkinkan varietas yang toleran tetap mampu memenuhi kebutuhan air meskipun berada dalam kondisi kekeringan (Khonghintaisong *et al.*, 2018). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa varietas toleran kekeringan walaupun mengalami penurunan diameter perakaran tetapi memiliki sistem perakaran yang lebih panjang sebagai bentuk adaptasi pertahanan penyerapan air dari lapisan tanah yang lebih dalam, seperti terjadi pada tanaman pada tanaman *Pistacia vera* (Osku *et al.*, 2025).

Selain pengaruhnya pada karakter agronomi seperti penggulungan daun dan pemanjangan akar, cekaman kekeringan pada karakter fisiologis seperti proses fotosintesis dan metabolit sekunder. Hasil analisa kandungan pigmen fotosintetik menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan klorofil pada hari ke-4 dan penurunan di hari ke-8 cekaman kekeringan

pada seluruh varietas (Gambar 5). Penurunan pigmen fotosintetik pada hari ke-8 cekaman kekeringan diduga disebabkan oleh oksidasi klorofil akibat radikal bebas serta kerusakan struktur kloroplas, seperti yang terjadi pada tanaman bayam (Sarker & Oba, 2018). Penurunan kandungan klorofil tanaman berpotensi menekan kelebihan eksitasi cahaya dan menurunkan akumulasi ROS, sehingga mencegah kerusakan oksidatif lebih jauh (Khorobrykh *et al.*, 2020). Analisa kandungan senyawa lain yaitu total fenolik menunjukkan penurunan secara nyata pada hampir semua varietas baik hari ke-4 maupun hari ke-8, kecuali varietas NXI4T yang tampak stabil sampai pada hari ke-8 cekaman kekeringan (Gambar 5.). Hasil ini mengindikasikan adanya mekanisme pertahanan metabolit sekunder yang berbeda dibandingkan varietas tebu lainnya. Dalam tanaman, senyawa fenolik yang merupakan antioksidan non-enzimatik berperan menetralkan ROS akibat adanya cekaman (Mohagheghian *et al.*, 2025).



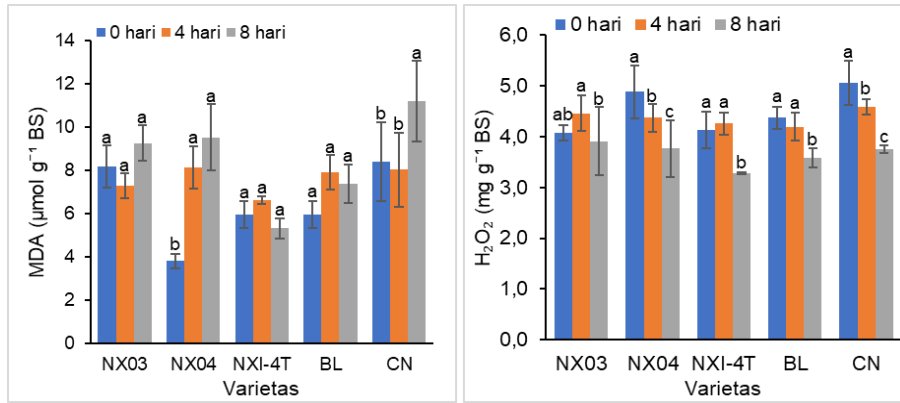
Gambar 5. Kandungan total klorofil (kiri) dan total fenolik (kanan). Perbedaan notasi kecil merepresentasikan perbedaan signifikansi ( $p < 0,05$ ) antar varietas terhadap hari perlakuan

Stres oksidatif merupakan kondisi ketika ROS atau radikal bebas lainnya terbentuk akibat adanya cekaman seperti kekeringan yang kemudian menjadi racun bagi sel. Akibatnya yaitu kerusakan pada asam nukleat, lipid, dan protein sehingga tidak bisa berfungsi dengan baik. Senyawa malondialdehida (MDA) berperan sebagai indikator kerusakan membran akibat oksidasi lipid karena dapat bereaksi dengan asam tiobarbiturat (TBA) menghasilkan produk berwarna yang disebut sebagai zat reaktif asam tiobarbiturat (TBARS) (Gill & Tuteja, 2010; Wang *et al.*, 2022). Hasil analisa menunjukkan bahwa kandungan MDA meningkat utamanya pada hari ke-8 di varietas NX03, NX04, dan CN (Gambar 6). Sementara itu, tren yang berbeda teramati pada NXI4T dan BL. Kedua varietas tersebut tampak terjadi sedikit peningkatan kandungan MDA pada hari ke-4 dan terjadi penurunan MDA pada hari ke-8 cekaman kekeringan. Tren ini mengindikasikan adanya aktivasi sistem antioksidan yang lebih efektif dalam menekan pembentukan radikal bebas dan mencegah kerusakan membrane akibat oksidasi lipid. Hal ini menyatakan bahwa kerusakan membran pada varietas NXI4T dan BL lebih rendah dibandingkan varietas lainnya.

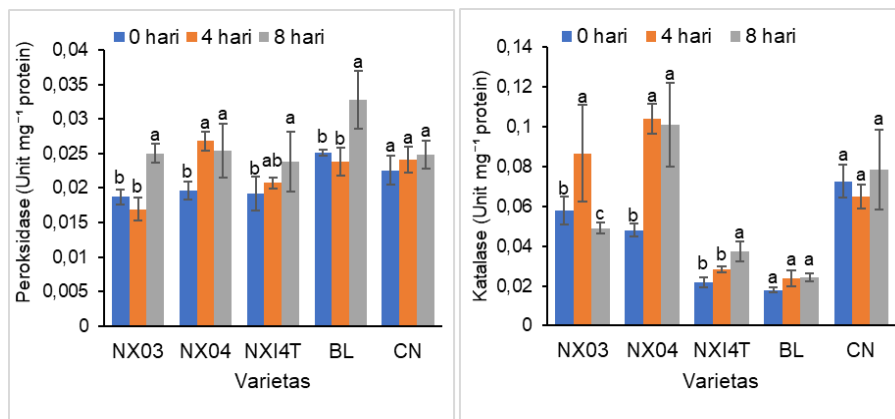
Adanya peningkatan kandungan MDA mencerminkan tingkat kerusakan membran yang lebih besar pada tanaman selama kondisi cekaman kekeringan. Pada tanaman *Pistacia vera* dilaporkan bahwa konsentrasi MDA lebih rendah mengindikasikan ketahanan yang lebih baik terhadap cekaman kekeringan (Osku *et al.*,

2025). Berbeda dengan akumulasi MDA, secara umum terjadi penurunan kandungan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sampai hari ke-8 cekaman kekeringan pada semua varietas tebu yang diuji. Hal ini dimungkinkan karena H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> hanyalah salah satu penyebab kerusakan sel akibat cekaman lingkungan yang kemudian akan diurai oleh enzim antioksidan seperti CAT dan POD.

Respon tanaman tebu dalam mengurai H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> selama adanya cekaman kekeringan dapat dilihat melalui aktivitas enzim antioksidan. Aktivitas enzim antioksidan yaitu peroksidase dan katalase terjadi peningkatan selama cekaman kekeringan hari ke-4 dan ke-8 pada semua varietas tebu (Gambar 7). Akan tetapi respon peningkatan menunjukkan pola yang berbeda antar varietas, aktivitas peroksidase meningkat tajam pada tebu BL dan katalase pada tebu NX04. Rendahnya aktivitas katalase pada varietas tahan cekaman seperti NXI4T dan BL kemungkinan disebabkan tidak adanya peningkatan secara nyata akumulasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> selama cekaman kekeringan (Gambar 6). Selain itu, aktivitas katalase pada tanaman tebu dapat ditekan karena adanya peran enzim antioksidan lain seperti askorbat peroksidase (APX) selama kondisi cekaman kekeringan (Pooja *et al.*, 2020). Kecenderungan ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang melaporkan bahwa cekaman kekeringan dapat meningkatkan ekspresi gen APX (Buqori *et al.*, 2025), termasuk cekaman biotik akibat serangan virus pada tanaman tebu juga dapat meningkatkan ekspresi gen APX (Neliana *et al.*, 2024).



Gambar 6. Hasil analisa MDA (kiri), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (kanan). Perbedaan notasi kecil merepresentasikan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ) antar varietas terhadap hari perlakuan



Gambar 7. Hasil analisa aktivitas enzim peroksidase (kiri) dan katalase (kanan). Perbedaan notasi kecil merepresentasikan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ) antar varietas terhadap hari perlakuan

Secara keseluruhan, NXI4T menunjukkan peningkatan aktivitas enzim katalase dan peroksidase sehingga mengindikasikan tingkat cekaman oksidatif lebih rendah dan adaptasi lebih baik terhadap cekaman kekeringan. Hasil serupa juga ditemukan pada tanaman tomat (Patanè *et al.*, 2022) dan kedelai (Wang *et al.*, 2022) yang melaporkan peningkatan aktivitas enzim antioksidan baik katalase dan peroksidase dan diiringi dengan terjadinya penurunan KAR selama cekaman kekeringan merupakan indikator terhadap toleransi cekaman kekeringan (Kumar *et al.*, 2021; Patanè *et al.*, 2022).

Selain itu, varietas toleran kekeringan NXI4T memiliki sistem perakaran yang lebih siap menghadapi cekaman kekeringan, serta hasil skoring kekeringan dan lengkung daun yang menunjukkan ketahanan varietas tersebut ketika menghadapi cekaman berat. Karakter tersebut konsisten dengan laporan sebelumnya yang menyebutkan bahwa varietas NXI4T memiliki akar yang lebih panjang dan mampu bertahan lebih lama pada cekaman dibandingkan varietas

induknya yaitu BL (Sugiharto, 2018). Dengan demikian hasil penelitian ini memperkuat laporan sebelumnya bahwa ketahanan varietas NXI4T terhadap kekeringan tidak hanya karena senyawa glycine-betaine, namun didukung juga adanya peningkatan aktivitas enzim antioksidan, nilai KAR lebih stabil, dan skoring kekeringan yang lebih rendah.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa respon varietas tebu terhadap cekaman kekeringan berbeda – beda, baik secara agronomi, fisiologi, maupun biokimia. Berdasarkan analisa yang ada, varietas tebu transgenik NXI4T disusul varietas bululawang lebih mampu mempertahankan Kadar Air Relatif (KAR) dan menunjukkan aktivitas enzim antioksidan (CAT dan POD) yang lebih rendah, disertai dengan skor daun menggulung dan kekeringan yang lebih rendah dibandingkan varietas lain. Hal ini mengindikasikan adanya mekanisme toleransi

melalui pemeliharaan status air dan pengurangan kerusakan oksidatif. Sebaliknya varietas NX04 mengalami penurunan KAR yang signifikan, disertai skor daun menggulung dan kekeringan tertinggi, menunjukkan tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap kekeringan.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini turut dibiayai oleh Hibah Pascasarjana dengan nomor kontrak 2839/UN25.3.1/LT2025.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, P., C. A. Jaleel, M. A. Salem, G. Nabi, dan S. Sharma. 2010. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*. 30(3): 161–175. 10.3109/07388550903524243
- Anur, R. M., N. Mufithah, W. D. Sawitri, H. Sakakibara, dan B. Sugiharto. 2020. Overexpression of sucrose phosphate synthase enhanced sucrose content and biomass production in transgenic sugarcane. *Plants*. 9(2): 1–11. 10.3390/plants9020200
- Arvianti, E. Y., N. Reniati, dan T. Yoga. 2024. Menggali Potensi Pemanfaatan Lahan Marginal Menjadi Lahan Produktif dalam Rangka Mempertahankan Ketersediaan Pangan di Masa Mendatang. *SEPA Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian dan Agribisnis*. 21(1): 89–99. 10.20961/sepa.v21i1.64846.
- Buqori, D. M. A. I., B. Sugiharto, Suherman, T. A. Siswoyo, dan K. Hariyono. 2025. Mitigating drought stress by application of drought-tolerant bacillus spp. enhanced root architecture, growth, antioxidant and photosynthetic genes expression in sugarcane. *Scientific Reports*. 15(1): 1–16. 10.1038/s41598-025-89457-4
- Fen, L. L., M. R. Ismail, B. Zulkarami, M. S. A. Rahman, dan M. R. Islam. 2015. Physiological and molecular characterization of drought responses and screening of drought tolerant rice varieties. *Bioscience Journal*. 31(3): 709–718. 10.14393/BJ-v31n3a2015-23461
- Ferreira, T. H. S., M. S. Tsunada, D. Bassi, P. Araújo, L. Mattiello, G. V. Guidelli, G. L. Righetto, V. R. Gonçalves, P. Lakshmanan, dan M. Menossi. 2017. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*. 8(June): 1–18. 10.3389/fpls.2017.01077
- Gill, S. S. dan N. Tuteja. 2010. Plant physiology and biochemistry reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology et Biochemistry*. 48(12): 909–930. 10.1016/j.plaphy.2010.08.016
- Hajiboland, R. 2014. *Reactive Oxygen Species and Photosynthesis*. Elsevier Inc. *Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling*. 10.1016/B978-0-12-799963-0.00001-0
- Huang, C., A. Qin, Y. Gao, S. Ma, Zugui Liu, B. Zhao, D. Ning, K. Zhang, W. Gong, M. Sun, dan Zhandong Liu. 2023. Effects of water deficit at different stages on growth and ear quality of waxy maize. *Frontiers in Plant Science*. 14(January): 1–14. 10.3389/fpls.2023.1069551
- Khonghintaisong, J., P. Songsri, B. Toomsan, dan N. Jongrunklang. 2018. Rooting and physiological trait responses to early drought stress of sugarcane cultivars. *Sugar Tech*. 20(4): 396–406. 10.1007/s12355-017-0564-0
- Khorobrykh, S., V. Havurinne, H. Mattila, dan E. Tyystjärvi. 2020. Oxygen and ros in photosynthesis. *Plants*. 9(1). 10.3390/plants9010091
- Kumar, D., N. Malik, dan R. S. Sengar. 2021. Physio-biochemical insights into sugarcane genotypes under water stress. *Biological Rhythm Research*. 52(1):92–115. 10.1080/09291016.2019.1587838
- Lobet, G., L. Pagès, dan X. Draye. 2011. A novel image-analysis toolbox enabling quantitative analysis of root system architecture. *Plant Physiology*. 157(1): 29–39. 10.1104/pp.111.179895
- Mohagheghian, B., G. Saeidi, dan A. Arzani. 2025. Phenolic compounds, antioxidant enzymes, and oxidative stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under field drought- stress conditions. *BMC Plant Biol*.

- 25(1):709. DOI: 10.1186/s12870-025-06750-0
- Namwongsa, J., N. Jongrunklang, dan P. Songsri. 2019. Genotypic variation in root distribution and physiological responses of sugarcane induced by drought stress. *Sabrao Journal of Breeding and Genetics*. 51(4): 470–493. 10.1101/503912
- Neliana, I. R., W. Soleha, Suherman, N. Darsono, R. Harmoko, W. D. Sawitri, dan B. Sugiharto. 2024. Alteration of photosynthetic and antioxidant gene expression in sugarcane infected by multiple mosaic viruses. *International Journal of Plant Biology*. 15(3): 757–768. 10.3390/ijpb15030055
- Ngamhui, N., N. Tantisuwichwong, S. Roytrakul, Y. J. Zhu, Q. X. Li, dan C. Akkasaeng. 2015. Relationship between drought tolerance with activities of antioxidant enzymes in sugarcane. *Indian Journal of Plant Physiology*. 20(2): 145–150. 10.1007/s40502-015-0155-6
- Osku, M., S. Procino, I. Mascio, M. M. Miazzi, G. A. Vivaldi, D. Vona, V. Fanelli, M. R. Roozban, S. Sarikhani, M. M. Arab, M. Akbari, K. Vahdati, dan C. Montemurro. 2025. Physiological and molecular responses of two contrasting drought resistance pistachio interspecific hybrid rootstocks. *Frontiers in Plant Science*. 16(April). 10.3389/fpls.2025.1515819
- Patanè, C., S. L. Consentino, D. Romano, dan S. Toscano. 2022. Relative water content, proline, and antioxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering. *Plants*. 11. 10.3390/plants11223045
- Pooja, P., A. S. Nandwal, M. Chand, A. Pal, A. Kumari, B. Rani, V. Goel, dan N. Kulshreshtha. 2020. Soil moisture deficit induced changes in antioxidative defense mechanism of sugarcane (*saccharum officinarum*) varieties differing in maturity. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*. 90(3): 507–512. 10.56093/ijas.v90i3.101458
- Qin, C. X., Z. L. Chen, M. Wang, A. M. Li, F. Liao, Y. R. Li, M. Q. Wang, M. H. Long, P. Lakshmanan, dan D. L. Huang. 2021. Identification of proteins and metabolic networks associated with sucrose accumulation in sugarcane (*saccharum* spp. interspecific hybrids). *Journal of Plant Interactions*. 16(1):166–178. DOI: 10.1080/17429145.2021.1912840
- Sarker, U. dan S. Oba. 2018. Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *amaranthus tricolor*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 186(4): 999–1016. 10.1007/s12010-018-2784-5
- Sugiharto, B. 2018. Biotechnology of drought-tolerant sugarcane. *Sugarcane - Technology and Research*. 10.5772/intechopen.72436
- Surmaini, E. dan A. Faqih. 2016. Extreme climate events and their impacts on food crop in Indonesia. *Water*. 1–4.
- Sutulienė, R., K. Laužikė, T. Pukas, dan G. Samuolienė. 2022. Effect of light intensity on the growth and antioxidant activity of sweet basil and lettuce. *Plants*. 11(13). /10.3390/plants11131709
- Verma, K. K., X. P. Song, V. D. Rajput, S. Solomon, Y. R. Li, dan G. P. Rao. 2023. *Agro-Industrial Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress*. 10.1007/978-981-19-3955-6
- Wang, Xiyue, Z. Wu, Q. Zhou, Xin Wang, S. Song, dan S. Dong. 2022. Physiological response of soybean plants to water deficit. *Frontiers in Plant Science*. 12(January). 10.3389/fpls.2021.809692
- Wirojsirasak, W., P. Songsri, N. Jongrunklang, S. Tangphatsornruang, P. Klomsa-ard, dan K. Ukoskit. 2024. Determination of morpho-physiological traits for assessing drought tolerance in sugarcane. *Plants*. 13(8): 1072. 10.3390/plants13081072