

STRATEGI ADAPTASI TANAMAN KARET DALAM MENGHADAPI CEKAMAN KEKERINGAN: SEBUAH TINJAUAN METODE SELEKSI KLON KARET TOLERAN KEKERINGAN

*Rubber Plant Adaptation Strategies for Coping with Drought Stress:
A Review of Drought Tolerant Rubber Clone Selection Methods*

Andi Nur Cahyo

Pusat Penelitian Karet, Jl. Raya Palembang-Pangkalan Balai Km. 29, Sembawa, Banyuasin
30953 Sumatera Selatan
Email: nurcahyo.andi@yahoo.co.uk

Diterima 23 Juli 2025 / Direvisi 24 September 2025 / Disetujui 19 November 2025

Abstrak

Seleksi klon karet toleran kekeringan merupakan salah satu upaya mitigasi dampak pemanasan global yang saat ini sedang terjadi. Pemahaman mengenai mekanisme adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan sangat penting untuk mendukung kegiatan seleksi klon unggul karet. Tulisan ini bertujuan menguraikan parameter-parameter seleksi tanaman karet toleran kekeringan yang berkaitan dengan strategi *drought tolerance* dan *drought avoidance*. Mekanisme pertahanan tanaman dalam kondisi lingkungan yang kering melalui strategi *drought tolerance* dapat melibatkan mekanisme non-enzimatik maupun enzimatik. Mekanisme non-enzimatik meliputi pengukuran *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang melibatkan substansi antioksidan non-enzimatik, misalnya prolin, glutathione (GSH), asam askorbat (AsA), karotenoid, dan flavonoid. Sedangkan pada mekanisme enzimatik melibatkan beberapa jenis enzim, misalnya superoksida dismutase (SOD), peroksidase (POD), katalase (CAT), askorbat peroksidase (APX), dan glutathione peroksidase (GPX). Mekanisme *drought avoidance* meliputi adaptasi tanaman melalui pemanjangan akar, pengaturan bukaan stomata, dan *chlorophyll fluorescence* (CF). Parameter CF dapat dipergunakan untuk menghitung *drought factor index* (DFI), parameter yang dihitung berdasarkan vitalitas

tanaman pada beberapa tingkat kekeringan. DFI merupakan parameter *non-destructive* yang dapat diamati dalam waktu yang relatif singkat. Semakin tinggi nilai DFI, semakin toleran pula tanaman tersebut terhadap kekeringan. Seleksi klon karet toleran kekeringan menggunakan parameter DFI di Pusat Penelitian Karet pada tahun 2020-2021 menghasilkan urutan 10 besar nilai DFI, yaitu genotipe 034, 206, 056, 007, 205, 225, 066, 235, 109, dan klon RRIM 600 (kontrol) yang potensial toleran kekeringan dengan nilai DFI berturut-turut 0,390; 0,270; 0,211; 0,133; 0,104; 0,099; 0,089; 0,083; 0,067; dan 0,056.

Kata kunci: antioksidan, *Hevea brasiliensis*, indeks faktor kekeringan (*drought factor index*, DFI), perpendaran klorofil (*chlorophyll fluorescence*, CF), spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species*, ROS)

Abstract

Selection of drought-tolerant rubber clones is one of the mitigation efforts to address the impacts of ongoing global warming. Understanding the mechanisms of plant adaptation to drought stress is essential to support the selection of superior rubber clones. This paper aimed to describe selection parameters for drought-tolerant rubber plants related to drought tolerance and drought avoidance strategies. The defense mechanism of plants in dry environmental conditions using drought tolerance

strategies can involve non-enzymatic as well as enzymatic mechanisms. Non-enzymatic defense mechanisms include the neutralization of ROS through various non-enzymatic antioxidant substances, such as proline, glutathione (GSH), ascorbic acid (AsA), carotenoids, and flavonoids. In the drought tolerance adaptation strategy with enzymatic mechanisms, there are several types involved, such as superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), and glutathione peroxidase (GPX). The drought avoidance mechanism includes plant adaptation can be through root elongation, stomata opening arrangement, and chlorophyll fluorescence (CF). The CF parameter can be used to calculate the drought factor index (DFI). Of these parameters, one of the non-destructive parameters that can be observed in a relatively short time is the DFI. The higher the DFI value (closer to 0), the more tolerant the plant will be to drought. The selection of drought-tolerant rubber clones using DFI parameters at the Indonesian Rubber Research Institute in 2020-2021 resulted in top 10 highest DFI values, namely genotypes 034, 206, 056, 007, 205, 225, 066, 235, 109, and RRIM 600 clones (controls) that are potentially drought-tolerant with DFI values of 0.390; 0.270; 0.211; 0.133; 0.104; 0.099; 0.089; 0.083; 0.067; and 0.056 respectively.

Keywords: antioxidant, chlorophyll fluorescence (CF), drought factor index (DFI), Hevea brasiliensis, reactive oxygen species (ROS)

Pendahuluan

Secara umum, tanaman karet sesuai untuk dibudidayakan di sebagian besar wilayah Indonesia. Hal ini disebabkan iklim di sebagian besar wilayah Indonesia mirip dengan daerah asal tanaman karet, yaitu daerah hutan hujan tropis Amazon (Priyadarshan, 2017). Untuk mencapai pertumbuhan dan hasil yang optimal, tanaman karet memerlukan curah hujan 2.000 – 4.000 mm yang terdistribusi secara merata sepanjang tahun, dengan hari hujan sekitar 100 – 150 hari hujan/tahun (Priyadarshan, 2017; Watson, 1989), rerata suhu tahunan 28°C (Barry & Chorley, 1976; Priyadarshan, 2017), rerata kelembaban relatif sekitar 80%, dan lama

penyinaran sekitar 2000 jam/tahun dengan durasi sekitar enam jam/hari (Vijayakumar et al., 2000). Kondisi tersebut sesuai dengan iklim di Indonesia, kecuali sebaran hujannya. Pada beberapa daerah di Indonesia, curah hujan tidak terdistribusi secara merata sepanjang tahun. Misalnya di Sumatera Selatan yang merupakan sentra perkebunan karet rakyat, terdapat bulan kering (bulan dengan curah hujan kurang dari 100 mm) hingga 2-3 bulan. Thomas *et al.* (2011) melaporkan bahwa ketika bulan kering produksi karet menurun. Curah hujan 125 mm/bulan yang didistribusikan secara merata sepanjang tahun diperlukan untuk mempertahankan laju pertukaran oksigen (O₂) dan karbondioksida (CO₂) yang optimal (Vijayakumar *et al.*, 1998).

Dalam budidaya tanaman karet, selain masalah distribusi curah hujan yang kurang merata, terdapat potensi masalah di masa yang akan datang, yaitu fenomena pemanasan global yang disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, yaitu CO₂, metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), chlorofluorocarbons (CFC), dan lain sebagainya. Gas-gas tersebut menyerap radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh permukaan bumi dan bertindak seperti atap kaca yang mencegah pelepasan radiasi gelombang panjang dari permukaan bumi ke atmosfer. Hal ini mengakibatkan suhu global meningkat. Eskalasi suhu diprediksi mencapai 1,5°C antara tahun 2030 dan 2052 (IPCC, 2018). Selain itu, Indonesia juga mengalami variasi iklim regional karena anomali suhu permukaan Laut Pasifik Timur. Fenomena ini menyebabkan pergeseran tekanan udara antara wilayah Asia dan Pasifik Timur yang dikenal dengan fenomena Osilasi Selatan (Meinke & Hammer, 1995). Fenomena Osilasi Selatan *El-Nino* ini menyebabkan musim kemarau berkepanjangan di Indonesia. Selain *El-Nino*, fenomena lain yang disebabkan oleh Osilasi Selatan yang disebut *La-Nina*. Pada masa yang akan datang, fenomena kekeringan dan kurangnya curah hujan di beberapa daerah diprediksi akan lebih sering terjadi (IPCC, 2018).

Upaya mitigasi dampak pemanasan global terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman karet perlu dilakukan, salah satunya melalui seleksi klon toleran terhadap kekeringan. Karyudi (2001), mengatakan bahwa masalah kekeringan dapat diatasi melalui pengembangan klon karet toleran kekeringan. Beberapa klon dilaporkan memiliki karakteristik yang berbeda dalam menanggapi kekeringan. Klon GT1 menunjukkan resistensi terhadap kekeringan melalui mekanisme penundaan proses dehidrasi yang berkorelasi dengan penghambatan proses transpirasi (Thomas & Lasminingsih, 1994). Selain itu, klon RRIM 600 juga dilaporkan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kekeringan (Krishan, 2017; Luke *et al.*, 2015). Sebaliknya, klon PB 260 dilaporkan sensitif terhadap kekeringan (Sanier *et al.*, 2013).

Untuk dapat melakukan seleksi tanaman karet toleran kekeringan dengan baik, perlu diketahui strategi tanaman karet dalam menghadapi kekeringan, sehingga parameter-parameter seleksi dapat dipilih dengan tepat. Secara umum, tanaman karet menggunakan strategi *drought tolerance* maupun *avoidance* dalam menghadapi kekeringan. Efektivitas dari masing-masing strategi tersebut dapat berbeda antar klon. Sebagai contoh, klon RRIM 600 dapat menggunakan strategi *drought tolerance* maupun *avoidance* dalam menghadapi kekeringan, sedangkan klon GT1 cenderung menggunakan strategi *avoidance* (Cahyo *et al.*, 2022). Tulisan ini menguraikan dampak kekeringan terhadap pertumbuhan dan produksi karet, mekanisme adaptasi, dan parameter-parameter seleksi tanaman toleran kekeringan terkait dengan strategi *drought tolerance* dan *drought avoidance*.

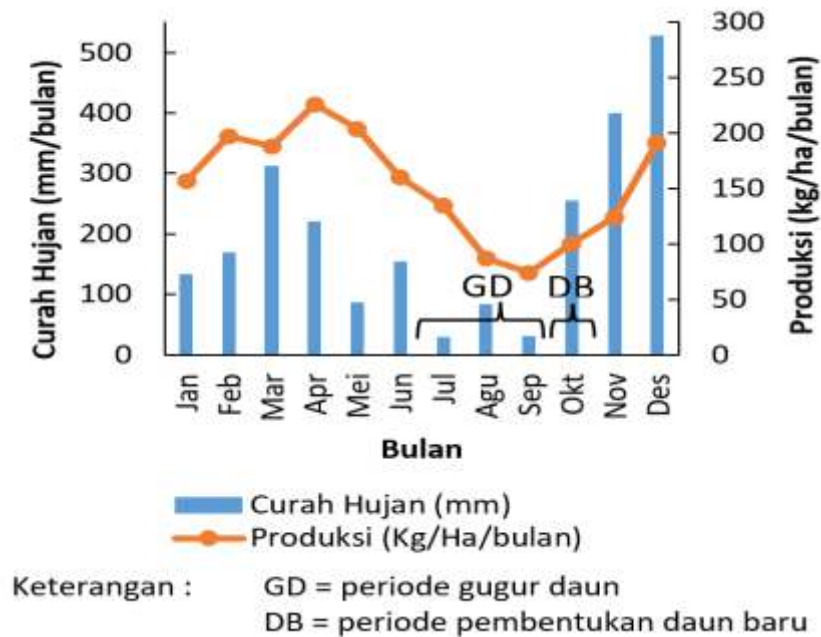
Dampak Cekaman Kekeringan Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Karet

Dampak cekaman kekeringan terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman karet tergantung pada durasi dan tingkat keparahan cekaman kekeringan tersebut. Pada umumnya, tanaman karet mengalami cekaman kekeringan apabila curah hujan kurang dari 100 mm/bulan (Wijaya, 2008).

Menurut Cahyo *et al.* (2011), nilai evapotranspirasi dari tanaman karet klon BPM 24 adalah 113,37 mm/bulan. Hal ini berarti bahwa apabila curah hujan lebih rendah dari nilai evapotranspirasi tanaman, akan terjadi defisit air. Ketika terjadi defisit air atau cekaman kekeringan, akar tanaman karet akan merespon dengan memproduksi hormon ABA yang ditranslokasikan ke daun sebagai *informer* bagi tanaman karet akan adanya cekaman kekeringan. Keberadaan ABA dengan konsentrasi tertentu pada daun akan mendorong transformasi ACC (*1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid*) menjadi etilen (Lara & Vendrell, 2000; Mou *et al.*, 2016). Keberadaan etilen di daun ini pada konsentrasi tertentu akan menyebabkan terjadinya peristiwa gugur daun. Dengan gugurnya daun ini, organ fotosintesis tanaman karet menjadi berkurang dan berakibat terhadap turunnya laju pertumbuhan dan produksi karet. Pada BPM 24, gugur daun menyebabkan penurunan produksi karet secara drastis ketika nilai indeks luas daun (ILD) berada di bawah 1 (Ardika *et al.*, 2011).

Cekaman kekeringan di daerah Sumatera Selatan biasanya terjadi pada musim kemarau atau bulan kering yang dalam keadaan iklim normal biasa terjadi sekitar 2-3 bulan dalam satu tahun yaitu antara bulan Juli sampai September (Gambar 1) (Cahyo *et al.*, 2020). Pada bulan-bulan kering tersebut terjadi peristiwa gugur daun dan akan berakhir dengan munculnya daun baru pada saat mulai musim hujan.

Gambar 1 menunjukkan bahwa produksi tanaman karet mempunyai hubungan yang erat dengan curah hujan dan kadar air tanah (Cahyo & Ardika, 2023). Ketika curah menurun hingga di bawah 100 mm/bulan, mulai terjadi penurunan produksi dan akan terus terjadi seiring dengan penurunan curah hujan dan semakin banyaknya daun yang gugur. Penurunan produksi mencapai puncaknya pada saat awal terbentuknya daun baru, yaitu pada saat awal musim penghujan dan akan mulai naik ketika daun baru yang terbentuk sudah menghiijau dan mampu melakukan proses fotosintesis.



Gambar 1. Distribusi curah hujan dan produksi karet di Kebun Percobaan Pusat Penelitian Karet, Sembawa, Sumatera Selatan tahun 2009

Mekanisme Adaptasi Tanaman Karet terhadap Cekaman Kekeringan

Terdapat dua golongan utama tanaman karet dalam kaitannya dengan respon terhadap kekeringan, yaitu golongan yang sensitif dan toleran terhadap kekeringan. Untuk tanaman karet yang toleran terhadap kekeringan, beberapa strategi adaptasi meliputi *drought avoidance* dan *drought tolerance*. Strategi *drought avoidance* merupakan mekanisme tanaman untuk menjaga status air yang tinggi. Status air tanaman yang tinggi dapat diakibatkan dari sistem perakaran yang dalam untuk meningkatkan penyerapan air atau penutupan stomata untuk mengurangi transpirasi dalam kondisi kekeringan (Fang & Xiong, 2015; Lawlor, 2013; Luo, 2010). Sementara itu, strategi *drought tolerance* merupakan kemampuan tanaman untuk mempertahankan fungsi organik di bawah status air yang rendah. Mekanisme ini melibatkan penyesuaian osmotik sel untuk mempertahankan tekanan turgor serta produksi beberapa antioksidan untuk meminimalkan efek negatif kekeringan.

Strategi *Drought Avoidance*

Strategi *drought avoidance* pada tanaman terjadi dengan cara penyesuaian organ tanaman sedemikian rupa sehingga dapat menjaga status air tanaman tetap tinggi, misalnya dengan mengurangi bukaan stomata, pengguguran daun pada tanaman karet, dan sistem akar yang dalam untuk meningkatkan penyerapan air. Respon yang paling dominan akibat cekaman kekeringan adalah berkurangnya bukaan stomata (Sanier *et al.*, 2013). Kondisi ini dipicu oleh keberadaan hormon asam absisat (ABA) yang diproduksi di akar ketika terjadi kekeringan dan ditranslokasikan ke daun sehingga memicu berkurangnya bukaan stomata dan menurunkan laju transpirasi (Guo *et al.*, 2016), sehingga tanaman dapat menghemat air selama terjadinya cekaman kekeringan. Apabila penutupan stomata terjadi dalam waktu yang lama, hal ini dapat mengakibatkan terjadinya fotorespirasi, yaitu proses penyerapan molekul oksigen (O_2) pada paparan cahaya matahari bersamaan dengan pelepasan molekul karbon dioksida (CO_2) dari

senyawa organik. Pertukaran gas tersebut menyerupai respirasi dan merupakan kebalikan dari fotosintesis, dimana molekul CO_2 diikat dan molekul O_2 dilepaskan (Peterhansel *et al.*, 2010). Kondisi ini berakibat pada berkurangnya cadangan karbohidrat yang terbentuk dari proses fotosintesis, sehingga akan menekan pertumbuhan dan hasil tanaman karet. Fotorespirasi terjadi karena pada saat terjadi cekaman kekeringan tanaman tetap mendapatkan sinar matahari. Penutupan stomata menyebabkan konsentrasi CO_2 pada kloroplas menjadi rendah dan sebaliknya konsentrasi O_2 meningkat karena proses fotosintesis terus berlangsung. Hal ini berakibat ribulose biphosphate (RuBP) menjadi teroksidasi, karena pada tanaman C3 seperti karet, Rubisco tidak hanya mengkatalisa proses karboksilasi RuBP, namun juga mengkatalisa proses oksigenasi RuBP (Buapet *et al.*, 2013). Oleh karena itu, apabila cekaman kekeringan terjadi dalam jangka waktu lama dan fotorespirasi terjadi, maka pertumbuhan tanaman karet akan terhambat dan produksi akan menurun.

Dengan adanya peristiwa gugur daun selama musim kemarau, laju transpirasi dapat ditekan dan cadangan air dalam tanah tidak cepat habis diserap tanaman. Hal ini berdampak positif bagi tanaman karena dapat bertahan hidup selama musim kemarau, namun berdampak negatif dari segi produksi lateks. Oleh karena itu, dalam seleksi tanaman karet yang toleran terhadap kekeringan sebaiknya dipilih tanaman karet yang memiliki pola gugur daun bertahap sehingga penurunan produksi saat musim kemarau tidak sedrastis apabila daun gugur secara serentak. Sebagai perbandingan adalah klon PB 260 dan GT1. Kedua klon tersebut mempunyai laju transpirasi dan waktu gugur daun yang berbeda. Klon PB 260 ini mempunyai laju transpirasi yang lebih tinggi dari pada GT1 sehingga lebih sensitif terhadap cekaman kekeringan (Cahyo *et al.*, 2022). Akibatnya, klon PB 260 memiliki pola gugur daun serentak ketika cekaman kekeringan mulai terjadi. Sebaliknya, klon GT1 yang mempunyai laju transpirasi lebih rendah,

sehingga ketika terjadi cekaman kekeringan gugur daun berlangsung secara bertahap karena klon GT1 lebih dapat menghemat air. Hal ini berakibat pada penurunan produksi yang lebih drastis pada klon PB 260 dibandingkan dengan klon GT1 ketika terjadi cekaman kekeringan (Ardika *et al.*, 2011).

Strategi Drought Tolerance

Mekanisme pertahanan tanaman dalam kondisi lingkungan yang kering dengan menggunakan strategi *drought tolerance* dapat melibatkan mekanisme enzimatik maupun non-enzimatik. Pada strategi adaptasi *drought tolerance* dengan mekanisme enzimatik, terdapat beberapa jenis enzim yang terlibat, misalnya superoksida dismutase (SOD), peroksidase (POD), katalase (CAT), askorbat peroksidase (APX), dan glutathione peroksidase (GPX) (Wang *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2025). Enzim-enzim tersebut dapat menetralkan ROS sehingga kerusakan oksidatif pada sel yang disebabkan oleh ROS dapat ditekan (Kholová *et al.*, 2011). SOD bekerja dengan cara mengubah molekul O_2^- yang terbentuk pada saat terjadinya cekaman kekeringan menjadi molekul H_2O_2 . SOD dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori berdasarkan ion logam yang terikat pada gugus aktifnya, yaitu Mn-SOD, Fe-SOD, dan Cu/Zn-SOD (Zheng *et al.*, 2025). Selain itu, enzim CAT dan POD berperan dalam mengubah molekul H_2O_2 menjadi molekul H_2O dan O_2 yang tidak berbahaya bagi sel tanaman (Fikret *et al.*, 2025). Enzim CAT dapat ditemukan pada mitokondria, sitosol, dan peroksisom (Heidari, 2009). Enzim APX dapat mereduksi H_2O_2 menjadi H_2O dan O_2 menggunakan askorbat sebagai donor elektronnya. Sementara itu, enzim GPX yang merupakan peroksidase berbasis thiol bersama dengan cystein pada gugus aktifnya dapat juga mengubah H_2O_2 menjadi H_2O dan O_2 . Enzim GPX ini mempunyai kemampuan menetralkan ROS yang lebih rendah dari pada beberapa enzim lainnya misalnya CAT dan APX (Zheng *et al.*, 2025). Dengan keberadaan enzim-enzim tersebut, jumlah molekul ROS dalam sel dapat dikendalikan pada taraf normal.

Strategi *drought tolerance* dengan mekanisme non-enzimatik meliputi penetralisir ROS melalui bermacam substansi antioksidan non-enzimatik, misalnya prolin, glutathione (GSH), asam askorbat (AsA), karotenoid, dan flavonoid. Antioksidan tersebut secara kolektif menangkap dan menetralkan ROS, sehingga membentuk perisai kuat yang menahan stress oksidatif dan menjaga komponen sel dari kerusakan (Zheng *et al.*, 2025). Selain itu, terdapat mekanisme mempertahankan fungsi organik tanaman pada kondisi status air tanaman yang rendah dengan cara penyesuaian tekanan osmotik sel yang disebut osmoregulasi. Penyesuaian ini dimungkinkan melalui akumulasi solut, misalnya prolin, sukrosa, sorbitol, oligosakarida, fraktan, dan manitol (Rhodes & Hanson, 1993; Wang, 2014). Kemampuan osmoregulasi ini memungkinkan tanaman untuk mengatur tekanan osmotik tetap berada pada tingkat yang tinggi sehingga dapat mencegah air keluar dari sel dan turgiditas sel dapat dipertahankan (Karyudi, 2001).

Selain osmoregulasi, mekanisme adaptasi non-enzimatik pada strategi *drought tolerance* juga dapat melibatkan peristiwa yang disebut *Chlorophyll-a Fluorescence* (CF). CF adalah peristiwa dilepaskannya kelebihan energi foton oleh klorofil dalam bentuk perpendaran cahaya untuk membuang energi foton berlebih yang diterima dari sinar matahari pada saat proses fotosintesis (Cahyo, 2021). Energi foton yang tersimpan pada klorofil, yang berasal dari sinar matahari, sebagian digunakan untuk menjalankan proses fotosintesis. Sebagian energi foton yang tidak digunakan dalam proses fotosintesis akan dibuang dalam bentuk energi panas, dan sebagian lagi dipancarkan keluar dari klorofil dalam bentuk cahaya fluoresensi klorofil. Ketiga bentuk energi tersebut saling berkompetisi antara satu dan lainnya. Peningkatan laju salah satu proses akan berakibat pada turunnya dua proses lainnya (Boureima *et al.*, 2012; Govindjee, 1995). Parameter CF ini tidak langsung

menggambarkan adaptasi tanaman terhadap kekeringan, namun kestabilan CF saat berada dalam kondisi normal dan pada saat terjadi kekeringan merupakan parameter indikator ketahanan tanaman terhadap kekeringan, yang sering disebut dengan *Drought Factor Index* (DFI). Tanaman yang toleran kekeringan mempunyai nilai CF yang lebih stabil pada saat keadaan normal dan tercekam kekeringan dari pada tanaman yang sensitif kekeringan. Parameter CF ini telah umum digunakan untuk seleksi tingkat ketahanan varietas tanaman terhadap cekaman lingkungan (Oukarroum *et al.*, 2007). Salah satu parameter CF yang sering digunakan untuk menggambarkan ketahanan varietas tanaman terhadap cekaman kekeringan adalah parameter *Performance Index* (PI). Parameter PI tersebut menunjukkan tingkat vitalitas tanaman (Kalaji *et al.*, 2016; Strasser *et al.*, 2004). Penurunan nilai PI yang drastis pada saat terjadi cekaman kekeringan dibandingkan pada saat kebutuhan air tercukupi menunjukkan bahwa varietas tanaman tersebut tidak toleran terhadap kekeringan. Sebaliknya nilai PI yang stabil pada saat terjadi kekeringan maupun dalam keadaan kebutuhan air tercukupi dengan baik menunjukkan bahwa varietas tanaman tersebut toleran terhadap kekeringan. Perubahan nilai PI pada saat kondisi normal hingga terjadi cekaman kekeringan dapat digunakan untuk menghitung nilai DFI. Nilai DFI yang semakin negatif menunjukkan bahwa varietas tanaman tersebut sensitif terhadap cekaman kekeringan dan sebaliknya (Stirbet *et al.*, 2018).

Untuk genotipe yang toleran terhadap kekeringan, jumlah foton yang terbuang pada saat air tidak mencukupi kebutuhan tanaman untuk fotosintesis tetap tinggi. Foton tersebut dibuang salah satunya dalam bentuk perpendaran cahaya, yang tercermin oleh tetap tingginya nilai PI pada saat terjadinya kekeringan. Hal ini berdampak baik bagi tanaman karena kelebihan foton pada saat terjadi kekurangan air dapat menyebabkan

terbentuknya *Reactive Oxygen Species* (ROS). ROS adalah kelompok molekul kimia yang mengandung oksigen reaktif yang berperan penting dalam respon tanaman terhadap kondisi lingkungan. Beberapa contoh molekul ROS adalah singlet oksigen ($^1\text{O}_2$), triplet oksigen ($^3\text{O}_2$), superoksida anion (O_2^-), hidrogen peroksida (H_2O_2), hidroksil radikal (OH), dan berbagai bentuk peroksida lainnya (Waszczak *et al.*, 2018). Dalam kondisi normal, antioksidan dapat mengendalikan dinamika produksi dan pengurangan ROS (Zheng *et al.*, 2025). Sebaliknya, pada saat terjadi cekaman, keseimbangan produksi dan pengurangan ROS menjadi terganggu. Hal ini berakibat melonjaknya produksi ROS, di mana pada jumlah yang tinggi, ROS dapat menyebabkan inaktivasi enzim, merusak organel sel yang vital pada tanaman, dan menghancurkan membran dengan menginduksi degradasi pigmen, protein, lemak, dan asam nukleat yang pada akhirnya berakibat pada kematian sel tanaman (Karuppanapandian *et al.*, 2011). Dengan terbuangnya foton pada saat terjadi cekaman kekeringan, jumlah ROS yang terbentuk menjadi sedikit atau masih berada dalam jumlah yang dapat ditolerir. Oleh karena itu, tanaman dengan DFI yang tinggi cenderung toleran terhadap kekeringan karena ROS tidak terbentuk dalam jumlah yang berlebihan sehingga sel-sel tanaman terhindar dari kerusakan dan masih terjaga fungsinya.

Metode Pengamatan DFI

Dalam kegiatan seleksi klon karet yang toleran terhadap kekeringan, terdapat beberapa parameter yang berhubungan dengan strategi *drought tolerance* dan *avoidance* seperti yang telah diuraikan pada bab sebelumnya. Dari beberapa parameter tersebut, yang saat ini masih belum banyak dikenal dan merupakan ilmu yang relatif baru adalah parameter DFI yang baru pertama kali dipergunakan untuk seleksi klon karet toleran kekeringan di Pusat Penelitian Karet pada tahun 2020-2021 (Cahyo *et al.*, 2022).

Untuk pengamatan DFI, diperlukan alat yang berupa *chlorophyll fluorimeter* dan seperangkat alat untuk mengukur status air tanaman. Beberapa tipe *chlorophyll fluorimeter* yang sering digunakan saat ini adalah *continuous excitation fluorimeters* (CEFs) dan *pulse amplitude modulated* (PAM). Fluorimeter tipe CEFs mempunyai keunggulan dalam hal waktu pengamatan, yaitu kurang dari satu detik untuk sekali pengamatan. Salah satu parameter luaran dari fluorimeter yang diperlukan untuk menghitung nilai DFI adalah parameter *performance index* (PI). PI adalah parameter CF yang menggambarkan tingkat vitalitas tanaman (Kalaji *et al.*, 2016; Strasser *et al.*, 2004). Untuk menghitung nilai DFI, diperlukan pengamatan PI pada saat tanaman berada dalam kondisi lingkungan yang optimal, cekaman moderat, dan cekaman parah. Tingkat cekaman air atau status air tanaman dapat diamati dengan menghitung nilai *fraction of transpirable soil water* (FTSW) maupun menggunakan metode dan alat lainnya. Rumus DFI yang menggambarkan tingkat ketahanan tanaman terhadap kekeringan adalah sebagai berikut (Boureima *et al.*, 2012; Oukarroum *et al.*, 2007; Strauss *et al.*, 2006):

$$\text{DFI} = \log A + 2 \log B \quad (1)$$

dimana :

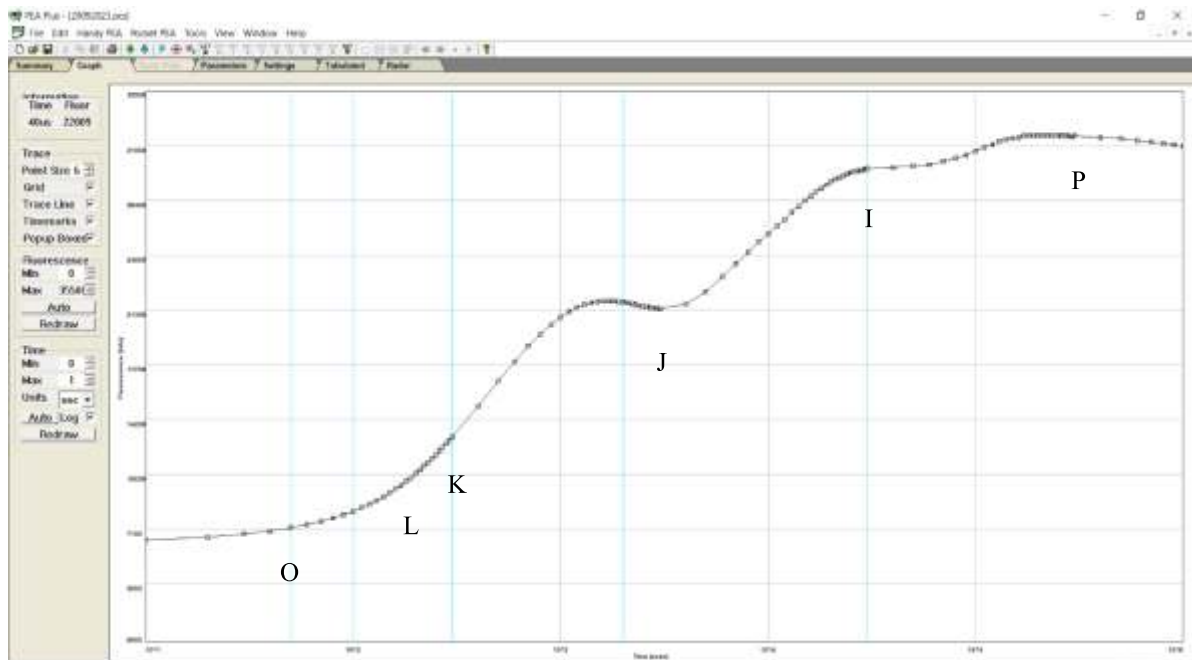
$$A = \frac{\text{PI saat cekaman kekeringan moderat}}{\text{PI saat keadaan normal}}$$

$$B = \frac{\text{PI saat cekaman kekeringan parah}}{\text{PI saat keadaan normal}}$$

Untuk pengamatan PI menggunakan *fluorimeter* tipe CEFs, diperlukan periode gelap untuk menetralkan sisa foton yang tersimpan dalam klorofil daun. Oleh karena itu, pengamatan PI sebaiknya dilakukan pada malam hari untuk menghemat waktu pengamatan. Menurut Cahyo *et al.* (2021), pengamatan PI untuk tanaman karet dapat

dilakukan paling cepat dua jam setelah matahari terbenam. Apabila pengamatan PI dilakukan pagi hari, maka pengamatan dapat dilakukan dengan memasang penjepit sensor pada daun selama 60 menit untuk membuat periode gelap. Selanjutnya, sensor diletakkan padaudukan penjepit daun tersebut. Ketika tombol pengamatan ditekan *fluorimeter* tersebut akan memancarkan gelombang sinar merah (627 nm) dengan intensitas cahaya $3500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ selama satu detik (*Hansatech Instrument Ltd*, 2018) yang mengarah ke daun sampel. Klorofil dalam daun sampel tersebut

akan menerima cahaya dari alat tersebut dan energi foton sebagian akan diserap oleh klorofil dan sebagian akan dipancarkan kembali dalam bentuk panas dan fluoresensi klorofil (CF). CF yang dipancarkan oleh klorofil daun tersebut akan ditangkap oleh sensor alat *fluorimeter*. Data tangkapan CF dari detik ke-0 hingga detik ke-1 akan diolah oleh alat tersebut menjadi suatu kurva yang sering disebut sebagai kurva OLKJIP (Gambar 2). Dari kurva tersebut nilai PI akan dapat ditentukan dan selanjutnya nilai DFI dapat dihitung (Cahyo, 2021).



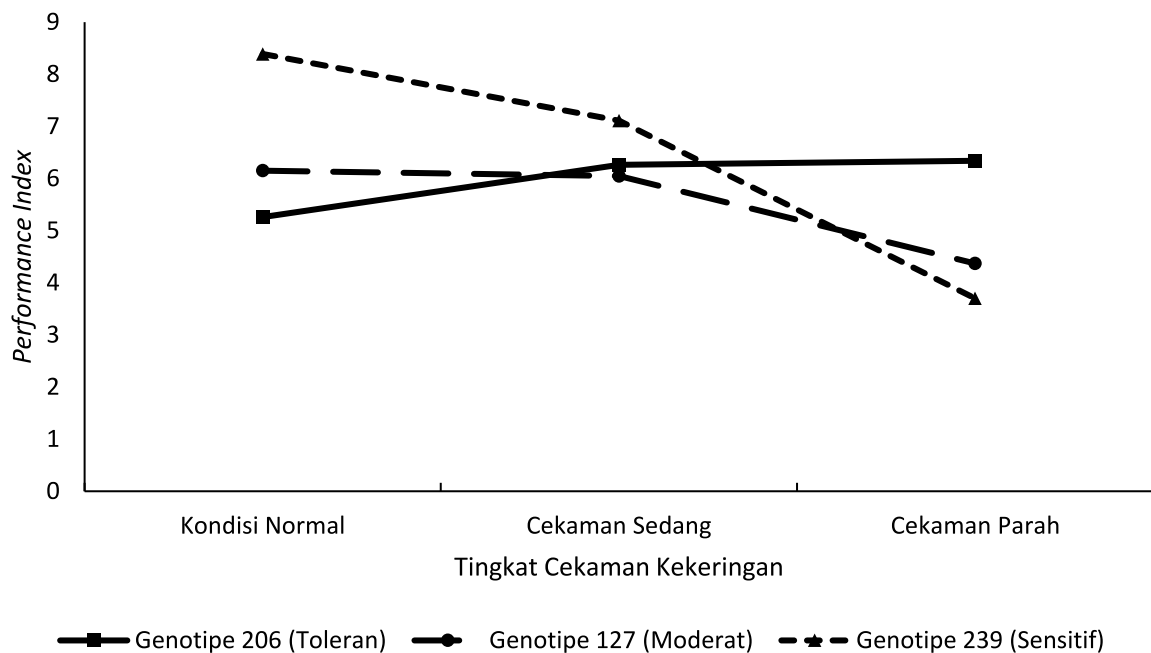
Gambar 2. Contoh kurva OLKJIP yang dihasilkan dari alat *fluorimeter*.

Penggunaan Parameter DFI untuk Seleksi Klon Karet Toleran Kekeringan

Parameter DFI ini telah digunakan untuk menyeleksi genotipe pada populasi hasil persilangan antara klon SP 217 dan PB 260 di Pusat Penelitian Karet. DFI ini dapat dihitung dengan mengamati parameter PI pada saat tanaman/genotipe tersebut berada pada kondisi normal, mengalami cekaman air moderat, dan mengalami cekaman air yang

parah. Pada tanaman yang toleran, nilai PI ini akan lebih stabil pada kondisi normal maupun pada saat terjadi cekaman air sedang maupun parah. Contoh perubahan nilai PI pada beberapa genotipe yang toleran, moderat, dan sensitif terhadap cekaman kekeringan pada kondisi normal, tercekam sedang, dan tercekam kekeringan parah disajikan pada Gambar 3 (Cahyo *et al.*, 2022).

Strategi adaptasi tanaman karet dalam menghadapi cekaman kekeringan:
sebuah tinjauan metode seleksi klon karet toleran kekeringan

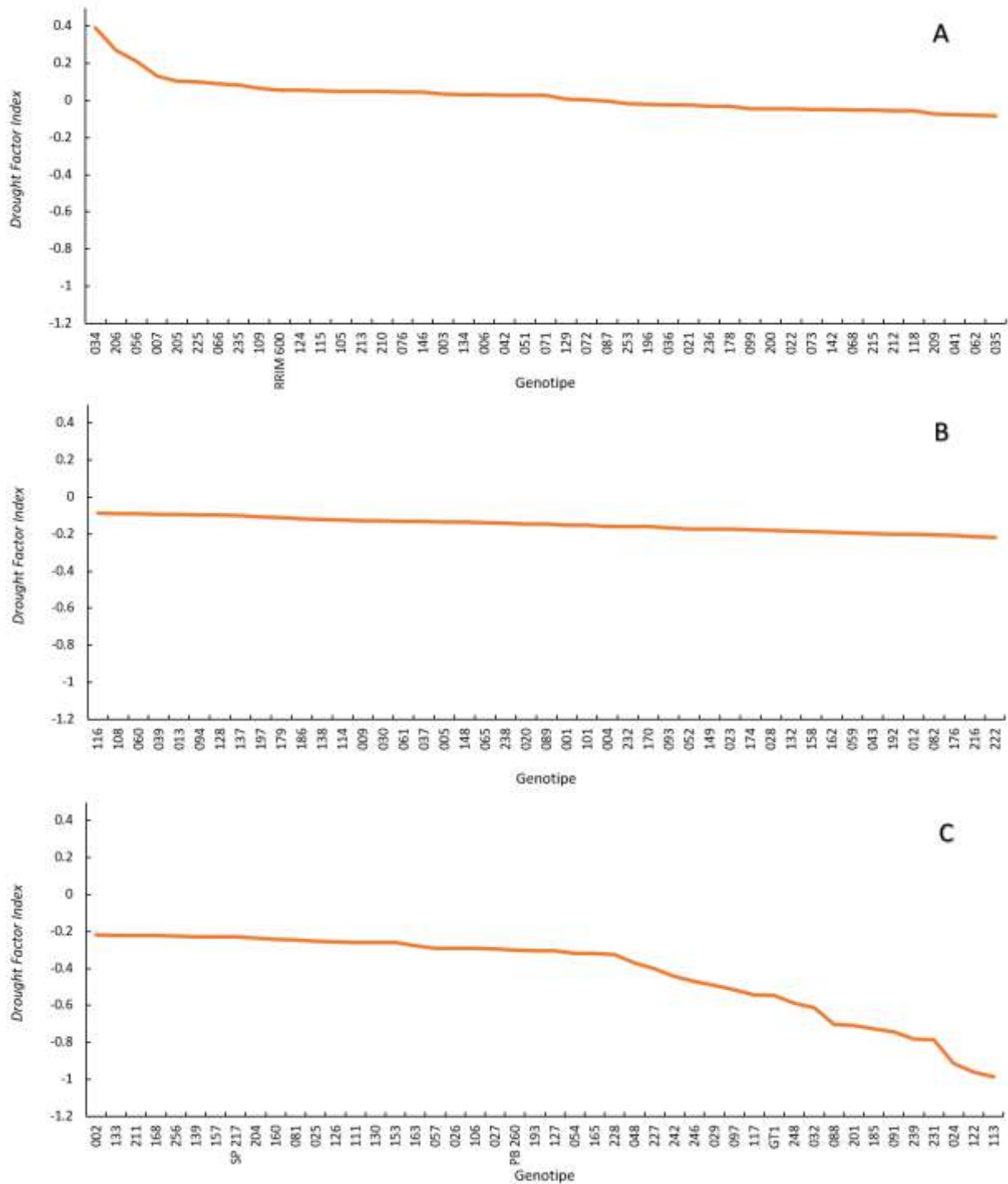


Gambar 3. Perubahan nilai PI beberapa genotipe karet pada tiga tingkat cekaman kekeringan.

Gambar 3 menunjukkan bahwa genotipe yang toleran (206), moderat (127), dan sensitif (239) terhadap cekaman kekeringan menunjukkan respon perubahan nilai PI yang berbeda pada kondisi lingkungan yang normal, mengalami cekaman sedang, dan mengalami cekaman parah. Pada genotipe yang toleran kekeringan, nilai PI yang teramati relatif stabil pada kondisi normal maupun saat terjadi cekaman sedang dan parah. Nilai PI genotipe yang toleran tersebut dapat bertahan di atas angka 5 pada ketiga semua tingkat cekaman kekeringan. Hal yang berbeda terjadi pada genotip yang sensitif cekaman kekeringan. Pada genotipe tersebut (239), penurunan nilai PI terjadi sangat drastis, berawal dari nilai PI sekitar 8 pada saat keadaan normal turun menjadi kurang dari 4 pada saat terjadi kekeringan parah. Pada genotipe yang moderat (127), penurunan nilai PI tersebut tidak separah genotipe yang rentan terhadap cekaman kekeringan (239).

Pada penelitian Cahyo *et al.* (2022), pengamatan nilai PI pada kondisi normal, cekaman kekeringan sedang, dan cekaman kekeringan parah telah berhasil mengurutkan tingkat toleransi genotipe tanaman karet hasil persilangan antara klon PB 260 dan SP 217 berdasarkan nilai DFI nya. Urutan tingkat toleransi genotipe tersebut disajikan pada Gambar 4.

klon PB 260 dan SP 217. Semakin rendah nilai DFI menunjukkan bahwa genotipe tersebut semakin sensitif terhadap kekeringan dan sebaliknya. Dari Gambar 4 juga diketahui bahwa klon RRIM 600 yang dikenal tahan kekeringan (Krishan, 2017; Luke et al., 2015) mempunyai DFI yang tinggi dan tergabung dalam kelompok genotipe yang tergolong toleran terhadap kekeringan. Urutan 10 besar nilai DFI tersebut adalah genotipe 034, 206, 056, 007, 205, 225, 066, 235, 109, dan klon RRIM 600 dengan urutan nilai DFI 0,390; 0,270; 0,211; 0,133; 0,104; 0,099; 0,089; 0,083; 0,067; dan 0,056.



Gambar 4. Urutan tingkat toleransi genotipe hasil persilangan klon PB 260 dan SP 217 berdasarkan nilai DFI (A = genotipe 034 – 035, B = genotipe 116 – 222, C = genotipe 002 – 113).

Gambar 4 merupakan urutan nilai DFI genotipe genotipe pada populasi hasil persilangan antara

Kesimpulan

Berdasarkan mekanisme adaptasi tanaman dalam menghadapi cekaman kekeringan, dapat diketahui beberapa parameter seleksi klon karet toleran kekeringan. Beberapa parameter tersebut antara lain konsentrasi ROS ($^1\text{O}_2$, $^3\text{O}_2$, O_2^- , H_2O_2 , dan OH), aktivitas antioksidan baik enzimatis (SOD, POD, CAT, APX, dan GPX) maupun non-enzimatis (prolin, GSH, AsA, karotenoid, dan flavonoid), karakteristik stomata, panjang akar, dan DFI. Dari beberapa parameter tersebut, parameter *non-destructive* yang dapat diamati dalam waktu yang relatif singkat adalah parameter DFI. Seleksi klon karet toleran kekeringan menggunakan parameter DFI di Pusat Penelitian Karet pada tahun 2020-2021 menghasilkan urutan 10 besar nilai DFI, yaitu genotipe 034, 206, 056, 007, 205, 225, 066, 235, 109, dan klon RRIM 600 (kontrol) yang potensial toleran kekeringan.

Daftar Pustaka

- Ardika, R., Cahyo, A. N., & Wijaya, T. (2011). Dinamika Gugur Daun dan Produksi Berbagai Klon Karet Kaitannya dengan Kandungan Air Tanah. *Jurnal Penelitian Karet*, 29(2), 102–109.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (1976). *Atmosphere, Weather and Climate* (2nd ed.). Methuen, London: Routledge.
- Boureima, S., Oukarroum, A., Diouf, M., Cisse, N., & Van Damme, P. (2012). Screening for drought tolerance in mutant germplasm of sesame (*Sesamum indicum*) probing by chlorophyll a fluorescence. *Environmental and Experimental Botany*, 81, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.02.015>
- Buapet, P., Rasmusson, L. M., Gullström, M., & Björk, M. (2013). Photorespiration and Carbon Limitation Determine Productivity in Temperate Seagrasses. *PLoS ONE*, 8(12), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083804>
- Cahyo, A. N., & Ardika, R. (2023). Prediction of Rubber Yield Based on Soil Water Content. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1162(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1162/1/012003>
- Cahyo, A. N. (2021). Pemanfaatan Parameter Chlorophyll-a Fluorescence untuk Seleksi Klon Karet Tahan Kekeringan. *Warta Per karetan*, 40(2), 85–94. <https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v40i2.811>
- Cahyo, A. N., Ardika, R., & Wijaya, T. (2011). Konsumsi Air dan Produksi Karet pada Berbagai Sistem Pengaturan Jarak Tanam dalam Kaitannya dengan Kandungan Air Tanah. *Jurnal Penelitian Karet*, 29(2), 110–117.
- Cahyo, A. N., Murti, R. H., & Putra, E. T. S. (2020). Dampak Kekeringan terhadap Proses Fisiologis, Pertumbuhan, dan Hasil Tanaman Karet (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). *Warta Perkaretan*, 39(1), 57–72.
- Cahyo, A. N., Murti, R. H., Putra, E. T. S., Nuringtyas, T. R., Fabre, D., & Montoro, P. (2021). Assessment of factual measurement times for chlorophyll-a fluorescence in rubber (*Hevea brasiliensis*) clones. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(6), 3470–3477. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220656>
- Cahyo, A. N., Murti, R. H., Putra, E. T. S., Oktavia, F., Ismawanto, S., Mournet, P., ... Montoro, P. (2022). Screening and QTLs detection for drought factor index trait in rubber (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.). *Industrial Crops and Products*, 190, 115894. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115894>
- Fang, Y., & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>

- Fikret, Y., Manar, T., ebne, E., ebne, K., & Özlem, U. (2013). SOD, CAT, GR and APX Enzyme Activities in Callus Tissues of Susceptible and Tolerant Eggplant Varieties under Salt Stress. *Research Journal of Biotechnology*, 8(11), 45–51.
- Govindjee. (1995). Sixty-Three Years Since Kautsky: Chlorophyll a Fluorescence. *Functional Plant Biology*, 22(2), 131–160. <https://doi.org/10.1071/PP9950131>
- Guo, H., Sun, Y., Peng, X., Wang, Q., Harris, M., & Ge, F. (2016). Up-regulation of abscisic acid signaling pathway facilitates a phid xylem absorption and osmoregulation under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 681–693. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv481>
- Hansatech Instrument Ltd. (2018). Handy PEA+ and Pocket PEA System Manual. Hansatech Instrument Ltd.
- Heidari, M. (2009). Antioxidant Activity and Osmolyte Concentration of Sorghum (*Sorghum bicolor*) and Wheat (*Triticum aestivum*) Genotypes under Salinity Stress. *Asian Journal of Plant Sciences*, 8(3), 240–244. <https://doi.org/10.3923/ajps.2009.240.244>
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, ... T. Waterfield (Eds.), *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 32). Geneva, Switzerland,: World Meteorological Organization.
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., ... Ladle, R. J. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(102), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>
- Karuppanapandian, T., Moon, J.-C., Kim, C., & Manoharan, K. (2011). Reactive oxygen species in plants: Their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crops Science*, 5(6), 709–725.
- Karyudi. (2001). Rubber (*Hevea brasiliensis*) osmoregulation as the respons to water stress I : Variation between recommended, expected, and germplasm. *Indonesian Journal of Natural Rubber Research*, 19(1–3), 1–17.
- Kholová, J., Hash, C. T., Kholová, M., & Vadez, V. (2011). Does a terminal drought tolerance QTL contribute to differences in ROS scavenging enzymes and photosynthetic pigments in pearl millet exposed to drought? *Environmental and Experimental Botany*, 71(1), 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.11.001>
- Krishan, B. (2017). Assessment of drought tolerance in few clones of natural rubber (*Hevea brasiliensis*) under dry hot climate of Odisha, India. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 5(1), 106–110. [https://doi.org/10.18006/2017.5\(1\).106.110](https://doi.org/10.18006/2017.5(1).106.110)
- Lara, I., & Vendrell, M. (2000). Changes in Absciscic Acid Levels, Ethylene Biosynthesis, and Protein Patterns during Fruit Maturation of 'Granny Smith' Apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(2), 183–189. <https://doi.org/10.21273/JASHS.125.2.183>

- Lawlor, D. W. (2013). Genetic engineering to improve plant performance under drought: Physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 64(1), 83–108.
- Luke, L. P., Sathik, M. B. M., Thomas, M., Kuruvilla, L., Sumesh, K. V., & Annamalaiathan, K. (2015). Quantitative expression analysis of drought responsive genes in clones of Hevea with varying levels of drought tolerance. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 21(2), 179–186.
- Luo, L. J. (2010). Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. *Journal of Experimental Botany*, 61(13), 3509–3517. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq185>
- Meinke, H., & Hammer, G. L. (1995). A peanut simulation model: II. Assessing regional production potential. *Agronomy Journal*, 87, 1093–1099.
- Mou, W., Li, D., Bu, J., Jiang, Y., Khan, Z. U., Luo, Z., ... Ying, T. (2016). Comprehensive Analysis of ABA Effects on Ethylene Biosynthesis and Signaling during Tomato Fruit Ripening. *PLoS ONE*, 11(4), e0154072. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154072>
- Oukarroum, A., Madidi, S. E., Schansker, G., & Strasser, R. J. (2007). Probing the responses of barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) by chlorophyll a fluorescence OLKJIP under drought stress and re-watering. *Environmental and Experimental Botany*, 60(3), 438–446. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.01.002>
- Peterhansel, C., Horst, I., Niessen, M., Blume, C., Kebeish, R., Kürkcüoglu, S., & Kreuzaler, F. (2010). Photorespiration. *The Arabidopsis Book / American Society of Plant Biologists*, 8, e0130. <https://doi.org/10.1199/tab.0130>
- Priyadarshan, P. M. (2017). *Biology of Hevea Rubber*. New York, NY: Springer Science+Business Media.
- Rhodes, D., & Hanson, A. D. (1993). Quaternary Ammonium and Tertiary Sulfonium Compounds in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44, 357–384.
- Sanier, C., Oliver, G., Clément-Vidal, A., Fabre, D., Lardet, L., & Montoro, P. (2013). Influence of Water Deficit on the Physiological and Biochemical Parameters of in vitro Plants from Hevea brasiliensis Clone PB 260. *Journal of Rubber Research*, 16(1), 61–74.
- Stirbet, A., Lazár, D., Kromdijk, J., & Govindjee. (2018). Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? *Photosynthetica*, 56(1), 86–104. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0770-3>
- Strasser, R. J., Tsimilli-Michael, M., & Srivastava, A. (2004). Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a Fluorescence* (Vol. 19, pp. 321–362). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_12
- Strauss, A. J., Krüger, G. H. J., Strasser, R. J., & Heerden, P. D. R. V. (2006). Ranking of dark chilling tolerance in soybean genotypes probed by the chlorophyll a fluorescence transient O-J-I-P. *Environmental and Experimental Botany*, 56(2), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.011>
- Thomas, Cahyo, A. N., & Ardika, R. (2011). Anticipation and Effort to Cope With La Nina Climate Anomaly in Rubber Plantation. Sriwijaya University Agricultural Department Seminar: Role of Science and Technology on Climate Change Anticipation on The Perspective Sustainable Agriculture. Palembang.
- Thomas, & Lasminingsih, M. (1994). Respons of some rubber clones on drought. *Warta Perkaretan*, 12(3), 1–4.

- Vijayakumar, K. R., Chandrashekar, T. R., & Philip, V. (2000). Agroclimate. In P. J. George & C. K. Jacob (Eds.), *Natural Rubber: Agromanagement and Crop Processing*. Kerala: Rubber Research Institute of India.
- Vijayakumar, K. R., Dey, S. K., Chandrasekhar, T. R., Devakumar, A. S., Mohankrishna, T., Rao, P. S., & Sethuraj, M. R. (1998). Irrigation requirement of rubber trees *Hevea brasiliensis* in the subhumid tropics. *Agricultural Water Management*, 245–259.
- Wang, L. (2014). Physiological and molecular responses to drought stress in rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.012>
- Wang, Z., Li, G., Sun, H., Ma, L., Guo, Y., Zhao, Z., ... Mei, L. (2018). Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. *Biology Open*, 7 (1 1) , b i o 0 3 5 2 7 9 . <https://doi.org/10.1242/bio.035279>
- Waszczak, C., Carmody, M., & Kangasjärvi, J. (2018). Reactive Oxygen Species in Plant Signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 6 9 , 2 0 9 – 2 3 6 . <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040322>
- Watson, G. A. (1989). Climate and Soil. In C. C. Webster & W. J. Baulkwill (Eds.), *Rubber* (pp. 124–164). Longman Scientific and Technical.
- Wijaya, T. (2008). Kesesuaian Tanah dan Iklim untuk Karet. *Warta Perkaretan*, 27(2), 34–44.
- Zheng, C., Chen, J.-P., Wang, X.-W., & Li, P. (2025). Reactive Oxygen Species in Plants: Metabolism, Signaling, and Oxidative Modifications. *Antioxidants*, 14(6), 617. <https://doi.org/10.3390/antiox14060617>