

Regulasi Gen Tanaman Kakao (*Theobroma cacao* L.) Tanggapan Cekaman Kekeringan

Ayu Zahrotul Fuadati¹⁾, Aminatun Munawarti¹⁾, and Erwin Prastowo²⁾

¹⁾Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Malang

²⁾Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia, Jl. P.B. Sudirman 90 Jember 68118

Cekaman kekeringan membatasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman kakao (*Theobroma cacao* L.). Kekeringan akan mengubah fungsi dan aktivitas metabolisme secara seluler dan molekular sebagai respon terhadap kondisi tersebut. Proses tanaman untuk toleran terhadap kekeringan ditandai dengan aktivasi mekanisme pensinyalan dan respon molekular yang diekspresikan secara diferensial. Toleransi kekeringan terdiri atas pensinyalan dan aktivasi berbagai respon cekaman termasuk mekanisme fisiologis, molekular, dan biokimia. Di tingkat seluler, kekeringan menginduksi produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) secara berlebihan yang dapat menyebabkan sel pecah dan menstimulasi berbagai pensinyalan cekaman.



Kakao adalah tanaman perkebunan yang berperan penting sebagai sumber bahan baku industri pengolahan coklat. Pertumbuhan kakao yang optimal sangat dipengaruhi oleh perubahan cuaca. Perubahan cuaca yang cenderung ke arah lebih kering menyebabkan adanya keterbatasan ketersediaan air, bahkan hingga menyebabkan terjadinya kekeringan lahan yang telah terjadi di beberapa wilayah. Kondisi kekeringan ini berpotensi menyebabkan terhambatnya aktivitas fisiologi dan menurunnya produktivitas kakao¹⁾.

Beberapa jenis klon kakao saat ini telah beradaptasi dan lebih toleran terhadap kondisi kekeringan untuk mempertahankan produktivitasnya. Proses adaptasi tersebut melibatkan banyak gen yang terkait dengan pensinyalan seluler yang memodifikasi beberapa respon fisiomorfologis maupun molekular. Proses pensinyalan tersebut dipersepsikan

bertempat di membran sel tumbuhan yang dapat menstimulasi berbagai mekanisme dan bergantung pada hormon yang tersedia. Jaringan *mitogen-activated-protein-kinase* (MAPK) terlibat dalam pensinyalan dan aktivasi stress beberapa protein yang responsif²⁾.

Jalur pensinyalan ditandai dengan terakumulasinya kalsium (Ca) yang dapat mengendalikan proses fisiologis. Konsentrasi Ca tersebut sangat bervariasi di dalam sitoplasma sebagai respon terhadap cekaman kekeringan dan berbagai hormon seperti asam absisat (ABA), asam jasmonat (JA), dan etilen³⁾. Apabila konsentrasi Ca tinggi, maka salah satu hormon seperti ABA berinteraksi dengan protein SnRK2 yang memulai respon molekular dan fisiologis terhadap stress kekeringan. Selanjutnya, respon yang dihasilkan menyebabkan terjadinya overproduksi *Reactive Oxygen Species* (ROS), memicu mekanisme

pertahanan⁴⁾, dan terjadinya perubahan aktivitas enzim yang terlibat dalam antioksidan dan metabolisme⁵⁾.

Setelah transduksi pensinyalan berhasil, tanaman mampu mengadopsi pemulihan mekanisme kekeringan. Tentunya, hal tersebut akan menunjukkan respon perubahan dalam ekspresi dan regulasi gen⁶⁾. Ekspresi dan regulasi gen memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan air yang menguntungkan dalam sel dan jaringan tanaman. Tulisan ini bertujuan untuk mereviu pensinyalan regulasi gen dan adaptasi tanaman kakao untuk mengatasi dampak cekaman kekeringan.

Perubahan Ekspresi Gen pada Kakao yang Disebabkan oleh Kekeringan

TcODC, TcADC, dan TcSAMDC dapat berbagi jalur transduksi sinyal dan/atau jalur induksi sinyal yang diinduksi tegangan dapat menyatu pada tiga

gen yang mengarah pada pola ekspresi yang serupa meskipun tidak identik. Hal ini memungkinkan untuk mengubah level kandungan poliamin dalam kakao, sehingga menghasilkan peningkatan toleransi terhadap berbagai tekanan termasuk kekeringan. Meskipun menunjukkan beberapa ekspresi diferensial karena tahap perkembangan dan kekhususan jaringan, gen yang responsif pada tanaman kakao dan terlibat dalam biosintesis polyamine yaitu TcODC, TcADC, dan TcSAMDC, sedangkan gen TcSPDS dan TcSPMS, meskipun responsif terhadap banyak tekanan, cenderung menjadi kurang responsif¹⁾.

Selain ketiga gen tersebut, juga terdapat gen-gen lain yang diduga terlibat dalam respon produksi metabolit terhadap kekeringan (Tabel 1). Produksi metabolit yang berperan adalah senyawa organik (*osmolytes*) seperti halnya gula, gula alkohol, asam amino, dan amina. *Osmolytes* terakumulasi di bawah tekanan kekeringan sehingga dapat menstabilkan protein, struktur sel, dan mempertahankan turgor sel⁷⁾⁸⁾

Tabel 1. Gen responsif pada kakao yang terdampak cekaman kekeringan

Gen	Sinyal	Fungsi
<i>TcODC</i> Ornithine decarboxylase ¹⁾	Biosintesis poliamin	Kadar rendah kecuali dalam jaringan yang diinduksi
<i>TcADC</i> Arginine	Biosintesis poliamin decarboxylase ¹⁾	Lebih penting diproduksi pada saat kakao dalam kondisi pertumbuhan normal
<i>TcSAMDC</i> S-adenosylmethionine decarboxylase ¹⁾	Biosintesis poliamin	Mengaktivasi respon fisiologi terhadap tekanan lingkungan
<i>TcTPP</i> ⁹⁾	Biosintesis trehalose	Toleransi terhadap kekeringan
<i>TcSOT</i> ¹⁰⁾	Biosintesis Karbohidrat (Kode: Sorbitol) Mempengaruhi fungsi membran	Toleransi terhadap kekeringan
<i>TcPR5</i> ¹¹⁾	Osmotik	Toleransi terhadap kekeringan
<i>TcNI</i> ¹²⁾	Biosintesis osmoprotektif	Kekeringan yang berefek pada daun
<i>TcCESA3</i> ¹³⁾	Biosintesis selulosa sintase	Kekeringan yang berefek pada akar
<i>TcLOX1</i> ¹⁴⁾	Asam jasmonat	Kekeringan hanya pada akar
<i>TcAOC</i> ¹⁵⁾	Asam jasmonat	Kekeringan hanya pada akar
<i>TcTIP</i> ¹⁶⁾	Protein intrinsik tonoplast/ mempengaruhi fungsi membran	Toleran stress yang dibantu dengan adanya DIS 219b
<i>TxABC-T</i> ¹⁷⁾	Mempengaruhi fungsi membran	Pergerakan molekul melintasi membran
<i>TcNR1</i> ¹⁸⁾	Nitrat reduktase (akar)	Represi oleh kekeringan
<i>TcRPK</i> ²⁾	MAPK	Pertahanan tanaman
<i>TcMKK4</i> ²⁾	MAPK	Pertahanan tanaman
<i>TcSTK</i> ²⁾	MAPK	Pertahanan tanaman
<i>TcCHK</i> ¹⁹⁾	Sitokinin	Respon terhadap kekeringan
<i>TcPP2C</i> ²⁰⁾	ABA	Respon terhadap kekeringan
<i>TcZFP</i> ¹⁶⁾	Kolonisasi trichoderma	Menghambat kekeringan
<i>TcNAC</i> ²¹⁾	Transkripsi faktor	Toleransi kekeringan

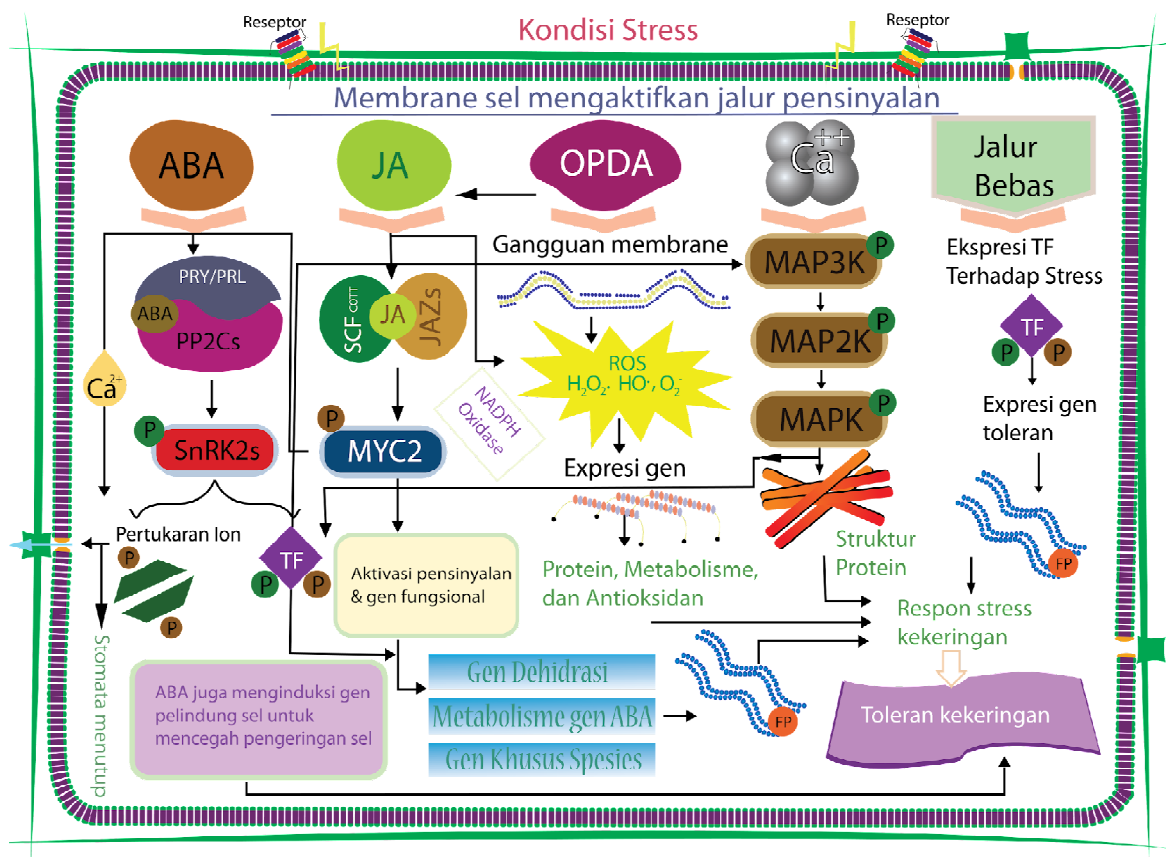
Jalur Sinyal Seluler dan Molekular Toleransi terhadap Cekaman Kekeringan

Pensinyalan seluler dan molekular pada tumbuhan diaktifkan untuk mengatur mekanisme pertahanan cekaman biotik dan abiotik (Gambar 1). Namun demikian, mekanisme ini belum sepenuhnya dieksplorasi dalam kakao dan dapat memberikan potensi untuk meningkatkan toleransi terhadap kekeringan. Respon perubahan ekspresi dan regulasi gen yang dapat terjadi, antara lain meningkatkan stabilitas membran sel, elastisitas dinding sel, dan penyesuaian osmotik²².

Pemicu pensinyalan pertama kali bergantung pada membran sel. ABA bekerjasama dengan kompleks PRY/PRL, RCARs, dan PP2Cs yang terbentuk karena adanya induksi kekeringan untuk mengaktifkan protein SnRK2 (P)²³. SnRK2 diaktifkan secara otomatis ketika dipisahkan dari

PP2C. Kemudian, SnRK2 yang diaktifkan digunakan untuk mengatur proses molekular dan fisiologis. Hal serupa juga terjadi pada asam jasmonat (JA) yang terlibat dalam jasmonate-zim (JAZ) dalam kompleks dengan SCF dan TF (MYC2), dan mengaktifkan gen yang responsif terhadap cekaman.

Jumlah ROS yang meningkat merupakan respon terhadap asam oxo-phytodienoic (OPDA) dan JA mengaktifkan unit pemberi sinyal stres. ROS dalam bentuk superoksida (O_2^-), hydrogen peroksida (H_2O_2), dan radikal hidroksil (OH). Pengaktifan ROS dapat menyebabkan cedera jaringan dimana terjadi kerusakan pada semua target molekul, DNA, protein, dan lipid (lipid peroksidasi)²⁴. Kalsium berinteraksi dengan mitogen-activated protein kinase (MAPK) untuk mengaktifkan faktor transkripsi dan pensinyalan gen. Akhirnya, protein fungsional (FP) disintesis untuk respon cekaman kekeringan¹⁹.



Gambar 1. Jalur pensinyalan tanaman yang diinduksi kekeringan untuk meningkatkan toleransi kekeringan pada tanaman (Sumber: Mahmood *et al.*, 2020 dalam modifikasi)

Penutup

Perubahan level kandungan *polyamine* dalam tanaman kakao akan menghasilkan peningkatan toleransi terhadap berbagai tekanan, termasuk kekeringan yang dipengaruhi oleh respon gen-gen terutama TcODC, TcADC, dan TcSAMDC. Respon perubahan ekspresi dan regulasi gen yang dapat terjadi, antara lain peningkatan stabilitas membran sel, elastisitas dinding sel, dan penyesuaian osmotik. Toleransi kekeringan terdiri atas pensinyalan dan aktivasi berbagai respon cekaman termasuk mekanisme fisiologis, molekuler, dan biokimia. Di tingkat seluler, kekeringan menginduksi produksi *Reaktif Oxygen Spesies (ROS)* secara berlebihan yang dapat menyebabkan sel pecah dan menstimulasi berbagai pensinyalan cekaman. Mekanisme pensinyalan seluler dan molekul untuk mengatur pertahanan cekaman biotik dan abiotik belum sepenuhnya dieksplorasi dalam kakao, dan dapat memberikan potensi untuk meningkatkan toleransi terhadap kekeringan.

Sumber Pustaka

- ¹⁾Bae, H.; S.H. Kim; M.S. Kim; R.C. Sicher; D. Lary & M.D. Strem (2008). The drought response of *Theobroma cacao* L., and regulation of genes involved in polyamine biosynthesis by drought and other stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46, 174–188.
- ²⁾Beck, E.H.; S. Fettig; C. Knake; K. Hartig & T. Bhattarai (2007). Specific and unspecific responses of plants to cold and drought stress. *Journal of Biosciences*, 32, 501–510.
- ³⁾Tuteja, N. & S.K. Sopory (2008). Chemical signaling under abiotic stress environment in plants. *Plant Signal Behav.*, 3(8), 525–536.
- ⁴⁾Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141, 391–96.
- ⁵⁾Lei, Y.; C. Yin & C. Li (2006). Differences in some morphological physiological and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalski*. *Physiologia plantarum*, 127, 182–191.
- ⁶⁾Saibo, N.J.M.; O.T. Lourenc & M.M. Oliveira (2009). Transcription factors and regulation of photosynthetic and related metabolism under environmental stresses. *Annals of Botany*, 103, 609–623.
- ⁷⁾Seki, M.; T. Umezawa; K. Urano & K. Shinozaki (2007). Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, 10, 296–302.
- ⁸⁾Bae, H.; R.C. Sicher; S.M. Kim; Kim S.H.; M.D. Strem; R.L. Melnick & B.A. Bailey (2009). The beneficial endophyte *Trichoderma hamatum* isolate DIS 219b promotes growth and delays the onset of the drought response in *Theobroma cacao*. *Journal of Experimental Botany*, 60(11), 3279–3295.
- ⁹⁾Garg, A.K.; J.-K. Kim; T.G. Owens; A.P. Ranwala; Y.D. Choi; L.V. Kochian & R.J. Wu (2002). Trehalose accumulation in rice plants *Trichoderma* delays the onset of the drought response in cacao | 3293 confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 99, 15898–15890.
- ¹⁰⁾Watari, J.; Kobae Y.; S. Yamaki; K. Yamada; K. Toyofuku; T. Tabuchi & K. Shiratake (2004). Identification of sorbitol transporters expressed in the phloem of apple source leaves. *Plant Cell and Physiology*, 45, 1032–1041.
- ¹¹⁾D'Angeli, S. & M.M. Altamura (2007). Osmotin induces cold protection in olive trees by affecting programmed cell death and cytoskeleton organization. *Planta*, 225, 1147–1163.
- ¹²⁾Sturm, A. (1999). Invertases: primary structures, functions, and roles in plant development, and sucrose partitioning. *Plant Physiology*, 121, 1–7
- ¹³⁾Foyer, C.H.; M.H. Valadier; A. Migge & T.W. Becker (1998). Drought induced effects on nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination of nitrogen and carbon metabolism in maize leaves. *Plant Physiology*, 117, 283–292.
- ¹⁴⁾Hause, B.; G. Hause; C. Kutter; O. Miersch & C. Wasternack (2003). Enzymes of jasmonate biosynthesis occur in tomato sieve elements. *Plant Cell and Physiology*, 44, 643–648.
- ¹⁵⁾Stenzel, I.; B. Hause; O. Miersch; T. Kurz; H. Maucher; H. Weichert; J. Ziegler; I. Feussner & C. Wasternack (2003). Jasmonate biosynthesis and the allene oxide cyclase family of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Molecular Biology*, 51, 895–911.
- ¹⁶⁾Bailey, B.A.; H. Bae; M.D. Strem; D.P. Roberts; S.E. Thomas; G.J. Samuels; I.-Y. Choi & K.A. Holmes; (2006). Fungal and plant gene expression during the colonization of cacao seedlings by endophytic isolates of four *Trichoderma* species. *Planta*, 224, 1449–1464.
- ¹⁷⁾Jasinski, M.; E. Ducos; E. Martinoia & M. Boutry (2003). The ATP- binding cassette transporters: structure, function and gene family comparison between rice and *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 131, 1169–1177.
- ¹⁸⁾Ferrario-Mery, S.; M.-H. Valadier & C.H. Foyer (1998). Overexpression of nitrate reductase in tobacco delays drought-induced decreases in nitrate reductase activity and mRNA. *Plant Physiology*, 117, 293–302.
- ¹⁹⁾Zhu, J.-K. (2002). Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 53, 247–273.
- ²⁰⁾Tahtiharju, S. & T. Palva (2001). Antisense inhibition of protein phosphatase 2C accelerates cold acclimation in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 26, 461–470.

- ²¹⁾Bailey, B.A.; H. Bae; M.D. Strem; D.P. Roberts; S.E. Thomas; G.J. Samuels; I.-Y. Choi & K.A. Holmes (2006). Fungal and plant gene expression during the colonization of cacao seedlings by endophytic isolates of four *Trichoderma* species. *Planta*, 224, 1449–1464.
- ²²⁾Fang, Y. & L. Xiong (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689.
- ²³⁾Ma, Y.; I. Szostkiewicz; A. Korte; D. Moes & Y. Yang (2009). Regulators of PP2C phosphatase activity function as abscisic acid sensors. *Science*, 324, 1064–1068.
- ²⁴⁾Santos, C.I.; F.D.A. Alex-Alan; D. Anher; S.C.P. Alessandro; J.L. Pirovani; R.V. Pires & V.C. Baligar (2014). Molecular, Physiological, and Biochemical Responses of *Theobroma cacao* L. Genotypes to Soil Water Stress. *Journal PLOS ONE*, 9, 12.
- ²⁵⁾Mahmood, T.; S. Khalid; M. Abdullah; Z. Ahmed; M.K.N. Shah; A. Ghafoor & X. Du (2019). Insights into Drought Stress Signaling in Plants and the Molecular Genetic Basis of Cotton Drought Tolerance. *Cells*, 9(1), 105.



BUMN 

Kopi Arabika Varietas Komasti SK Mentan
No 200/kpts/SR.120/1/2013

KOMASTI
Komposit Andung Sari Tiga

Varietas Komasti (Komposit Andungsari Tiga) terdiri dari 6 genotipe yang secara morfologi serupa/identik tetapi secara genetik memiliki gen ketahanan berbeda sehingga ketahanannya tidak mudah terpatahkan serta lebih toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan karena variabilitas genetik enotipegenotipe penyusunnya. Potensi produktivitas 2,1 ton/ha untuk populasi 2000 ph/ha Tanaman kokoh, tahan serangan angin. Rentan serangan bubuk buah kopi. Rentan nematoda *Radopholus similis* dan *Pratylenus coffeae*. Ukuran biji besar, berbentuk oval, mutu seduhan bagus dengan nilai kesukaan 7,5.

 Pusat Penelitian Kopi dan Kakao Indonesia