

## DAMPAK KEKERINGAN TERHADAP PROSES FISILOGIS, PERTUMBUHAN, DAN HASIL TANAMAN KARET (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.)

*Effect of Drought on Physiological Processes, Growth, and Yield of Rubber Tree (Hevea brasiliensis Müll. Arg.)*

Andi Nur Cahyo<sup>1</sup>, Rudi Hari Murti<sup>2</sup>, dan Eka T. S. Putra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Penelitian Karet, Jl. Palembang-Pangkalan Balai km.29  
Po Box 1127, Palembang 30001

<sup>2</sup>Fakultas Pertanian UGM, Jl. Flora, Bulaksumur, Depok, Sleman, Yogyakarta  
Email : nurcahyo.andi@yahoo.co.uk

Diterima 24 Februari 2020 / Direvisi 27 April 2020 / Disetujui 29 Juni 2020

### Abstrak

Indonesia adalah produsen karet terbesar kedua di dunia dengan luas areal penanaman mencapai 3,66 juta ha dan produksi sebesar 3,68 juta ton karet kering pada tahun 2017. Produktivitas perkebunan karet di Indonesia tergolong belum optimal. Salah satu penyebabnya adalah curah hujan yang rendah pada musim kemarau dan fenomena El-Nino yang menyebabkan kekeringan. Efek kekeringan adalah terjadinya defisit air pada tanaman, sehingga tekanan turgor menurun dan memicu ketidaknormalan fungsi organ tanaman. Parameter fisiologis tanaman yang dipengaruhi oleh kekeringan misalnya tekanan osmotik dan turgor, konduktansi stomata, fotosintesa, transpirasi, respirasi, dan aktivitas antioksidan. Efek kekeringan yang dominan pada proses fisiologis tanaman adalah perubahan konduktansi stomata. Menutupnya stomata ini dipicu oleh hormon asam absisat (ABA) yang diproduksi di akar dan dibawa ke daun sebagai inductor stomata ketika terjadi cekaman kekeringan. Konduktansi stomata juga sangat mempengaruhi besarnya fotorespirasi. Selain itu penutupan stomata juga mengakibatkan penurunan asimilasi CO<sub>2</sub>, sehingga dalam paparan cahaya yang berlebihan, over reduksi pada pusat reaksi fotosintesa PSII terjadi dan *reactive oxygen species* (ROS) misalnya superoksida, hidrogen peroksida, hidroksil

radikal, dan oksigen singlet terbentuk. Tanaman yang toleran kekeringan beradaptasi terhadap kondisi cekaman kekeringan secara fisiologis dengan beberapa mekanisme, diantaranya adalah melalui peningkatan produksi hormon ABA, penutupan stomata, osmoregulasi, dan produksi antioksidan. Beberapa klon karet yang relatif toleran terhadap cekaman kekeringan adalah klon RRIM 600 dan GT1. Pada akhirnya, kekeringan yang terjadi akan menghambat pertumbuhan dan menurunkan hasil tanaman.

Kata kunci: air, El-Nino, hujan, *Hevea brasiliensis*, kekeringan.

### Abstract

*Indonesia was the second largest rubber producer in the world with area of rubber plantation reaches 3.66 million ha and produces about 3.68 million ton of dry rubber in 2017. The productivity of rubber plantation was not optimal due to the occurrence of dry season and El-Nino that caused drought. Drought causes a water deficit on plants, hence turgor pressure drops and induces abnormal plants organ function. Drought influences some plant physiological parameter, namely osmotic and turgor pressure, stomatal conductance, photosynthesis, transpiration, respiration, and antioxidant activity. Among these parameters, stomatal conductance is dominantly affected by drought. The decrease of stomatal aperture is induced by abscisic acid (ABA)*

*hormone that is produced in the roots and transported to the leaves as the informer of drought to stomata when soil drought is happening. The stomatal conductance also affects photorespiration. Furthermore, stomata closure causes decline in CO<sub>2</sub> assimilation, hence under sunlight, over reduction on PSII photosynthesis reaction center forms reactive oxygen species (ROS), namely superoxide, hydrogen peroxide, hydroxyl radical, and singlet oxygen. Drought tolerance plants adapt with drought environment by producing ABA, stomata closure, osmoregulation, and antioxidant formation. RRIM 600 and GT1 are the examples of rubber drought tolerant clones. Finally, drought suppresses the growth and yield of rubber plant.*

*Keywords: drought; El-Nino; Hevea brasiliensis; rainfall; water*

### Pendahuluan

Indonesia adalah produsen karet terbesar kedua di dunia setelah Thailand (Hendratno, 2015). Luas areal pertanaman karet Indonesia mencapai 3,66 juta ha, dengan produksi sebesar 3,68 juta ton karet kering pada tahun 2017. Areal karet tersebut didominasi oleh perkebunan rakyat dengan luasan mencapai 85% dari total area atau sekitar 3,1 juta hektar (Tabel 1). Kontribusi perkebunan karet bagi perekonomian nasional sangat besar karena merupakan mata pencaharian bagi sekitar 2,5 juta orang di Indonesia (Directorate General of Estate Crops, 2016). Selain itu, komoditas karet telah menjadi salah satu sumber devisa bagi negara Indonesia. Pada 2016, ekspor karet alam Indonesia mencapai US \$ 743.090.000. Komoditas ini diekspor terutama ke Amerika

Serikat, Jepang, Cina, India, dan Korea (Badan Pusat Statistik, 2016).

Sehubungan dengan pentingnya produksi karet alam sebagai sumber devisa negara, diperlukan upaya peningkatan produktivitas karet alam Indonesia yang hingga saat ini belum mencapai titik optimal. Saat ini produktivitas perkebunan karet di Indonesia masih tergolong rendah dibandingkan dengan potensi klon karet. Pada tahun 2017, rata-rata produktivitas perkebunan karet hanya 1.005,83 kg karet kering / ha, jauh di bawah potensi klon rekomendasi terbaru yang dapat mencapai lebih dari 2.000 kg karet kering / ha (Directorate General of Estate Crops, 2018).

Tanaman karet berasal dari hutan hujan tropis Amazon yang memiliki kondisi iklim yang mirip dengan Indonesia (Priyadarsha, 2017). Hutan hujan tropis Amazon terletak di daerah khatulistiwa dengan ketinggian tempat kurang dari 200 m di atas permukaan laut. Suhu rata-rata bulanan berfluktuasi antara 25-28°C dengan curah hujan yang terdistribusi secara merata tanpa periode kering dengan kecepatan angin yang rencah sepanjang tahun. Kondisi ini sangat cocok bagi tanaman karet untuk tumbuh (Rao & Vijayakumar, 1992).

Secara umum, untuk mencapai pertumbuhan dan hasil yang optimal, tanaman karet harus dibudidayakan di daerah yang memiliki curah hujan sekitar 2.000 - 4.000 mm yang tersebar merata sepanjang tahun dengan jumlah hari hujan sekitar 100-150 hari hujan/tahun (Priyadarsha, 2017; Watson, 1989), suhu rata-rata tahunan sekitar 28°C (Barry & Chorley, 1976; Priyadarsha, 2017), kelembaban relatif rata-rata sekitar 80%, dan lama penyinaran matahari sekitar 2000

Tabel 1. Luas areal dan produksi karet Indonesia tahun 2017

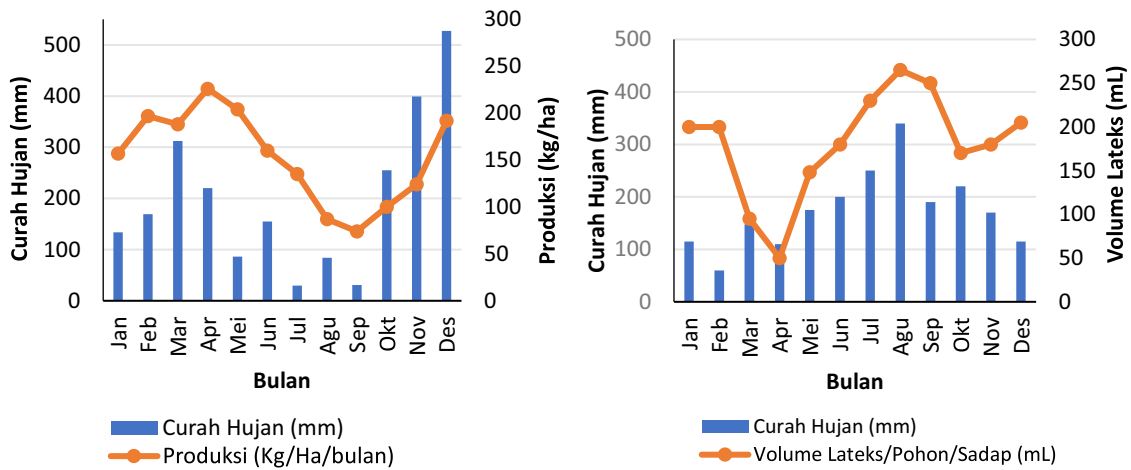
Tipe Perkebunan	Luas (ha)	Produksi (ton)
Perkebunan Rakyat	3.103.271	3.050.232
Pemerintah/BUMN	233.086	249.286
Perkebunan Swasta	322.733	380.910
Total	3.659.090	3.680.428

Sumber: Directorate General of Estate Crops (2018)

jam/tahun dengan durasi sekitar enam jam/hari (Rao & Vijayakumar, 1992; Vijayakumar *et al.*, 2000). Kondisi ini mirip dengan kondisi iklim di Indonesia, kecuali distribusi hujan. Salah satu faktor pembatas pencapaian produksi karet yang optimal di Indonesia selain karena adopsi klon rekomendasi yang masih rendah dan kurangnya pemeliharaan kebun rakyat adalah terjadinya musim kemarau dan fenomena anomali iklim dengan siklus tertentu di Indonesia. Pada saat puncak musim kemarau, hasil karet dapat turun hingga lebih dari 50% dibandingkan dengan hasil normal pada saat musim hujan. Fluktuasi hasil tanaman karet sebagai akibat adanya variasi curah hujan tersebut tersaji pada Gambar 1.

Pengaruh fluktuasi hujan terhadap fluktuasi hasil tanaman karet tersebut dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Air hujan dapat berpengaruh secara langsung terhadap fluktuasi hasil karet karena air hujan merupakan salah satu sumber pengisi cadangan air dalam tanah. Air dalam tanah ini digunakan oleh tanaman sebagai bahan baku proses fotosintesa. Selain itu, air hujan juga

berpengaruh secara tidak langsung terhadap fluktuasi hasil karet karena selama terjadi defisit air, tanaman karet menggugurkan daunnya sebagai bentuk adaptasi, sehingga laju fotosintesa tanaman menurun. Untuk daerah Sumatera Selatan, penurunan produksi tanaman karet biasanya dimulai pada bulan mei saat daun mulai gugur dan mencapai puncaknya pada masa pembentukan daun baru yang biasanya terjadi pada sekitar bulan September dan mulai meningkat lagi pada bulan Oktober. Pada periode tersebut daun baru tersebut belum mampu melakukan fotosintesa secara optimal serta terjadi kompetisi antara penggunaan hasil fotosintesa untuk memproduksi lateks dan pembentukan daun baru, sehingga produksi lateks menurun tajam (Cahyo *et al.*, 2011). Pada saat puncak gugur daun dan awal pembentukan daun baru, sebaiknya intensitas penyadapan dikurangi atau tidak dilakukan penyadapan sama sekali. Tidak dilakukannya penyadapan sama sekali selama tiga bulan dimulai dari saat puncak gugur daun di Thailand menghasilkan rerata tahunan (6 tahun) hasil lateks per pohon per sadap yang lebih tinggi dari pada tanaman



Keterangan : GD = periode gugur daun  
 DB = periode pembentukan daun baru  
 Sumber : Thomas *et al.* (2011) ; (Siregar, 2014)

Gambar 1. Pengaruh variasi curah hujan terhadap hasil karet di Sembawa, Sumatera Selatan (selatan khatulistiwa) (A) dan di Sungei Putih, Sumatera Utara (utara khatulistiwa) (B).

yang tetap disadap selama puncak gugur daun dan masa pembentukan daun baru (Chantuma *et al.*, 2017). Beberapa klon yang dikategorikan relatif toleran terhadap cekaman kekeringan adalah GT1 (Thomas & Lasminingsih, 1994) dan RRIM 600 (Krishan, 2017).

Variasi curah hujan bulanan selama setahun merupakan salah satu masalah pada budidaya perkebunan di lahan kering, di mana curah hujan adalah satu-satunya sumber air (Vanderlip *et al.*, 1996). Variasi jumlah dan distribusi hujan akan berdampak pada hasil tanaman yang berfluktuasi. Telah diketahui bahwa pertumbuhan tanaman memiliki hubungan yang erat dengan kebutuhan air tanaman untuk transpirasi (Gregory, 1984).

### Kejadian Anomali Iklim di Indonesia

Saat ini, kondisi iklim di dunia termasuk Indonesia semakin panas karena efek pemanasan global. Peningkatan suhu diprediksi mencapai 1,5°C antara 2030 dan 2052. Selain itu, akan terjadi kekeringan dan defisit curah hujan di beberapa daerah (IPCC, 2018). Kondisi anomali curah hujan di Indonesia sering dihubungkan dengan fenomena El-Nino dan La-Nina. Penelitian tentang iklim dunia menunjukkan bahwa El

Nino - Southern Oscillation (ENSO) merupakan salah satu faktor yang menyebabkan variasi curah hujan di beberapa negara (Meinke & Hammer, 1995). ENSO adalah fenomena di mana suhu permukaan Samudra Pasifik Tengah dan Timur meningkat. Efek dari fenomena ini adalah penurunan curah hujan di Indonesia dan beberapa negara lain.

Selain El-Nino, juga terdapat fenomena alam yang disebut La-Nina. Fenomena alam La-Nina merupakan kebalikan dari El-Nino. La-Nina menyebabkan kenaikan curah hujan di Indonesia dan sekitarnya (Saputra, 2013; Thomas *et al.*, 2011). Fenomena El-Nino dan La-Nina dapat digambarkan melalui nilai SOI (Southern Oscillation Index). Nilai SOI yang stabil di bawah -7 menunjukkan terjadinya fenomena El-Nino, sedangkan nilai SOI yang stabil di atas +7 menunjukkan terjadinya fenomena La-Nina. Apabila nilai SOI masih stabil di kisaran -7 hingga +7, hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi anomali iklim El-Nino maupun La-Nina, sehingga distribusi curah hujan di Indonesia berada pada kondisi normal (Commonwealth of Australia Bureau of Meteorology, 2019). Nilai SOI dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Thomas *et al.*, 2011):

$$SOI = 10 \frac{P_{diff} - P_{diffav}}{SD(P_{diff})} \quad (1)$$

Dimana

$P_{diff}$  = (tekanan udara rata-rata di Tahiti pada bulan tertentu) - (tekanan udara rata-rata di Darwin pada bulan yang sama)

$P_{diffav}$  = rata-rata jangka panjang  $P_{diff}$  pada bulan tertentu

$SD(P_{diff})$  = standard deviasi jangka panjang dari  $P_{diff}$  pada bulan tertentu

El-Nino dan La-Nina yang mengakibatkan adanya musim kemarau dan hujan yang berkepanjangan pernah terjadi beberapa kali di Indonesia. Dalam kurun waktu 30 tahun terakhir, El-Nino di Indonesia pernah terjadi pada tahun 1991, 1994, 1997, 2002 dan 2015, sedangkan La-Nina pernah terjadi pada tahun 1998 dan 2010. Kekeringan paling parah di Indonesia disebabkan oleh El-Nino pernah terjadi pada tahun 1997, di mana musim

kemarau lebih panjang dan tegas (Commonwealth of Australia Bureau of Meteorology, 2019; Saputra *et al.*, 2016; Thomas *et al.*, 2011). Salah satu daerah di Indonesia yang terkena dampak fenomena El-Nino dan La-Nina tersebut adalah Sumatera Selatan. Salah satu dampak dari fenomena El-Nino dan La-Nina di Sumatera Selatan adalah fluktuasi pertumbuhan dan hasil karet.

## Dampak Kekeringan Terhadap Proses Fisiologis Tanaman

Adanya musim kemarau dan musim hujan yang berkepanjangan sebagai akibat dari fenomena anomali iklim menyebabkan pertumbuhan dan hasil tanaman karet terganggu. Fenomena El-Nino dapat menyebabkan kadar air tanah turun hingga mencapai titik layu permanen, sehingga menekan pertumbuhan dan hasil tanaman karet. Sebaliknya, fenomena La-Nina dapat menyebabkan kadar air tanah dapat meningkat hingga di atas kapasitas lapang, sehingga tanah menjadi jenuh air dan terjadi peristiwa *water logging*. Peristiwa *water logging* menyebabkan air menjadi tidak tersedia untuk tanaman karena berada di atas kapasitas lapang, sehingga mempunyai pengaruh yang hampir sama dengan kekeringan. Kekeringan adalah suatu kondisi ketika air yang dibutuhkan oleh tanaman tersedia dalam jumlah yang kurang sehingga menghambat pertumbuhan dan hasil tanaman dibandingkan dengan keadaan ketika kebutuhan air terpenuhi dengan baik (Ayutthaya, 2010). Berdasarkan sudut pandang meteorologi, kekeringan mengacu pada kondisi di mana cuaca kering terjadi dalam jangka waktu lama dan mengakibatkan gangguan pada tanaman (Fang & Xiong, 2015; Kneebone *et al.*, 1992).

Efek kekeringan adalah terjadinya defisit air pada tanaman. Defisit air adalah situasi ketika tekanan turgor dan potensial air sel tanaman menurun dan memicu ketidaknormalan fungsi organ tanaman (Shao *et al.*, 2008). Oleh karena itu proses fisiologi tanaman dipengaruhi secara negatif oleh kondisi kekeringan sehingga pertumbuhan dan hasil tanaman akan tertekan. Parameter fisiologis tanaman yang dipengaruhi oleh kekeringan misalnya tekanan osmotik dan turgor, konduktansi stomata, fotosintesa, transpirasi, respirasi, dan aktivitas antioksidan (Falqueto *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2013; Velázquez-Márquez *et al.*, 2015; Wang, 2014; Wang *et al.*, 2018). Oleh karena itu parameter tersebut sering digunakan oleh ahli ekologi

untuk mengevaluasi kemampuan adaptasi tanaman yang mengalami kondisi kekeringan (Ayutthaya, 2010). Di antara efek kekeringan yang dominan pada proses fisiologis tanaman karet adalah perubahan konduktansi stomata (Sanier *et al.*, 2013). Fotosintesa bersih dan konduktansi stomata yang dipengaruhi oleh kondisi kekeringan menunjukkan kurva hubungan yang berbentuk sigmoid (Ceulemans *et al.*, 1984). Pada tanaman karet klon RRII 105 dan RRII 208, salah satu gejala kekeringan yang muncul adalah keringnya daun yang terjadi 25 hari setelah induksi stres kekeringan (Krishan, 2017). Selain itu, dalam kekeringan yang parah, cabang-cabang tanaman karet juga ikut mengering (Indraty, 2003).

Di antara efek kekeringan yang dominan pada proses fisiologis tanaman adalah perubahan konduktansi stomata (Sanier *et al.*, 2013). Perubahan konduktansi stomata ini terjadi karena berkurangnya bukaan stomata ketika dihadapkan pada lingkungan yang kering ((Boureima *et al.*, 2012). Menutupnya stomata ini dipicu oleh hormon ABA yang diproduksi di akar dan dibawa ke daun sebagai infromer stomata ketika terjadi cekaman kekeringan (Azhar *et al.*, 2013). Hormon ABA diproduksi di akar ketika terjadi kekurangan air. Hormon ini kemudian ditranslokasikan ke daun sehingga stomata menutup dan laju transpirasi menurun (Guo, 2016). Upaya ini dapat menjaga sehingga tanaman dapat mempertahankan status airnya serta terhindar dari proses kavitasi. Menutupnya stomata juga menyebabkan meningkatnya suhu daun karena laju transpirasi berkurang (Boureima *et al.*, 2012), serta menurunnya konsentrasi CO<sub>2</sub> internal sehingga laju fotosintesa bersih menurun sebagai akibat dari menurunnya aktivitas rubisco (Azhar *et al.*, 2013). Suhu daun adalah indikator bagi konduktansi stomata. Selain itu pada tanaman yang tercekam kekeringan, konduktansi stomata akan menurun dan sebaliknya suhu daun akan meningkat (Boureima, *et al.*, 2012; Munns, *et al.*, 2010). Konduktansi stomata juga sangat mempengaruhi terjadinya fotorespirasi. Selain menurunkan konduktansi stomata, hormon

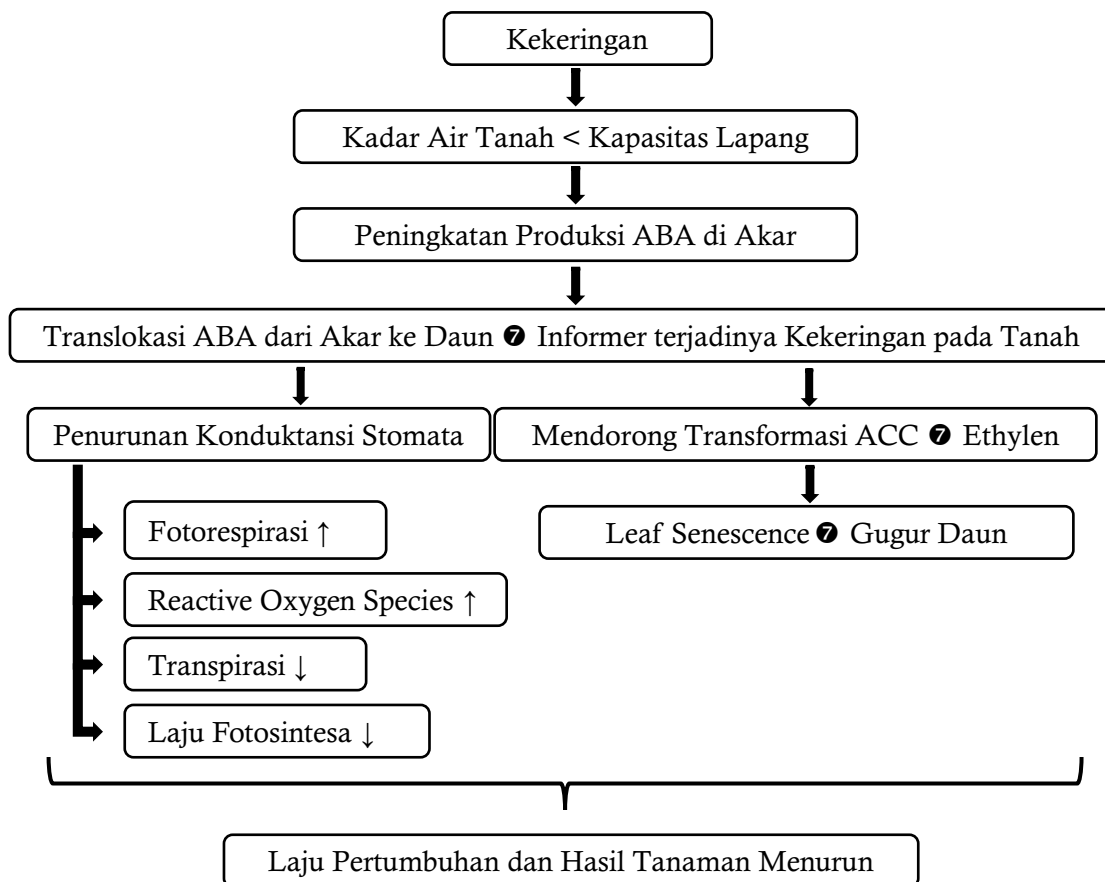
ABA juga dilaporkan dapat menginduksi pembentukan *Ethylene* (Lara & Vendrell, 2000; Mou *et al.*, 2016).

Mekanisme dampak kekeringan terhadap proses fisiologis tanaman dapat dilihat pada Gambar 2.

### Fotorespirasi

Tanaman karet termasuk ke dalam golongan tanaman C3, oleh karena itu penurunan konduktansi stomata pada tanaman karet dapat memiliki dua efek. Pertama, penurunan konduktansi stomata menyebabkan efek proteksi berupa penurunan laju transpirasi, sehingga tanaman dapat menghemat dan meningkatkan efisiensi penggunaan air (Chaves *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2018). Kedua, penurunan konduktansi stomata juga dapat meningkatkan

kemungkinan terjadinya fotorespirasi yang mengurangi akumulasi karbohidrat yang dihasilkan dari proses fotosintesa, sehingga pertumbuhan dan hasil pohon karet menurun. Hal ini dapat terjadi karena pada saat stomata menutup, konsentrasi CO<sub>2</sub> yang berdifusi ke dalam kloroplast menjadi rendah. Rendahnya konsentrasi CO<sub>2</sub> serta tingginya konsentrasi O<sub>2</sub> ini menyebabkan ribulose biphosphate (RuBP) teroksidasi. Hal ini dapat terjadi karena pada tanaman C3 Rubisco tidak hanya mengkatalisa proses karboksilasi tetapi juga mengkatalisa proses oksigenasi dari RuBP pada proses fotosintesa. Fotorespirasi merupakan peristiwa yang menurunkan tingkat efisiensi fotosintesa karena berkompetisi dalam memfiksasi karbon serta mengkonsumsi energi internal dalam bentuk ATP (Buapet *et al.*, 2013).



Gambar 2. Mekanisme dampak kekeringan terhadap proses fisiologis tanaman

Proses pertukaran gas yang terbentuk dari fotorespirasi adalah kebalikan dari fotosintesa yang memfiksasi CO<sub>2</sub> dan melepas O<sub>2</sub>. Kedua proses tersebut sama-sama dikatalisa oleh enzim yang sama, yaitu Ribulose-1,5-bisphosphate-carboxylase/oxygenase (RUBISCO, EC 4.1.1.39). Fiksasi karbon menghasilkan dua molekul 3-phosphoglycerate (PGA) yang terintegrasi dalam siklus Calvin dalam pembentukan gula. Sementara itu fiksasi oksigen menghasilkan satu molekul PGA dan satu molekul 2-phosphoglycolate. Molekul 2-phosphoglycolate tersebut kemudian dikonversi balik menjadi PGA pada siklus fotorespirasi. Proses tersebut membutuhkan energi (ATP) dan NAD(P)H yang besar (Peterhansel *et al.*, 2010). Menurut Kozaki & Takeba (1996), fotorespirasi merupakan proses yang menurunkan efisiensi fotosintesa, namun berguna dalam menekan efek negatif cekaman cahaya yang tinggi dan menutupnya stomata pada saat tanaman kekurangan air dengan cara mengubah O<sub>2</sub> menjadi CO<sub>2</sub> sehingga mengurangi konsentrasi O<sub>2</sub> yang dapat berubah menjadi ROS.

Proses fotorespirasi menjadi lebih tinggi pada lingkungan yang panas dan kering karena disebabkan oleh beberapa hal berikut (Peterhansel *et al.*, 2010):

1. Spesifikasi Rubisco untuk CO<sub>2</sub> relatif terhadap O<sub>2</sub> menurun seiring dengan kenaikan suhu.
2. Kelarutan O<sub>2</sub> pada larutan seperti sitoplasma and stroma pada kloroplast kurang terpengaruh oleh kenaikan suhu dibandingkan kelarutan CO<sub>2</sub>.
3. Tanaman yang kekurangan air mengurangi pertukaran gas untuk menekan evaporasi.
4. Konsentrasi CO<sub>2</sub> di sekitar Rubisco menurun dengan cepat ketika O<sub>2</sub> tersedia dalam jumlah yang berlebihan. Hal ini akan mendorong proses oksigenasi dan menekan karboksilasi.

Beberapa faktor yang disebutkan oleh Peterhansel *et al.* (2010) tersebut menunjukkan bahwa fotorespirasi terjadi karena fiksasi CO<sub>2</sub> yang rendah. Oleh karena itu, untuk menekan

terjadinya fotorespirasi pada tanaman C<sub>3</sub>, salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan aplikasi senyawa *zinc sulphate* (ZnSO<sub>4</sub>). *Zinc sulphate* diharapkan dapat meningkatkan fiksasi CO<sub>2</sub>, sehingga laju asimilasi bersih dapat ditingkatkan. Evans & Sorge (1994) dan Lazova *et al.* (2004) melaporkan bahwa defisiensi *zinc* pada tanaman bayam menyebabkan turunnya laju asimilasi bersih hingga 44% dibandingkan dengan kontrol. Ion *zinc* adalah bagian tambahan dari enzim *carbonic anhydrase* sehingga berkurangnya ion *zinc* akan menurunkan aktifitas enzim *carbonic anhydrase* (Kaldenhoff, 2012). Pada tanaman buncis, akumulasi *zinc* dapat meningkatkan aktivitas enzim *carbonic anhydrase* (Lazova *et al.*, 2004). *Carbonic anhydrase* adalah *metalloenzyme* yang mengandung *zinc* yang mengkatalisa proses hidrasi reversibel dari karbondioksida menjadi bikarbonat (Floryszak-Wieczorek dan Arasimowicz-Jelonek, 2017). Efek yang sama sebagai akibat kekurangan *zinc* terjadi pada tanaman karet. Pada tanaman karet, kekurangan *zinc* menyebabkan pembentukan payung daun yang berbentuk *roset*, pinggir daun yang bergelombang, klorosis, matinya titik tumbuh, timbulnya tunas lateral yang berlebihan, serta penghambatan pertumbuhan tanaman yang parah (Bolle-Jones, 1957; Bolle-Jones & Hilton, 1956; Stevanus *et al.*, 2015).

### ***Reactive Oxygen Species (ROS)***

Selain fotorespirasi, penutupan stomata mengakibatkan penurunan asimilasi CO<sub>2</sub>, sehingga dalam paparan cahaya yang berlebihan, over reduksi pada pusat reaksi fotosintesa PSII terjadi dan ROS terbentuk. Akumulasi ROS dapat merusak jaringan dan menyebabkan stres oksidatif (Hamim *et al.*, 2017). ROS dibentuk dalam rantai transpor elektron mitokondria dan kloroplas (Kholová *et al.*, 2011). ROS seperti superoksida, hidrogen peroksida, radikal hidroksil, dan oksigen singlet merupakan konsekuensi logis dari metabolisme aerob (Ahmad *et al.*, 2009).

ROS diproduksi di kloroplast dan peroksisom ketika ada cahaya (Foyer &

Noctor, 2003) dan mitokondria ketika tidak ada cahaya (Møller, 2001). Kloroplast adalah penghasil utama dari superoksida ( $O_2^-$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) (Ahmad *et al.*, 2009). Tempat utama pembentukan ROS tersebut adalah PSI dan PSII pada tilakoid (Asada, 2006). Selain itu peroksisom memproduksi  $O_2^-$  dan  $H_2O_2$  (Ahmad *et al.*, 2009) dan NADPH oxidase pada membran plasma membentuk  $O_2^-$  yang berperan pada beberapa proses fisiologis (Torres & Dangl, 2005). Pada mitokondria,  $O_2^-$  diproduksi pada kompleks I dan III sebagai produk sampingan. Diperkirakan 1–5%  $O_2$  yang masuk ke mitokondria menghasilkan ROS (Ahmad *et al.*, 2009; Møller, 2001).

Selain sebagai penyebab terjadinya proses fotooksidasi, ROS juga mungkin berperan dalam menyampaikan sinyal adanya cekaman kekeringan sehingga tanaman dapat meningkatkan mekanisme pertahanan terhadap kondisi stress (Foyer & Noctor, 2005; Kholová *et al.*, 2011; Suzuki & Mittler, 2006). Pada prinsipnya terdapat dua mekanisme dasar yang dikembangkan tanaman dalam mendetoksifikasi ROS, yaitu : (i) non-enzymatic, contohnya carotenoids, glutathione, mannitol, ascorbate, tocopherol, flavonoids dan beberapa alkaloid; (ii) enzymatic antioksidan yang meliputi reaksi ROS dengan superoxide dismutase (SOD), ascorbic peroxidase (APX) and catalase (CAT) (Kholová *et al.*, 2011; Prochazkova *et al.*, 2001)

Stress oksidatif terjadi ketika terdapat ketidakseimbangan yang parah antara produksi ROS dan antioksidan, yang menyebabkan terjadinya perubahan fisiologis (Ahmad *et al.*, 2009; Ahmad *et al.*, 2008; Foyer & Noctor, 2000). Keberadaan ROS yang berupa  $^1O_2$  dan  $HO\cdot$  dapat menyerang polyunsaturated fatty acids (PUFAs) dan menaikkan kompleks campuran dari lipid hydroperoxides (Ahmad *et al.*, 2009; Mueller, 2004). Meningkatnya peroksidasi PUFA menurunkan *fluidity* dari membran, meningkatkan kebocoran, dan menyebabkan kerusakan sekunder pada protein membran (Ahmad *et al.*, 2009; Halliwell, 2006).

Pada tanaman karet intensitas penyadapan yang terlalu berat dapat menyebabkan stress pada tanaman yang memicu terbentuk ROS yang berlebihan yang berasal dari NADPH pada lutoid dan ODP (*o-diphenol oxidase*) pada partikel *Frey-Wyssling*. Terbentuknya ROS yang berlebihan ini menyebabkan degradasi peroksidatif dari lemak tak jenuh dari membran lutoid dan ODP terlepas ke sitosol yang mengindikasikan terjadinya lisis partikel *Frey-Wyssling* (Zhang *et al.*, 2017). Selanjutnya terjadi aglutinasi dari partikel karet yang melibatkan protein Hevein (Gidrol *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2017) yang menyebabkan lateks tidak mengalir waktu disadap atau sering disebut sebagai kering alur sadap (KAS). Produksi ROS yang berlebihan yang dapat menyebabkan terjadinya KAS ini dapat dipulihkan kembali dengan cara mengistirahatkan tanaman (tidak disadap) untuk sementara waktu (Das *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2017).

### **Adaptasi Tanaman dalam Menghadapi Cekaman Kekeringan**

Efek kekeringan pada proses fisiologis tanaman karet dipengaruhi oleh tingkat keparahan dan durasi kekeringan serta kemampuan genotipe untuk mengatasi kondisi kekeringan. Oleh karena itu pemulihan status air tanaman yang cepat diperlukan sebagai mekanisme toleransi tanaman terhadap kekeringan (Falqueto *et al.*, 2017; Waseem *et al.*, 2011). Mekanisme toleransi tanaman untuk mengatasi kekeringan misalnya dengan mempertahankan tingkat transpirasi yang rendah serta penyesuaian tekanan osmotik sel. Penyesuaian tekanan osmotik dapat dilakukan dengan mengakumulasi solut yang kompatibel seperti sorbitol, manitol, sukrosa, fraktan, oligosakarida, dan prolin (Rhodes & Hanson, 1993; Wang, 2014). Osmoregulasi adalah kemampuan tanaman untuk mengatur tekanan osmotik sebagai akumulasi solut dalam jaringan tanaman. Klon karet dengan kemampuan osmoregulasi yang tinggi memiliki tingkat tekanan osmotik yang tinggi



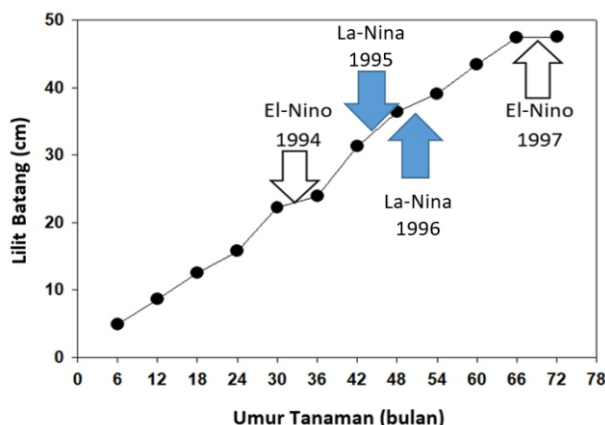
sehingga mampu mempertahankan turgiditas sel dan kadar air relatif daun selama berada dalam kondisi kekeringan (Karyudi, 2001).

Selain osmoregulasi, mekanisme adaptasi tanaman dalam kondisi kekeringan adalah dengan peningkatan aktivitas enzim katalase (CAT), superoksida dismutase (SOD) dan peroksidase (POD) (Wang *et al.*, 2018) yang menekan kerusakan oksidatif yang disebabkan oleh ROS (Kholová *et al.*, 2011). SOD merupakan enzim perombak ROS yang mengkonversi  $O_2$  yang terbentuk pada kondisi cekaman kekeringan menjadi  $H_2O_2$  (Leclercq *et al.*, 2012). CAT adalah enzim yang berperan dalam mengkonversi  $H_2O_2$  menjadi  $H_2O$  dan  $O_2$  (Fikret *et al.*, 2013). CAT berada pada mitokondria, peroksisom, dan sitosol (Heidari, 2009). Enzim APX berfungsi untuk mengubah  $H_2O_2$  menjadi  $H_2O$  dan MDHA (*monodehydroascorbate*) (Singh *et al.*, 2017). Pada tanaman pearl millet, aktivitas APX, dan CAT meningkat segera setelah aplikasi perlakuan cekaman, sedangkan SOD meningkat pada fase kekeringan berikutnya (Kholová *et al.*, 2011; Patil *et al.*, 2005)

### Dampak Kekeringan Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Karet

Stres tanaman yang disebabkan oleh kekeringan terjadi ketika ketersediaan air tanah turun di bawah margin yang menghambat transpirasi dan pertumbuhan

tanaman (Ayutthaya, 2010; Bréda *et al.*, 2006). Evapotranspirasi tanaman karet klon BPM 24 adalah 113,37 mm/bulan (Cahyo *et al.*, 2011). Rerata curah hujan tahunan di daerah Sumatera Selatan adalah di atas 2.000 mm/tahun (ideal untuk pertumbuhan tanaman karet), namun curah hujan bulannya tidak terdistribusi secara merata sehingga terdapat beberapa bulan dengan curah hujan kurang dari 100 mm/bulan (bulan kering) (Gambar 1). Hal ini menyebabkan terjadinya stress kekeringan pada tanaman karet. Selain itu, penurunan produktivitas tanaman karet karena pengaruh kekeringan terjadi ketika curah hujan bulanan kurang dari 125 mm/bulan. Curah hujan 125 mm/bulan yang didistribusikan secara merata sepanjang tahun diperlukan untuk mempertahankan laju fotosintesa yang optimal (Vijayakumar *et al.*, 1998). Penelitian di India membuktikan bahwa kekeringan dapat menurunkan produksi karet sebesar 36-61% dibandingkan dengan produksi karet pada saat periode musim hujan (Rao *et al.*, 1998). Selain itu, pertumbuhan tanaman karet di Indonesia juga mengalami hambatan pada tahun-tahun terjadinya fenomena El-Nino, yaitu tahun 1994, 1997 (Thomas *et al.*, 2011) dan 2015 (Saputra *et al.*, 2016). Sebaliknya pada tahun terjadinya fenomena La-Nina tidak terjadi hambatan pertumbuhan lilit batang tanaman karet (Gambar 3).

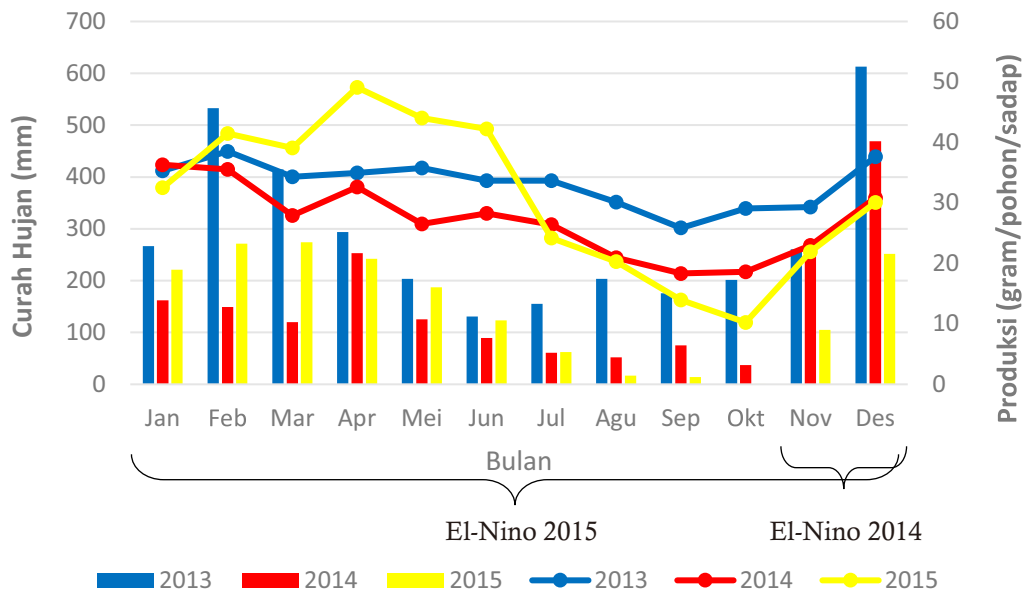


Sumber : Thomas *et al.* (2011) ; National Oceanic and Atmospheric Administration (2020)

Gambar 3. Pertumbuhan lilit batang tanaman karet pada tahun-tahun normal, El-Nino, dan La-Nina

Selain terjadinya hambatan pada laju pertumbuhan tanaman, kejadian El-Nino juga menyebabkan penurunan produksi karet di Indonesia. Tercatat bahwa pada musim kemarau tahun 2015 yang bertepatan dengan

kejadian El-Nino, produksi karet pada puncak bulan kering (Oktober) dapat turun hingga mencapai sekitar 50% dibandingkan dengan rerata produksi karet pada tahun-tahun normal (2013 dan 2014) (Gambar 4).



Sumber : Sahuri Cahyo (2018); National Oceanic and Atmospheric Administration (2020)

Gambar 4. Grafik hubungan antara curah hujan (mm) dan produksi tanaman karet (g/p/s) pada tahun 2013, 2014 (tahun normal, kecuali bulan November dan Desember), dan 2015 (El-Nino terjadi pada semua bulan).

Dari data yang tersaji pada Gambar 3 dan 4, diketahui bahwa cekaman kekeringan pada saat terjadinya fenomena El-Nino mempunyai dampak negatif terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman karet yang cukup signifikan. Kekurangan air pada tanaman karet menghambat proses metabolisme dalam tubuh tanaman karet termasuk metabolisme lateks, sehingga pembentukan lateks terhambat. Selain itu komponen utama dari lateks adalah air. Oleh karena itu kekeringan menyebabkan penurunan laju pertumbuhan dan hasil tanaman karet.

### Kesimpulan

Tanaman karet adalah salah satu komoditi non migas yang penting bagi negara Indonesia.

Dampak dari anomali iklim El-Nino di Indonesia adalah adanya musim kemarau yang berkepanjangan yang menyebabkan kekeringan. Salah satu parameter fisiologis tanaman yang pertama kali dipengaruhi oleh kekeringan adalah produksi hormon ABA di akar. Hormon ABA tersebut dibawa ke daun dan berfungsi sebagai informer untuk mengurangi bukaan stomata ketika terjadi kekeringan pada media tanam. Pada paparan cahaya yang berlebihan ketika terjadi kekeringan, penutupan stomata menyebabkan terjadinya fotorespirasi dan terbentuknya *reactive oxygen species* (ROS) misalnya superoksida, hidrogen peroksida, hidroksil radikal, dan oksigen singlet. Tanaman yang toleran kekeringan beradaptasi terhadap kondisi cekaman kekeringan secara fisiologis

dengan beberapa mekanisme, diantaranya adalah melalui peningkatan produksi hormon ABA, penutupan stomata, osmoregulasi, dan produksi antioksidan. Beberapa klon karet yang relatif toleran terhadap cekaman kekeringan adalah klon RRIM 600 dan GT1. Pada akhirnya, kekeringan yang terjadi akan menghambat pertumbuhan dan menurunkan hasil tanaman.

### Daftar Pustaka

- Ahmad, P., Jaleel, C. A., Azooz, M. M., & Nabi, G. (2009). Generation of ROS and non-enzymatic antioxidants during abiotic stress in plants. *Botany Research International*, 2(1), 11-20.
- Ahmad, P., Sarwat, M., & Sharma, S. (2008). Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants. *Journal of plant biology*, 51(3), 167–173. doi:10.1007/BF03030694.
- Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141(2), 391-396. doi:10.1104/pp.106.082040.
- Ayutthaya, S. I. N. (2010). *Change of whole-tree transpiration of mature Hevea brasiliensis under soil and atmospheric droughts: Analyze in intermittent and seasonal droughts under the framework of the hydraulic limitation hypothesis*. (Doctoral Dissertation), Universite Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Azhar, A., Sathornkich, J., Rattanawong, R., & Kasemsap, P. (2013). Responses of chlorophyll fluorescence, stomatal conductance, and net photosynthesis rates of four rubber (*hevea brasiliensis*) genotypes to drought. *Advanced Materials Research*, 844, 11 - 14. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.844.11.
- Badan Pusat Statistik. (2016). *Indonesian Rubber Statistics 2016*. Jakarta, Indonesia: Badan Pusat Statistik.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (1976). *Atmosphere, Weather and Climate* (2nd ed.). London, UK: Routledge & CRC Press.
- Bolle-Jones, E. W. (1957). Zinc: Effects on the growth and composition of hevea. *Journal of the Rubber Research Institute of Malaya*, 313, 159-167.
- Bolle-Jones, E. W., & Hilton, R. N. (1956). Zinc-deficiency of hevea brasiliensis as a predisposing factor to oidium infection. *Nature*, 177(4509), 619-620.
- 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. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.02.015.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625–644. doi:10.1051/forest:2006042.
- 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. doi:10.1371/journal.pone.0083804.
- Cahyo, A. N., Ardika, R., & Wijaya, T. (2011). Water consumption and rubber production on various planting space arrangement system and their relationship with soil water content. *Indonesian Journal of Natural Rubber Research*, 29(2), 110 - 117. doi:10.22302/jpk.v29i2.243.
- Ceulemans, R., Gabriels, R., & Impens, I. (1984). Comparative study of photosynthesis in several *Hevea brasiliensis* clones and *Hevea* species under tropical field conditions. *Tropical Agriculture (Trinidad)*, 61(4), 273-275.
- Chantuma, P., Lacote, R., Sonnarth, S., & Gohet, E. (2017). Effects of different tapping rest periods during wintering and summer months on dry rubber yield of *Hevea brasiliensis* in thailand. *Journal of Rubber Research*, 20(4), 261-272.

- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560. doi:10.1093/aob/mcn125.
- Commonwealth of Australia Bureau of Meteorology. (2019). *SOI ENSO Wrap-Up*. Diakses dari: [www.bom.gov.au/climate/enso/#tabs=SOI](http://www.bom.gov.au/climate/enso/#tabs=SOI)
- Das, G., Alam, B., Raj, S., Dey, S. K., Sethuraj, M. R., & Sen-Mandi, S. (2002). Over-exploitation associated changes in free radicals and its scavengers in *Hevea brasiliensis*. *Journal of Rubber Research*, 5(1), 28-40.
- Directorate General of Estate Crops. (2016). *Tree Crop Estate Statistics of Indonesia 2015-2017*. Jakarta, Indonesia: Directorate General of Estate Crops.
- Directorate General of Estate Crops. (2018). *Tree Crop Estate Statistics of Indonesia 2017-2019*. Jakarta, Indonesia: Secretariate of Directorate General of Estate Crops, Directorate General of Estate Crops, Ministry of Agriculture.
- Evans, H. J., & Sorge, G. J. (1994). Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Annual Review of Plant Physiology*, 17, 47-46.
- Falqueto, A. R., da Silva Júnior, R. A., Gomes, M. T. G., Martins, J. P. R., Silva, D. M., & Partelli, F. L. (2017). Effects of drought stress on chlorophyll a fluorescence in two rubber tree clones. *Scientia Horticulturae*, 224, 238-243. doi:10.1016/j.scienta.2017.06.019.
- 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. doi:10.1007/s00018-014-1767-0.
- Fikret, Y., Manar, T., Şebnem, E., Şebnem, 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.
- Floryszak-Wieczorek, J., & Arasimowicz-Jelonek, M. (2000). The multifunctional face of plant carbonic anhydrase. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 362-368.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2000). Tansley Review No. 112: Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signalling. *New Phytologist*, 146(3), 359-388. doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00667.x.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2003). Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. *Physiologia Plantarum*, 119(3), 355-364. doi:10.1034/j.1399-3054.2003.00223.x.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005). Oxidant and antioxidant signalling in plants: A re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell and Environment*, 28(8), 1056-1071. doi:10.1111/j.1365-3040.2005.01327.x.
- Gidrol, X., Chrestin, H., Tan, H.-L., & Kush, A. (1994). Hevein, a Lectin-like Protein from *Hevea brasiliensis* (Rubber Tree) is Involved in the Coagulation of Latex. *J Biol Chem*, 269(12), 9278-9283.
- Gregory, P. J. (1984). Water availability and crop growth in arid regions. *Outlook on Agriculture*, 13(4), 208-215.
- Guo, H., Sun, Y., Peng, X., Wang, Q., Harris, M., & Ge, F. (2016). Up-regulation of abscisic acid signaling pathway facilitates aphid xylem absorption and osmoregulation under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 681-693. doi:10.1093/jxb/erv481.

- Halliwell, B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiology*, 141(2), 312–322. doi:10.1104/pp.106.077073.
- Hamim, H., Violita, V., Triadiati, T., & Miftahudin, M. (2017). Oxidative stress and photosynthesis reduction of cultivated (glycine max l.) and wild soybean (g. Tomentella l.) exposed to drought and paraquat. *Asian Journal of Plant Sciences*, 16(2), 65–77. doi:10.3923/ajps.2017.65.77.
- 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. doi:10.3923/ajps.2009.240.244.
- Hendratno, S. (2015). Analysis of crumb rubber sir market developments. *Warta Perkaratan*, 34(2), 161–176. doi:10.22302/ppk.wp.v34i2.257.
- Indraty, I. S. (2003). The endurance of rubber planting material clones planted in polybags on the drought condition. *Indonesian Journal of Natural Rubber Research*, 21(1-3), 12-24.
- Kaldenhoff, R. (2012). Mechanisms underlying CO<sub>2</sub> diffusion in leaves. *Current Opinion in Plant Biology*, 15(3), 276–281. doi:10.1016/j.pbi.2012.01.011.
- Karyudi. (2001). Rubber (*Hevea brasiliensis*) osmoregulation as the responds 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., Kočová, 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. doi:10.1016/j.envexpbot.2010.11.001.
- Kneebone, W. R., Kopec, D. M., & Mancino, C. F. (1992). Water requirements and irrigation. *Turfgrass Agronomy Monograph*, 32, 441–472.
- Kozaki, A., & Takeba, G. (1996). Photorespiration protects C3 plants from photooxidation. *Nature*, 384(557-560).
- 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. doi:10.18006/2017.5(1).106.110.
- Lara, I., & Vendrell, M. (2000). Changes in abscisic 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. doi:10.21273/JASHS.125.2.183.
- Lazova, G. N., Naidenova, T., & Velinova, K. (2004). Carbonic anhydrase activity and photosynthetic rate in the tree species *Paulownia tomentosa* Steud. Effect of dimethylsulfoxide treatment and zinc accumulation in leaves. *Journal of Plant Physiology*, 161(3), 295–301. doi:10.1078/0176-1617-00900.
- Leclercq, J., Martin, F., Sanier, C., Clément-Vidal, A., Fabre, D., Oliver, G., . . . Montoro, P. (2012). Over-expression of a cytosolic isoform of the HbCuZnSOD gene in *Hevea brasiliensis* changes its response to a water deficit. *Plant Molecular Biology*, 80(3), 255–272. doi:10.1007/s11103-012-9942-x.
- Meinke, H., & Hammer, G. L. (1995). A peanut simulation model: II. Assessing regional production potential. *Agronomy Journal*, 87, 1093–1099.

- Møller, I. M. (2001). Plant mitochondria and oxidative antioxidant capacity and resistance to stress: Electron transport, NADPH turnover and photoinhibition in Poplar trees. *Plant Physiol., metabolism of reactive oxygen species. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52(1), 561-591. doi:10.1146/annurev.arplant.52.1.561.
- 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. doi:10.1371/journal.pone.0154072.
- Mueller, M. J. (2004). Archetype signals in plants: The phytoprostanes. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(4), 441-448. doi:10.1016/j.pbi.2004.04.001.
- Munns, R., James, R. A., Sirault, X. R. R., Furbank, R. T., & Jones, H. G. (2010). New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 61(13), 3499-3507. doi:10.1093/jxb/erq199.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2020). Cold & Warm Episodes by Season. Diakses dari: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Patil, H. E., Mahatma, M. K., Patel, N. J., Bhatnagar, R., & Jadeja, G. C. (2005). Differential response of pearl millet hybrids to water stress in relation to antioxidant enzymes and proline. *Indian Journal of Plant Physiology*, 10(4), 344-348.
- Peterhansel, C., Horst, I., Niessen, M., Blume, C., Kebeish, R., Kürkcüoglu, S., & Kreuzaler, F. (2010). Photorespiration. *The Arabidopsis Book*, 8(1-24). doi:10.1199/tab.0130.
- Priyadarsha, P. M. (2017). *Biology of Hevea Rubber*. New Delhi, India: Springer +Business Media.
- Prochazkova, D., Sairam, R. K., Srivastava, G. C., & Singh, D. V. (2001). Oxidative stress and antioxidant activity as the basis of senescence in maize leaves. *Plant science*, 161(4), 765-771. doi:10.1016/S0168-9452(01)00462-9.
- Rao, P. S., Saraswathyamma, C. K., & Sethuraj, M. R. (1998). Studies on the relationship between yield and meteorological parameters of para rubber tree (*Hevea brasiliensis*). *Agricultural and Forest Meteorology*, 90, 235-245.
- Rao, P. S., & Vijayakumar, K. R. (1992). Climatic Requirements. In M. R. Sethuraj & N. M. Mathew (Eds.), *Natural Rubber: Biology, Cultivation, and Technology*. New York, USA: Elsevier Science Publisher.
- 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.
- Sahuri, S., & Cahyo, A. N. (2018). Relationship between field water balance with production of BPM24 clone. *Widyariset*, 4(2), 163-172.
- 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.
- Saputra, J. (2013). Analysis of the effect of la-nina 2010 climate anomaly in sembawa research centre experimental field South Sumatera. *Widyariset*, 16(3), 377-384.
- Saputra, J., Stevanus, C. T., & Cahyo, A. N. (2016). The effect of el-nino 2015 on the rubber plant (*Hevea brasiliensis*) growth in the experimental field Sembawa Research Centre. *Widyariset*, 2(1), 37-46. doi:10.14203/widyariset.2.1.2016.37-46.

- Shao, H.-B., Chu, L.-Y., Jaleel, C. A., & Zhao, C.-X. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*, 331(3), 215–225. doi:10.1016/j.crvi.2008.01.002.
- Silva, P. E. M., Cavatte, P. C., Morais, L. E., Medina, E. F., & DaMatta, F. M. (2013). The functional divergence of biomass partitioning, carbon gain and water use in *Coffea canephora* in response to the water supply: Implications for breeding aimed at improving drought tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 49-57. doi:10.1016/j.envexpbot.2012.09.005.
- Singh, V. P., Singh, S., Prasad, S. M., & Parihar, P. (2017). *Uv-b radiation: From environmental stressor to regulator of plant growth*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Siregar, T. H. S. (2014). Pola musiman produksi dan gugur daun pada klon PB 260 dan RRIC 100. *Jurnal Penelitian Karet*, 32(2), 88-97. doi:10.22302/jpk.v32i2.155.
- Stevanus, C. T., Saputra, J., & Wijaya, T. (2015). Peran unsur mikro bagi tanaman karet. *Warta Perkaratan*, 34(1), 11-18. doi:10.22302/ppk.wp.v34i1.59.
- Suzuki, N., & Mittler, R. (2006). Reactive oxygen species and temperature stresses: A delicate balance between signaling and destruction. *Physiologia Plantarum*, 126(1), 45-51. doi:10.1111/j.0031-9317.2005.00582.x.
- Thomas, & Lasminingsih, M. (1994). Respons of some rubber clones on drought. *Warta Perkaratan*, 12(3), 1-4.
- Thomas, Cahyo, A. N., & Ardika, R. (2011, 23-25 Mei). *Anticipation and effort to cope with la nina climate anomaly in rubber plantation*. Tulisan disajikan pada Sriwijaya University Agricultural Department Seminar: Role of Science and Technology on Climate Change Anticipation on The Perspective Sustainable Agriculture., Palembang.
- Torres, M. A., & Dangl, J. L. (2005). Functions of the respiratory burst oxidase in biotic interactions, abiotic stress and development. *Current Opinion in Plant Biology*, 8(4), 397-403. doi:10.1016/j.pbi.2005.05.014.
- Vanderlip, R. L., Hammer, G. L., & Muchow, R. C. (1996). Assessing planting opportunities in semiarid subtropical environments. *Agricultural Systems*, 51, 97-122.
- Velázquez-Márquez, S., Conde-Martínez, V., Trejo, C., Delgado-Alvarado, A., Carballo, A., Suárez, R., . . . Trujillo, A. R. (2015). Effects of water deficit on radicle apex elongation and solute accumulation in *Zea mays* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 29-37. doi:10.1016/j.plaphy.2015.07.006.
- 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*, 35(3), 245-259. doi:10.1016/S0378-3774(97)00019-X.
- Vijayakumar, K. R., Chandrashekar, T. R., & Philip, V. (2000). Agroclimate. In P. J. George & C. K. Jacob (Eds.), *Natural Rubber: Agromanagement and Crop Processing*. Kothayam, India: Rubber Research Institute of India.
- Wang, L. (2014). Physiological and molecular responses to drought stress in rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 83(243-249). doi: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(11). doi:10.1242/bio.035279.

- Waseem, M., Ali, A., Tahir, M., Nadeem, M. A., Ayub, M., Tanveer, A., . . . Hussain, M. (2011). Mechanism of drought tolerance in plant and its management through different methods. *Continental Journal of Agricultural Science*, 5(1), 10-25.
- Watson, G. A. (1989). Climate and Soil. In C. C. Webster & W. J. Baulkwill (Eds.), *Rubber* Essex, UK: Longman Scientific and Technical.
- Zhang, Y., Leclercq, J., & Montoro, P. (2017). Reactive oxygen species in hevea brasiliensis latex and relevance to tapping panel dryness. *Tree physiology*, 37(2), 261-269. doi:10.1093/treephys/tpw106.