

PEMANFAATAN PARAMETER *CHLOROPHYLL-A FLUORESCENCE* UNTUK SELEKSI KLON KARET TAHAN KEKERINGAN

Using Chlorophyll-a Fluorescence Parameters to Select Drought Tolerant Rubber Clones

Andi Nur Cahyo

Pusat Penelitian Karet, Jalan Raya Palembang - Pangkalan Balai km 29, Sembawa, Banyuasin,
Sumatera Selatan 30953

Email: nurcahyo.andi@yahoo.co.uk

Diterima 16 Juli 2021/ Direvisi 9 Agustus 2021 / Disetujui 15 Oktober 2021

Abstrak

Chlorophyll-a fluorescence adalah perpendaran cahaya yang dilepaskan oleh klorofil untuk membuang kelebihan energi foton yang diterima dari sinar matahari pada proses fotosintesa. Salah satu parameter turunan dari *chlorophyll-a fluorescence* adalah *Performance Index* (PI). PI menggambarkan informasi kualitatif mengenai kebugaran tanaman. Pengamatan PI pada saat kondisi normal, tercekam kekeringan moderat, dan tercekam kekeringan parah memungkinkan untuk penghitungan nilai *Drought Factor Index* (DFI). Nilai DFI menggambarkan tingkat ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan, termasuk cekaman kekeringan. Semakin tinggi nilai DFI, semakin tahan tanaman tersebut terhadap cekaman lingkungan dan sebaliknya. Parameter DFI telah berhasil dimanfaatkan untuk menyeleksi genotip tahan cekaman kekeringan pada tanaman wijen, kacang arab, barley, sawit, dan karet. Penentuan nilai DFI sangat berguna untuk kegiatan seleksi awal klon karet yang tahan terhadap cekaman kekeringan dan dapat menghemat waktu dan biaya yang harus dikeluarkan pada program pemuliaan tanaman karet.

Kata kunci: *Chlorophyll-a fluorescence*, cekaman, fotosintesa, ketahanan kekeringan, seleksi genotip.

Abstract

Chlorophyll-a fluorescence (CF) is the light emitted by chlorophyll to dispose excess photon energy received from sunlight in the photosynthesis process. One of the derived parameters of *chlorophyll-a fluorescence* is the *Performance Index (PI)*. PI describes qualitative information about plant vitality. Observation of PI under normal conditions, moderate drought stress, and severe drought stress enable to calculate the *Drought Factor Index (DFI)* value. The DFI value describes the level of plant resistance to environmental stresses, including drought stress. The higher the DFI value, the more resistant the plant is to environmental stresses and vice versa. This DFI parameter has been successfully used to select drought stress-resistant genotypes in sesame, chickpea, barley, oil palm, and rubber plants. DFI value determination is very useful for preliminary selection of drought tolerant rubber clones and can save time and costs in rubber plant breeding programs. *e leaf area index decreased to 0.5.*

Keywords: *Chlorophyll-a fluorescence*, drought tolerance, observation method, photosynthesis, plant stress

Pendahuluan

Chlorophyll-a fluorescence (CF) adalah perpendaran cahaya yang dilepaskan oleh klorofil untuk membuang kelebihan energi

foton yang diterima dari sinar matahari pada proses fotosintesa. Energi cahaya matahari yang diterima oleh pigmen klorofil sebagian digunakan untuk proses fotosintesa, dibuang dalam bentuk panas, dan dibuang dalam bentuk perpendaran cahaya CF. Ketiga proses tersebut berada dalam kompetisi. Kenaikan laju dari salah satu proses akan menyebabkan penurunan dari dua proses yang lain (Boureima *et al.*, 2012; Govindjee, 1995).

Pengamatan CF berguna untuk memonitor aktivitas *photosystem II* (PSII) pada organ fotosintesis tanaman. Aktivitas PSII sebagai respon terhadap cekaman lingkungan lingkungan (Oukarroum *et al.*, 2007), sangat berpengaruh terhadap proses fotosintesa (Baker & Rosenqvist, 2004; Sanier *et al.*, 2013). Oleh karena itu CF dapat digunakan sebagai indikator status fisiologis tanaman yang dapat berubah karena pengaruh cekaman lingkungan, misalnya kekeringan, suhu yang rendah, kadar garam yang tinggi, dan stress lainnya. Ketika tanaman dihadapkan pada kondisi cekaman lingkungan, kerusakan pusat reaksi PSII akan menghambat reaksi fotokimia dan proses elektron transport dari PSII ke *quinone A*, *quinone B*, dan lubuk *plastoquinone* (Falqueto *et al.*, 2017; Zushi & Matsuzoe, 2017).

Pengamatan CF telah digunakan secara luas untuk mengamati dan menyeleksi tingkat ketahanan suatu tanaman terhadap cekaman lingkungan (Oukarroum *et al.*, 2007). CF menggambarkan efisiensi fotokimia (Çiçek & Arslan, 2015; Kalaji *et al.*, 2014; Stirbet & Govindjee, 2011) dan menyediakan informasi yang dapat diperoleh dengan cepat mengenai aktivitas transport elektron kloroplas (Jedmowski *et al.*, 2015; Strasser *et al.*, 2004). Salah satu parameter CF yang dapat digunakan untuk menyeleksi tingkat ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan adalah *Performance Index* (PI). PI menggambarkan informasi kualitatif mengenai kebugaran tanaman (Kalaji *et al.*, 2016; Strasser *et al.*, 2004). Perubahan nilai PI sebagai akibat cekaman lingkungan menggambarkan tingkat ketahanan tanaman terhadap cekaman tersebut. Semakin stabilnya

nilai PI pada kondisi normal, cekaman sedang, dan cekaman berat menunjukkan semakin tingginya tingkat ketahanan tanaman terhadap suatu cekaman lingkungan.

Tulisan ini bertujuan untuk mengenalkan beberapa parameter CF dan cara mengamatinya sehingga dapat dimanfaatkan untuk seleksi klon tanaman karet yang tahan cekaman lingkungan, terutama cekaman kekeringan.

Metode Pengamatan *Chlorophyll-a* Fluorescence

Pengamatan CF membutuhkan alat yang disebut *chlorophyll fluorimeter*. Pada saat ini terdapat beberapa tipe *chlorophyll fluorimeter*, yaitu *pulse amplitude modulated* (PAM) dan *continuous excitation fluorimeters* (CEFs). CEFs lebih murah, sederhana, dan cepat dalam menghasilkan data CF per sekali pengamatan apabila dibandingkan dengan PAM. Alat tersebut membutuhkan waktu kurang dari satu detik untuk menghasilkan beberapa parameter CF (Banks, 2017; Kalaji *et al.*, 2016). Oleh karena itu, dalam tulisan ini metode pengamatan CF yang dipaparkan lebih dikhususkan untuk alat *chlorophyll fluorimeter* dengan tipe CEFs.

Pengamatan CF dengan alat yang bertipe *chlorophyll fluorimeter* membutuhkan periode adaptasi gelap sebelum pengamatan CF tersebut dilakukan agar didapatkan nilai F_0 yang stabil. Untuk mendapatkan periode gelap yang cukup, pengamatan dapat dilakukan pada waktu malam hari beberapa jam setelah matahari terbenam atau pagi hari dengan menggunakan klip penutup daun yang dipasang pada daun selama beberapa waktu tertentu sebelum pengamatan CF (Gambar 1). Selain untuk memberikan periode gelap pada daun, klip tersebut juga berfungsi untuk menempatkan sensor dari *chlorophyll fluorimeter* ketika akan dilakukan pengamatan CF.

Periode adaptasi gelap dibutuhkan pada saat pengamatan CF untuk mendapatkan nilai F_0 yang akurat. Nilai F_0 yang akurat dapat dicapai ketika penerima elektron pertama dari



Gambar 1. Klip *chlorophyll fluorimeter* tipe CEFs untuk mendapatkan periode adaptasi gelap daun.

PSII telah teroksidasi secara penuh (Hansatech Instrument Ltd., 2018). Durasi dari waktu adaptasi gelap ini berkaitan dengan waktu yang diperlukan untuk inaktivasi FNR (*Ferredoxin-NADP⁺-reductase*) agar didapatkan nilai F_0 yang stabil. Waktu yang diperlukan untuk inaktivasi FNR yang dipergunakan sebagai dasar durasi waktu adaptasi gelap untuk pengamatan CF yang akurat ini bervariasi antara satu spesies tanaman dengan spesies tanaman lainnya (Stirbet *et al.*, 2018), seperti pada tanaman kacang-kacangan dan pinus adalah sekitar 15 menit dan 60 menit berturut-turut (Kalaji *et al.*, 2014) serta bervariasi antar klon/varietas.

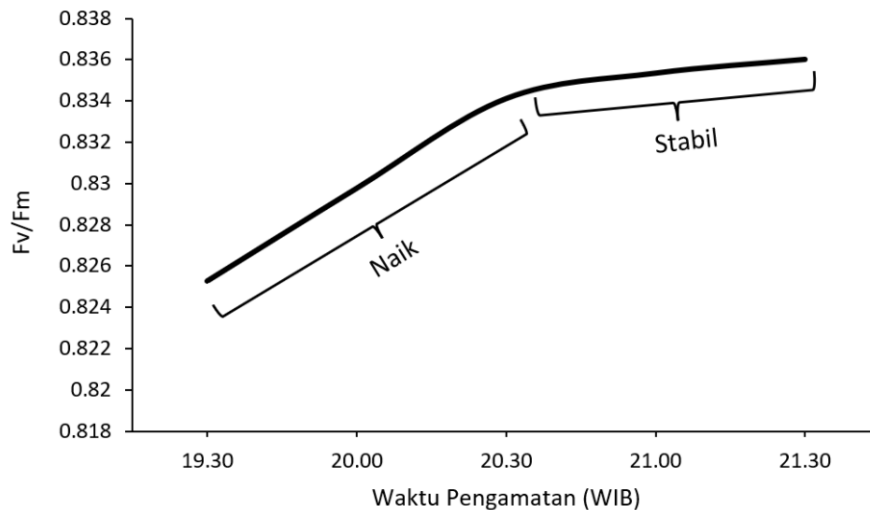
Pada tanaman karet, periode adaptasi gelap yang diperlukan bervariasi sesuai dengan jenis klonnya. Tanaman karet klon GT1, SP 217, dan RIMM 600 membutuhkan periode adaptasi gelap minimal 15 menit, sedangkan klon PB 260 membutuhkan waktu sekitar 60 menit apabila pengamatan CF dilakukan pada waktu pagi hari (Cahyo *et al.*, 2021). Pengamatan pada siang hari tidak dianjurkan, karena kondisi iklim mikro (intensitas cahaya

matahari dan suhu udara) di Indonesia tidak stabil (Cahyo *et al.*, 2022). Perubahan intensitas cahaya matahari karena pergeseran awan serta perubahan suhu udara yang dramatis akan dapat mempengaruhi hasil pengamatan CF, sehingga hasilnya tidak akurat. Perubahan suhu udara ini tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil pengamatan CF apabila masih dibawah T_c (*critical temperature*). T_c adalah suhu lingkungan ketika nilai F_0 naik secara dramatis (Giorio, 2011). Oleh karena itu, apabila suhu udara disekitar tanaman sampel sudah melampaui T_c , nilai F_0 akan naik secara dramatis sehingga menurunkan akurasi dari pengamatan CF. Nilai dari T_c tersebut adalah sekitar 40 – 55°C (Giorio *et al.*, 2012).

Apabila jumlah sampel yang diamati banyak (biasanya ini terjadi pada seleksi progeni dari suatu hasil persilangan tanaman karet), pengamatan CF dapat dilakukan pada malam hari sehingga tidak membutuhkan periode adaptasi gelap menggunakan klip yang menyita banyak waktu. Pada pengamatan CF di malam hari, pengamatan CF paling cepat dapat dimulai dua jam setelah matahari

terbenam. Waktu tersebut dibutuhkan untuk mendapatkan hasil pengamatan F_0 yang akurat setelah tanaman karet terpapar sinar matahari

selama sekitar 12 jam. Penentuan waktu pengamatan CF pada malam hari tersebut berdasarkan hasil penelitian Cahyo *et al.*



Gambar 2. Kurva kenaikan F_v/F_m (*quantum yield* maksimum dari proses fotosintesa) pada malam hari

(2021), seperti pada Gambar 2.

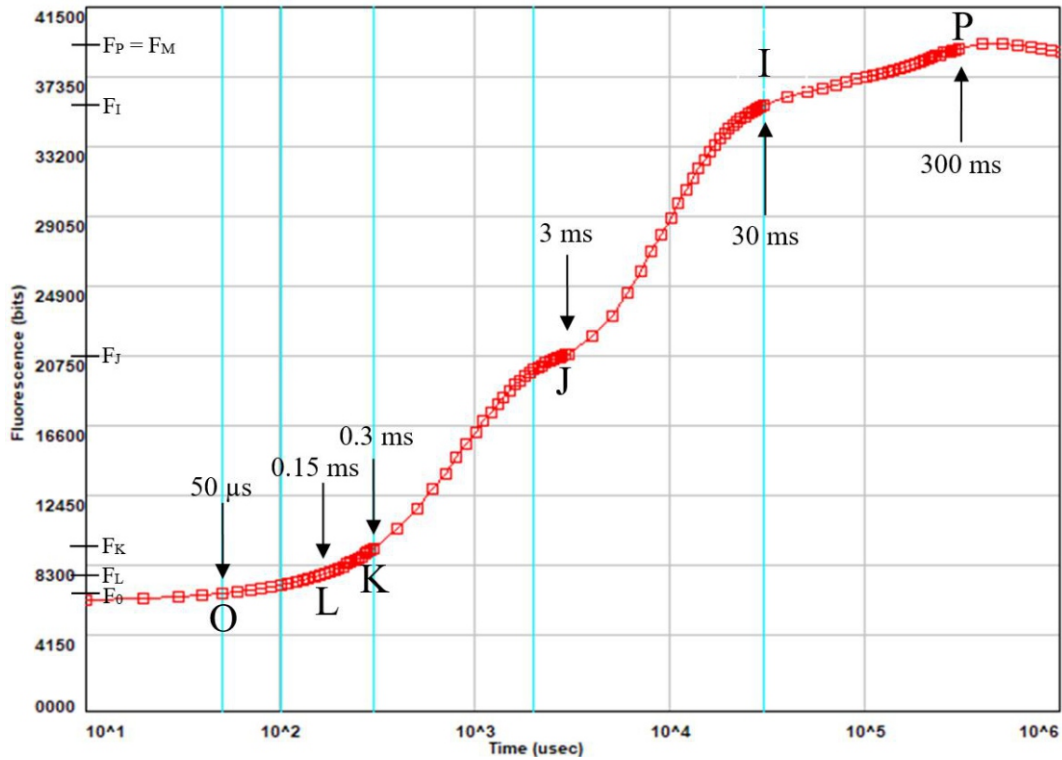
Penelitian Cahyo *et al.* (2021) menunjukkan bahwa kestabilan parameter F_v/F_m tercapai apabila pengamatan CF dilakukan paling cepat dua jam setelah matahari terbenam (matahari terbenam sekitar pukul 18.30 WIB pada saat penelitian tersebut dilakukan), yaitu dimulai pada pukul 20.30 WIB. F_v/F_m merupakan *quantum yield* maksimum dari proses fotosintesa, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik optimal F_v/F_m digunakan sebagai indikator waktu yang dibutuhkan untuk mencukupi periode adaptasi gelap.

Berdasarkan kurva OLKJIP pada Gambar 3, dapat diperoleh beberapa parameter hasil pengamatan CF dan turunannya (Tabel 1). Berdasarkan beberapa parameter hasil pengamatan CF tersebut, dapat ditentukan nilai PI yang merupakan fungsi dari parameter $1-V_j$, RC/ABS, dan F_v/F_m (Banks, 2017; Kalaji *et al.*, 2016; Oukarroum *et al.*, 2007; Strasser *et al.*, 2004). Parameter pengamatan

CF tersebut telah banyak digunakan untuk mengevaluasi ketahanan suatu spesies/genotipe terhadap cekaman lingkungan (Oukarroum *et al.*, 2007).

Variabel Pengamatan *Chlorophyll-a* Fluorescence

Pengamatan CF dapat dilakukan apabila periode adaptasi gelap sudah tercapai, sehingga daun tanaman yang akan diamati mempunyai nilai F_0 yang stabil pada aras minimal. Pada saat pengamatan, *chlorophyll fluorimeter* yang digunakan akan memberikan cahaya dengan panjang gelombang dan *Photosynthetic Photon Flux Density* (PPFD) tertentu pada daun tanaman. Klorofil pada daun tanaman yang diamati akan menangkap dan memendarkan balik sebagian cahaya tersebut, sehingga cahaya tersebut akan ditangkap kembali oleh sensor *chlorophyll fluorimeter*. Contoh hasil dari pengamatan CF pada tanaman karet adalah kurva OLKJIP seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva OLKJIP hasil pengamatan CF pada tanaman karet.

Tabel 1. Beberapa parameter hasil pengamatan CF dan turunannya

| Parameter CF | Keterangan |
|---|--|
| F_0 | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-O |
| F_L | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-L |
| F_K | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-K |
| F_J | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-J |
| F_I | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-I |
| $F_P = F_M$ | Intensitas cahaya <i>fluorescence</i> pada langkah-P |
| $F_V = F_M - F_0$ | Perbedaan antara F_M dan F_0 |
| $\psi_O = 1 - V_J = 1 - ((F_{2ms} - F_0) / F_V)$ | Fraksi elektron yang ditransportasikan melewati <i>quinone A</i> (Q_A) per <i>exciton</i> yang terperangkap pada pusat reaksi PSII |
| $\left[\frac{\gamma_o}{1 - \gamma_o} \right] \sim \left[\frac{Chl_{RC}}{Chl_{Antenna}} \right] \sim \left[\frac{RC}{ABS} \right] \sim \left[\frac{(F_{2ms} - F_{50\mu s})}{4(F_{300\mu s} - F_{50\mu s})} \right] \left[\frac{F_V}{F_M} \right]$ | Rasio klorofil pusat reaksi dan klorofil antenna |
| $F_V / F_M \sim (1 - (F_0 / F_M)) \sim \varphi P_o$ | <i>Quantum yield</i> maksimum dari proses fotosintesa |
| $PI = \left[\frac{\gamma_o}{1 - \gamma_o} \right] \left[\frac{\varphi P_o}{1 - \varphi P_o} \right] \left[\frac{\psi_o}{1 - \psi_o} \right]$ | <i>Performance Index</i> (Indeks Kebugaran) |

Pemanfaatan Data *Chlorophyll-a Fluorescence* untuk Seleksi Ketahanan Tanaman Terhadap Cekaman Lingkungan

Chlorophyll-a fluorescence telah berhasil dimanfaatkan untuk mengidentifikasi karakteristik fisiologis dan menyeleksi ketahanan berbagai spesies tanaman terhadap cekaman lingkungan, baik itu cekaman kekeringan, suhu rendah, maupun kadar garam tinggi. Sebagai contoh, *Chlorophyll-a fluorescence* telah berhasil dimanfaatkan untuk menyeleksi genotipe tahan kekeringan pada tanaman barley (Oukarroum *et al.*, 2007), wijen (Boureima *et al.*, 2012), karet (Thomas *et al.*, 2015), dan suhu rendah pada tanaman kedelai (Strauss *et al.*, 2006). Selain itu, Tsai *et al.* (2019) juga menyebutkan bahwa tanaman padi yang tahan cekaman kadar garam tinggi mempunyai korelasi positif dengan parameter efisiensi fotosintesa.

Pengamatan PI pada kondisi normal, kekeringan moderat, dan kekeringan parah dapat dipergunakan untuk menghitung nilai *Drought Factor Index* (DFI). Selain nilai PI, untuk menghitung nilai DFI diperlukan nilai status air tanaman (dapat diketahui dengan menghitung nilai FTSW (*Fraction of Transpirable Soil Water*), potensial air tanaman, kadar air daun relatif, dan sebagainya). Salah satu metode *non-destructive* dalam menentukan status air tanaman adalah dengan menghitung nilai FTSW. Pengamatan *non-destructive* dalam menghitung nilai DFI sangat diperlukan karena biasanya jumlah sampel suatu nomor genotipe salam suatu populasi hasil persilangan sangat terbatas, sehingga diperlukan suatu metode penelitian yang tidak merusak sampel genotipe tersebut. Selain itu, pengamatan tingkat ketahanan suatu genotipe/spesies tanaman dengan menggunakan perhitungan DFI mempunyai kelebihan, yaitu pengamatannya lebih murah, mudah, dan lebih cepat (kurang dari satu detik untuk satu pengamatan nilai PI) dibandingkan dengan pengamatan analisis biokimia sampel tanaman. Pengamatan nilai DFI ini sangat sesuai untuk seleksi awal klon karet sebelum klon karet tersebut diseleksi di lapangan yang

membutuhkan biaya besar, sehingga pengamatan DFI sebagai tahap seleksi awal ini dapat menghemat biaya program pemuliaan tanaman karet.

DFI menggambarkan penurunan nilai PI selama periode cekaman lingkungan (Kalaji *et al.*, 2016). DFI dapat dihitung dengan rumus berikut (Boureima *et al.*, 2012; Oukarroum *et al.*, 2007; Strauss *et al.*, 2006):

$$DFI = \log A + 2 \log B$$

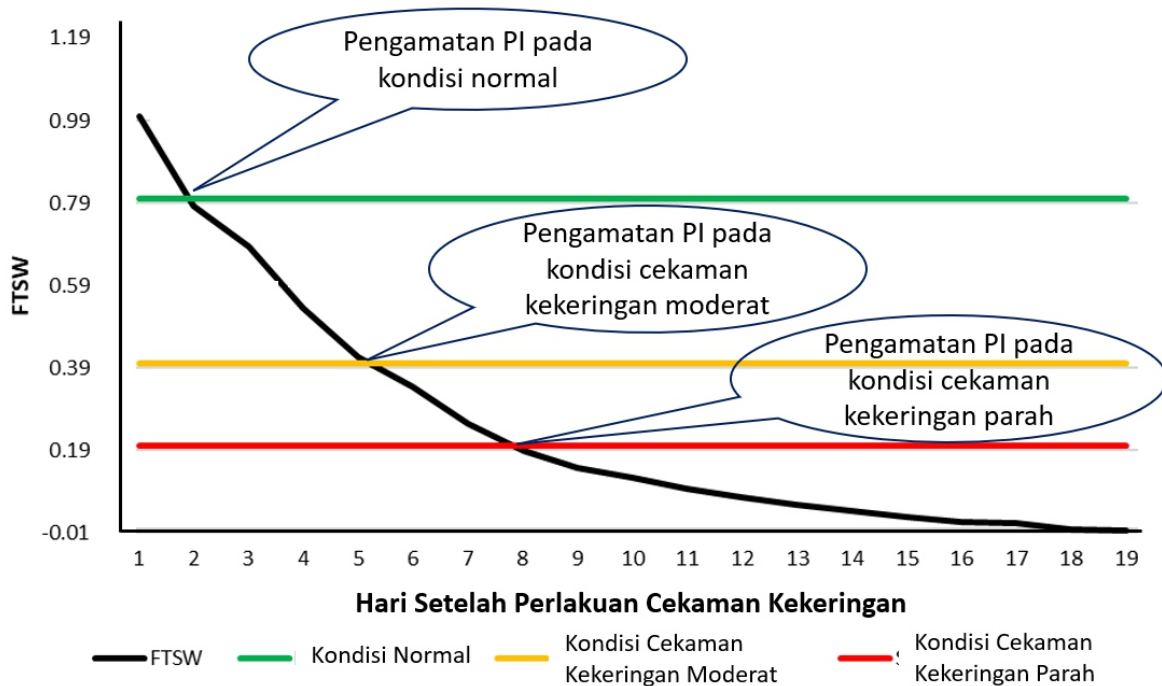
dimana:

$$A = \frac{PI_{\text{saat cekaman kekeringan moderat}}}{PI_{\text{kontrol}}}$$

$$B = \frac{PI_{\text{saat cekaman kekeringan parah}}}{PI_{\text{kontrol}}}$$

Perhitungan nilai DFI membutuhkan nilai PI saat kondisi normal, cekaman kekeringan moderat, dan cekaman kekeringan parah. Ketiga kondisi status air tanaman tersebut dapat diketahui dengan perhitungan nilai FTSW. Sebagai contoh, waktu pengamatan PI pada nilai FTSW yang mencerminkan kondisi normal, kekeringan moderat, dan kekeringan parah untuk penentuan nilai DFI untuk tanaman karet dapat dilihat pada Gambar 4.

Gambar 4 menunjukkan waktu pengamatan PI berdasarkan status air tanaman (FTSW). Nilai FTSW yang menggambarkan status air tanaman karet adalah sekitar 0,8 untuk kondisi normal, 0,4 untuk cekaman kekeringan moderat, dan 0,2 untuk cekaman kekeringan parah (Sanier *et al.*, 2013). Nilai FTSW tersebut menunjukkan bagian air media tanam dan tanaman yang tersisa untuk transpirasi. Oleh karena itu, pada pengamatan FTSW, pot yang digunakan (permukaan media tanamnya) harus dibungkus/ditutup dengan plastik untuk menghindari proses evaporasi dan hanya memungkinkan untuk terjadi transpirasi. Untuk menentukan nilai FTSW, digunakan rumus sebagai berikut (Kholová *et al.*, 2011; Leclercq *et al.*, 2012; Luquet *et al.*, 2008):



Gambar 4. Contoh pengamatan PI pada tanaman karet saat nilai FTSW menunjukkan kondisi status air tanaman dalam keadaan normal, kekeringan moderat, dan kekeringan parah.

$$FTSW = \frac{\text{berat pot pada hari ke } n - \text{berat akhir pot}}{\text{berat awal pot} - \text{berat akhir pot}}$$

Pada rumus FTSW tersebut, berat awal pot adalah berat pot beserta media tanam dan tanaman yang diamati setelah media tanam disiram hingga tercapai kapasitas lapang. Kapasitas lapang ditandai dengan berhentinya tetesan air dari bagian bawah pot setelah media tanamnya disiram hingga menjadi jenuh air. Kondisi ini biasanya tercapai semalam setelah penyiraman dilakukan pada media tanam yang porositasnya baik. Selain itu, berat pot pada hari ke-n adalah berat pot, media tanam, beserta tanamannya pada saat hari ke-n setelah perlakuan cekaman kekeringan dilaksanakan, sedangkan berat akhir pot adalah berat pot, media tanam, beserta tanamannya saat kurva FTSW mulai mendatar atau nilai *normalized transpiration rate* (NTR) nya adalah sekitar 0,1.

Prinsip dari DFI adalah genotip yang tahan cekaman lingkungan akan dapat bertahan

lebih lama dari pada genotip yang sensitif cekaman lingkungan (Oukarroum *et al.*, 2007). Genotip yang lebih sensitif terhadap cekaman lingkungan menunjukkan penurunan PI yang lebih tajam pada saat periode kekeringan parah sehingga nilai DFI menjadi lebih negatif (Boureima *et al.*, 2012). Rendahnya nilai DFI menunjukkan penurunan aktivitas PSII yang besar sebagai akibat dari cekaman lingkungan. Nilai DFI yang lebih rendah juga menunjukkan lebih sensitifnya suatu genotip terhadap cekaman lingkungan termasuk cekaman kekeringan (Stirbet *et al.*, 2018). DFI telah berhasil digunakan untuk mengurutkan tingkat ketahanan genotip terhadap cekaman kekeringan pada spesies *Sesamum indicum* (Boureima *et al.*, 2012), *Cicer arietinum* L. (Çiçek & Arslan, 2015), *Hordeum vulgare* L. (Oukarroum *et al.*, 2007), *Elaeis guineensis* (de Raissac *et al.*, 2017), dan *Hevea brasiliensis* (Cahyo *et al.*, 2022a). Pada tanaman karet, klon RRIM 600 yang tahan cekaman kekeringan terbukti mempunyai nilai DFI yang lebih

tinggi dari pada klon PB 260 yang peka terhadap cekaman kekeringan (Cahyo *et al.*, 2022a; Cahyo *et al.*, 2022b).

Kesimpulan

Parameter *chlorophyll-a fluorescence* dapat digunakan untuk mendeteksi tingkat kebugaran tanaman karet. Parameter *chlorophyll-a fluorescence* yang mencerminkan tingkat kebugaran tanaman karet adalah *Performance Index* (PI). Pengamatan PI pada saat kondisi normal, kekeringan moderat, dan kekeringan parah dapat digunakan untuk menentukan nilai DFI. Semakin tinggi nilai DFI, semakin tinggi ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan, dan sebaliknya. Penentuan nilai DFI sangat berguna untuk kegiatan seleksi awal klon karet yang tahan terhadap cekaman kekeringan. Seleksi awal klon karet berdasarkan DFI tersebut relatif lebih murah dan cepat dibandingkan pengamatan biokimia tanaman dengan analisis laboratorium, sehingga dapat menghemat waktu dan biaya yang harus dikeluarkan pada program pemuliaan tanaman karet. Perhitungan DFI klon karet pada fase bibit membuktikan bahwa nilai DFI klon RRIM yang tahan terhadap cekaman kekeringan lebih tinggi dibandingkan klon PB 260 yang peka terhadap cekaman kekeringan.

Daftar Pustaka

- Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607 – 1621 . <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- Banks, J. M. (2017). Continuous excitation chlorophyll fluorescence parameters: A review for practitioners. *Tree Physiology*, 37(8), 1128 – 1136 . <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx059>
- 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>
- 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., & Montoro, P. (2022b). Rubber Genotypes with Contrasting Drought Factor Index Revealed Different Mechanisms for Drought Resistance in *Hevea brasiliensis*. *Plants*, 11(24), 3563 . <https://doi.org/10.3390/plants11243563>
- Cahyo, A. N., Murti, R. H., Putra, E. T. S., Oktavia, F., Ismawanto, S., Mournet, P., Fabre, D., & Montoro, P. (2022a). 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>
- Çiçek, N., & Arslan, Ö. (2015). Are The Photosynthetic Performance Indexes and The Drought Factor Index Satisfactory Selection Criterion for Stress? *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(11), 4190–4198.
- de Raissac, M., Perez, R., & Fabre, D. (2017). New Challenges in Oil Palm Phenotyping in Relation to Climate. In A. C. Soh, S. Mayes, & J. Roberts (Eds.), *Oil Palm Breeding, Genetics and Genomics* (p. 446). CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.06.019>
- Giorio, P. (2011). Black leaf-clips increased minimum fluorescence emission in clipped leaves exposed to high solar radiation during dark adaptation. *Photosynthetica*, 49(3), 371–379. <https://doi.org/10.1007/s11099-011-0040-0>
- Giorio, P., Nuzzo, V., Guida, G., & Albrizio, R. (2012). Black leaf-clips of a commercial fluorometer increased leaf temperature during dark adaptation under high solar radiation. *Photosynthetica*, 50(3), 467–471. <https://doi.org/10.1007/s11099-012-0042-6>
- Govindjee. (1995). Sixty-Three Years Since Kautsky: Chlorophyll a Fluorescence. *Functional Plant Biology*, 22(2), 131. <https://doi.org/10.1071/PP9950131>
- Hansatech Instrument Ltd. (2018). Handy PEA+ and Pocket PEA System Manual. Hansatech Instrument Ltd.
- Jedrowski, C., Ashoub, A., Momtaz, O., & Brüggemann, W. (2015). Impact of Drought, Heat, and Their Combination on Chlorophyll Fluorescence and Yield of Wild Barley (*Hordeum spontaneum*). *Journal of Botany*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/120868>
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Ukasik, I., Goltsev, V., & 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>
- Kalaji, H. M., Schansker, G., Ladle, R. J., Goltsev, V., Bosa, K., Allakhverdiev, S. I., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., D browski, P., Elsheery, N. I., Ferroni, L., Guidi, L., Hogewoning, S. W., Jajoo, A., Misra, A. N., Nebauer, S. G., Pancaldi, S., Penella, C., ... Zivcak, M. (2014). Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: Practical issues. *Photosynthesis Research*, 122(2), 121–158. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-0024-6>
- 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>
- Leclercq, J., Martin, F., Sanier, C., Clément-Vidal, A., Fabre, D., Oliver, G., Lardet, L., Ayar, A., Peyramard, M., & 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. <https://doi.org/10.1007/s11103-012-9942-x>
- Luquet, D., Clément-Vidal, A., Fabre, D., This, D., Sonderegger, N., & Dingkuhn, M. (2008). Orchestration of transpiration, growth and carbohydrate dynamics in rice during a dry-down cycle. *Functional Plant Biology*, 35(8), 689–704. <https://doi.org/10.1071/FP08027>
- 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>

- 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.
- Schansker, G., Yuan, Y., & Strasser, R. J. (2008). Chl a Fluorescence and 820 nm Transmission Changes Occurring During a Dark-to-Light Transition in Pine Needles and Pea Leaves: A Comparison. In J. F. Allen, E. Gantt, J. H. Golbeck, & B. Osmond (Eds.), *Energy from the Sun* (pp. 945–949). Springer.
- Stirbet, A. & Govindjee. (2011). On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 104(1–2), 236–257. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.12.010>
- 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). 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), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.011>
- Thomas, M., Xavier, S. M., Sumesh, K. V., Annamalainathan, K., Nair, D. B., & Mercy, M. A. (2015). Identification of Potential Drought Tolerant Hevea Germplasm Accessions using Physiological and Biochemical Parameters. *Rubber Science*, 28(1), 62–69.
- Tsai, Y.-C., Chen, K.-C., Cheng, T.-S., Lee, C., Lin, S.-H., & Tung, C.-W. (2019). Chlorophyll fluorescence analysis in diverse rice varieties reveals the positive correlation between the seedlings salt tolerance and photosynthetic efficiency. *BMC Plant Biology*, 19(1), 403. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1983-8>
- Zushi, K., & Matsuzoe, N. (2017). Using of chlorophyll a fluorescence OJIP transients for sensing salt stress in the leaves and fruits of tomato. *Scientia Horticulturae*, 219, 216–221. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.016>