

EKSPRESI GEN-GEN BIOSINTESIS KUMARIN PADA KUNYIT (*Curcuma longa* L.) PADA KONDISI CEKAMAN KEKERINGAN

HAFIZH FADHULLAH



**PROGRAM STUDI BIOTEKNOLOGI
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Ekspresi Gen-Gen Biosintesis Kumarin pada Kunyit (*Curcuma longa* L.) pada Kondisi Cekaman Kekeringan” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, November 2024

Hafizh Fadhullah
P0501212022

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

HAFIZH FADHULLAH. Ekspresi Gen-Gen Biosintesis Kumarin pada Kunyit (*Curcuma longa* L.) pada Kondisi Cekaman Kekeringan. Dibimbing oleh MIFTAHUDIN dan TEUKU TAJUDDIN.

Cekaman kekeringan yang semakin intens dikarenakan pemanasan global yang semakin meningkat menjadi pusat perhatian berbagai pihak. Cekaman kekeringan memberikan dampak negatif dalam berbagai aspek. Salah satu yang paling berdampak adalah pada bidang pertanian. Di beberapa daerah terjadi perubahan cuaca dan iklim yang menyebabkan kekeringan yang ekstrem. Hal itu berdampak pada kekeringan dan kematian pada tanaman. Namun di sisi lain, ternyata cekaman kekeringan mampu untuk meningkatkan senyawa metabolit sekunder pada tanaman. Hal ini terjadi karena tanaman melakukan proses penyesuaian dalam sel tanaman agar bisa mengatasi cekaman kekeringan yang dihadapi. Ketika cekaman kekeringan terjadi, pada sel tanaman terbentuk senyawa *Reactive Oxygen Species* (ROS) sehingga tanaman menanggapi ROS tersebut sebagai suatu sinyal untuk memproduksi hormon seperti asam jasmonat dan abscisic acid, mengaktifkan faktor transkripsi (WRKY), dan atau protein kinase (MAPK) yang akan mengaktifkan enzim superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), peroksidase (POD) dan meningkatkan biosintesis metabolit sekunder seperti flavonoid dan kumarin. Hal inilah yang mendasari peningkatan kandungan kumarin ketika diberikan perlakuan cekaman kekeringan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan morfo-fisiologis, biokimia, dan molekuler untuk mendapatkan pola hubungan antar peubah dalam mempengaruhi kandungan kumarin serta menemukan periode optimal dari perlakuan cekaman kekeringan pada tanaman untuk mendapatkan senyawa kumarin tertinggi. Rancangan percobaan menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 4 ulangan, dan menggunakan kunyit sebagai bahan penelitian. Penanaman kunyit dilakukan di rumah kaca dengan suhu sekitar $30 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 4 bulan. Setelah tanaman berumur 4 bulan diberikan tiga perlakuan cekaman kekeringan, yaitu perlakuan penyiraman dua hari sekali sebagai kontrol (KO), perlakuan cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari sekali (CKA) dan perlakuan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). Pada hari ke-10, 20 dan 30 dilakukan sampling daun, rimpang, akar dan kandungan air tanah untuk analisis morfo-fisiologi, sementara itu rimpang digunakan sebagai bahan untuk analisis biokimia dan molekuler.

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa cekaman kekeringan memberikan efek negatif pada hampir seluruh peubah uji. Analisis morfologi memperlihatkan bahwa semakin mendekati hari ke-30, cekaman kekeringan memberikan efek negatif yang signifikan. Hal ini didasari pada beberapa peubah pertumbuhan tidak menunjukkan kenaikan dan sebagian lagi menunjukkan penurunan secara signifikan. Pada perlakuan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB) terjadi penurunan sebesar 31,37% pada panjang daun dibandingkan dengan kondisi perlakuan penyiraman kontrol (KO). Selain itu, pada bobot basah batang semu terjadi penurunan 81,84% dibanding bobot basah batang semu pada kondisi perlakuan penyiraman kontrol (KO). Hal ini terlihat juga pada analisis fisiologi yaitu pada peubah laju fotosintesis dan nilai



@ipb_university

IPB University

kandungan klorofil daun (SPAD) pada kondisi CKA dan CKB. Laju fotosintesis berturut-turut menurun sebesar 24,65 dan 30,74% pada kondisi CKA dan CKB. Kandungan klorofil daun berdasarkan nilai SPAD juga menunjukkan penurunan sebesar 41,88% pada kondisi CKA dan 79,40% pada kondisi CKB.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada hari ke-10 setelah cekaman tanaman belum mengalami penurunan secara signifikan pada peubah morfo-fisiologi, tetapi mengalami peningkatan yang signifikan pada ekspresi gen dan kandungan kumarin. Respon tersebut menjadi dasar penentuan periode optimal cekaman kekeringan yang diikuti dengan peningkatan senyawa kumarin. Pada hari ke-10 setelah cekaman, kandungan kumarin pada tanaman yang mendapat perlakuan CKB sebesar 2,21 ppm atau meningkat sebesar 28% dibanding kandungan kumarin pada tanaman yang mendapat perlakuan KO. Meskipun terdapat peningkatan level ekspresi gen *BGA* dan *PAL* pada perlakuan CKB yang berturut-turut sebesar 1,98 kali dan 3,04 kali dari perlakuan KO, tetapi pola ekspresi kedua gen pada hari ke 20 dan 30 setelah cekaman tidak berkorelasi dengan perbedadaan kandungan kumarin pada hari dan kondisi yang sama. Data tersebut menunjukkan bahwa cekaman kekeringan 10 hari mampu meningkatkan ekspresi gen biosintesis kumarin sejalan dengan kandungan kumarin.

Analisis matriks korelasi, PCA, dan *k-means clustering* menambahkan informasi dan visualisasi yang lebih jelas. Analisis matriks korelasi memberikan informasi yang jelas hubungan antara perlakuan cekaman kekeringan dan peningkatan kandungan kumarin. Terlihat bahwa hubungan peubah cekaman kekeringan seperti kelembaban air tanah (KAT), laju fotosintesis (Pn), kandungan klorofil daun (SPAD) dengan peubah kandungan kumarin memiliki nilai negatif (-0,51, -0,38, -0,41). Nilai negatif ini menunjukkan bahwa semakin kecil nilai KAT, Pn dan SPAD maka nilai kandungan kumarin akan semakin tinggi. Analisis PCA dan *k-means clustering* mampu mengelompokkan sampel ke beberapa klaster. Meskipun cekaman kekeringan dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan dan hasil panen, penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi kekeringan yang terkontrol dapat mengoptimalkan produksi senyawa metabolit sekunder seperti kumarin dengan tidak mengorbankan peubah lainnya.

Kata kunci: *BGA*, *C. longa*, cekaman kekeringan, kumarin, *PAL*

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

SUMMARY

HAFIZH FADHULLAH. Expression of Coumarin Biosynthesis Genes in Turmeric (*Curcuma longa* L.) under Drought Stress Conditions. Supervised by MIFTAHUDIN and TEUKU TAJUDDIN.

The increasingly intense threat of drought due to increasing global warming has become the center of attention of various parties. Drought stress has various negative impacts. One of the most impactful is in the agricultural sector. In some areas, weather and climate changes cause extreme drought. This results in drought and the death of plants. However, it turns out that drought stress can increase secondary metabolite compounds. The increase in secondary metabolites happens because plants carry out an adjustment process in plant cells to overcome the drought stress they face. When drought stress occurs, Reacted Oxygen Species (ROS) compounds are formed in plant cells so that plants respond to this as a signal to produce hormones (jasmonic acid and abscisic acid), transcription factors (WRKY), and protein kinases (MAPK), which will later produce proteins (SOD, CAT and POD) and secondary metabolites (flavonoids and coumarin). The formation of proteins and secondary metabolites binds to ROS compounds so that there is no accumulation of ROS in plants. The formation of ROS and secondary metabolites is what underlies the increase in coumarin content when subjected to drought stress treatment.

This research uses morpho-physiological, biochemical, and molecular approaches to obtain patterns of relationships between peubahs and optimal points of days for drought stress treatment in plants to obtain the highest metabolite compounds. We developed a research design using a Completely Randomized Design (CRD) with four replications using turmeric as a research plant. For four months, turmeric is planted in a greenhouse at around $30 \pm 2^\circ\text{C}$. After four months of planting, three drought stress treatments were carried out: a control watering treatment every two days (KO), a drought stress treatment with re-watering every seven days (CKA), and a drought stress treatment without re-watering (CKB). The sampling of leaf, rhizome, root, and soil water content was collected on the days 10, 20, and 30 for morpho-physiological analysis. Rhizomes were used as materials for biochemical and molecular analysis.

This study showed that drought stress harmed almost all test peubahs. Morphological analysis showed that as the 30th day approached, drought stress had a significant negative effect. This is evidenced by several peubahs not showing an increase, and some even showing a significant decrease. Under the drought stress treatment without re-watering (CKB), a 31.37% decrease in leaf length was observed compared to the regular watering treatment (KO). Furthermore, the fresh weight of the pseudostem decreased by 81.84% compared to the regular watering condition (KO). This was also reflected in the physiological analysis, particularly in photosynthetic rate and chlorophyll content (SPAD) under CKA and CKB conditions. In the photosynthesis rate analysis, the CKA condition decreased by 24.65%, while CKB decreased by 30.74%. In the analysis of total chlorophyll content (SPAD), CKA decreased by 41.88%, while CKB showed a decrease of 79.40%.

The findings on day 10 showed that the plants had not experienced a significant decline in morpho-physiological analysis but had a significant increase in molecular analysis and coumarin content. This finding is a basis for determining the optimal point for plants when they are stressed by drought, followed by an increase in coumarin compounds. The increase in coumarin content on day 10 was 28% between CKB treatment and KO. On the 10th day of CKB treatment, 2.21 ppm of coumarin was produced. Although there was an increase in the expression level of *BGA* and *PAL* genes in the CKB treatment which was 1.98 times and 3.04 times of the KO treatment, respectively, the expression pattern of both genes on days 20 and 30 after stress did not correlate with the difference in coumarin content on the same days and conditions. These data indicate that 10 days of drought stress can increase the expression of coumarin biosynthesis genes in line with coumarin content.

Correlation matrix analysis, PCA, and k-means clustering add more precise information and visualization. Correlation matrix analysis provides clear information on the relationship between drought stress treatment and increased coumarin content. The relationship between drought stress peubahs such as soil moisture (KAT), photosynthesis rate (Pn), and total chlorophyll (SPAD) with coumarin content peubahs has negative values (-0.51, -0.38, -0.41) (Figure 4). This negative value indicates that the smaller the KAT, Pn, and SPAD values, the higher the coumarin content value. Meanwhile, PCA analysis and k-means clustering help us see more quickly the optimum point to be achieved and group our samples into several clusters. Although extreme drought stress can cause significant growth and yield losses, this research shows that controlled drought conditions can optimize the production of compounds such as coumarin without compromising other peubahs.

Keywords: BGA gene, *C. longa*, coumarin, drought stress, PAL gene



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2024
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



EKSPRESI GEN-GEN BIOSINTESIS KUMARIN PADA KUNYIT (*Curcuma longa* L.) PADA KONDISI CEKAMAN KEKERINGAN

HAFIZH FADHULLAH

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Bioteknologi

**PROGRAM STUDI BIOTEKNOLOGI
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Judul Tesis : Ekspresi Gen-Gen Biosintesis Kumarin pada Kunyit (*Curcuma longa* L.) pada Kondisi Cekaman Kekeringan
Nama : Hafizh Fadhillah
NIM : P0501212022

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Miftahudin, M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Ir. Teuku Tajuddin, M.Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi Bioteknologi:
Prof. Dr. Ir. Miftahudin, M.Si.
NIP. 196204191989031001

Dekan Sekolah Pascasarjana IPB:
Prof. Dr. Ir. Dodik Ridho Nurrochmat, M.Sc.F.Trop., IPU
NIP.197003291996081001

Tanggal Ujian: 05 September 2024

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan September 2023 sampai bulan April 2024 dengan judul “Ekspresi Gen-Gen Biosintesis Kumarin pada Kunyit (*Curcuma longa* L.) pada Kondisi Cekaman Kekeringan”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir. Miftahudin, M.Si. dan Dr. Ir. Teuku Tajuddin, M.Sc. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ketua Program Studi Bioteknologi Prof. Dr. Ir. Miftahudin, M.Si., Sekretaris Program Studi Bioteknologi Dr. Prayoga Suryadarma, S.T.P., M.T., moderator ujian tesis, penguji luar komisi pembimbing dan seluruh dosen pengajar di Program Studi Bioteknologi. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada seluruh staf Pusat Penelitian Botani Terapan, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), KST BJ Habibie, Tangerang Selatan, 15314, Banten, Indonesia dan Laboratorium Fisiologi dan Genetika Tumbuhan, Departemen Biologi, IPB University terkhusus kepada Giri Nugroho, Arief Pambudi, Nurul Fitri Hanifah, Devit Purwoko dan Bu Mardoni Elya yang telah memberikan bimbingan, saran, dan masukan pada penelitian ini. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman satu angkatan program studi Bioteknologi yang telah menyemangati selama penelitian ini, khususnya kepada Yogy, Ilham, Alfa, Nana, Atika, Seno, Gigih, Wulan, Dea dan Natalia. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, September 2024

Hafizh Fadhullah

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Ruang Lingkup	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Kunyit, Kumarin dan Pemanfaatannya dalam Bioteknologi	3
2.2 Pengaruh Cekaman Kekeringan terhadap Morfo-Fisiologi Tanaman	4
2.3 Biosintesis dan Pengaruh Cekaman Kekeringan pada Kumarin	5
III METODE	7
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	7
3.2 Alat dan Bahan	7
3.3 Prosedur Kerja	7
IV HASIL	11
4.1 Analisis Kandungan Air Tanah Basis Basah	11
4.2 Analisis Morfologi Kunyit pada Cekaman Kekeringan	11
4.3 Analisis Fisiologi Kunyit pada Cekaman Kekeringan	14
4.4 Analisis Ekspresi Gen pada Cekaman Kekeringan	15
4.5 Analisis Kandungan Kumarin pada Cekaman Kekeringan	15
4.6 Analisis Korelasi, PCA dan <i>K-means clustering</i>	16
V PEMBAHASAN	19
VI SIMPULAN DAN SARAN	22
6.1 Simpulan	22
6.2 Saran	22
DAFTAR PUSTAKA	23
LAMPIRAN	28
RIWAYAT HIDUP	31



DAFTAR TABEL

1	Primer spesifik gen <i>PAL</i> , <i>BGA</i> dan <i>ACT</i>	9
2	Pengaruh cekaman kekeringan pada fisiologis tanaman kunyit dengan perlakuan kontrol (KO), perlakuan cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA) dan perlakuan cekaman kekeringan tanpa penyiraman (CKB) selama 30 hari. Data yang ditampilkan adalah nilai rata-rata dari empat ulangan.	14

DAFTAR GAMBAR

1	Jalur pensinyalan seluler dan molekuler yang diinduksi oleh kekeringan untuk meningkatkan toleransi kekeringan pada tanaman (Mahmood et al. 2019)	5
2	Jalur biosintesis kumarin dan turunannya dalam sistem tanaman (Zou et al. 2024).	6
3	Pengaruh cekaman kekeringan pada kandungan air tanah basis basah tanaman kunyit di bawah kondisi pemberian air yang cukup (KO), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). Data yang ditampilkan adalah nilai rata-rata $\pm$ standar error (SE) dari empat ulangan. Huruf yang berbeda pada setiap batang menunjukkan perbedaan yang signifikan menurut uji Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) pada tingkat signifikansi 5%.	11
4	Pengaruh cekaman kekeringan pada karakter morfologi tanaman kunyit di bawah kondisi pemberian air yang cukup (KO), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). Data yang ditampilkan adalah nilai rata-rata $\pm$ standar error (SE) dari empat ulangan. Huruf yang berbeda pada setiap batang menunjukkan perbedaan yang signifikan menurut uji Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) pada tingkat signifikansi 5%.	12
5	Karakteristik morfologi tanaman kunyit. Pemberian air yang cukup pada 10 hari setelah perlakuan (KO10) (A), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap 7 hari pada 10 hari setelah perlakuan (CKA10) (B), cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang pada 10 hari setelah perlakuan (CKB10) (C), pemberian air yang cukup pada 20 hari setelah perlakuan (KO20) (D), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap 7 hari pada 20 hari setelah perlakuan (CKA20) (E), cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang pada 20 hari setelah perlakuan (CKB20) (F), pemberian air yang cukup pada 30 hari setelah perlakuan (CKB30) (G), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap 7 hari pada 30 hari setelah perlakuan (CKA30) (H), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang pada 30 hari setelah perlakuan (CKB30) (I).	13

- 6 Tingkat ekspresi gen *PAL* dan *BGA* pada tanaman kunyit di bawah kondisi pemberian air yang cukup (KO), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). 16
- 7 Tingkat kandungan kumarin pada kunyit di bawah kondisi pemberian air yang cukup (KO), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). Data yang ditampilkan adalah nilai rata-rata $\pm$ standar error (SE) dari empat ulangan. Huruf yang berbeda pada setiap batang menunjukkan perbedaan yang signifikan menurut uji Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) pada tingkat signifikansi 5%. 16
- 8 Korelasi matriks dari efek stres kekeringan pada perubahan karakteristik morfologi, fisiologis, dan molekuler tanaman kunyit di bawah kondisi pemberian air yang cukup (KO), cekaman kekeringan dengan penyiraman ulang setiap tujuh hari (CKA), dan cekaman kekeringan tanpa penyiraman ulang (CKB). Tanda asterisk (*) menunjukkan korelasi yang signifikan. *nilai- $p < 0,05$, **nilai- $p < 0,01$, dan ***nilai- $p < 0,001$. TBs: Tinggi Batang Semu, PA: Panjang Akar, BbBs: Berat Basah Batang Semu, BkBs: Berat Kering Batang Semu, BbR: Berat Basah Rimpang, BkR: Berat Kering Rimpang, JD: Jumlah Daun, PD: Panjang Daun, LD: Lebar Daun, KAT: Kandungan Air Tanah, SPAD: Kandungan Klorofil (Nilai SPAD), Pn: Laju Fotosintesis, Cond: Konduktansi Stomata, Ci: Konsentrasi CO₂ Interseluler, Tr: Laju Transpirasi, PAL: Fenilalanin Amonia-Liase, dan BGA: Beta-Glukosidase. 17

DAFTAR LAMPIRAN

- 1 Kurva standar kumarin 29
- 2 Perhitungan kadar kumarin sampel 30