

INTEGRASI ANALISIS PERTUMBUHAN, METABOLOMIK, DAN EKSPRESI GEN DALAM STUDI EFISIENSI KALIUM PADA BIBIT KELAPA SAWIT

RETNO DIAH SETIOWATI



**PROGRAM STUDI PEMULIAAN DAN BIOTEKNOLOGI TANAMAN
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi yang berjudul “Integrasi Analisis Pertumbuhan, Metabolomik, dan Ekspresi Gen dalam Studi Efisiensi Kalium pada Bibit Kelapa Sawit” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. 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 tulis ini.

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

Bogor, 5 Agustus 2026

Retno Diah Setiowati
NIM A2603221008

- 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.



RINGKASAN

RETNO DIAH SETIOWATI. Integrasi Analisis Pertumbuhan, Metabolomik, dan Ekspresi Gen dalam Studi Efisiensi Kalium pada Bibit Kelapa Sawit. Dibimbing oleh SUDARSONO, SRI WENING, dan MEGAYANI SRI RAHAYU.

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan komoditas strategis penyumbang devisa nasional terbesar selain minyak bumi dan gas. Produktivitas kelapa sawit sangat terkait dengan aspek budi daya, terutama pemupukan. Kelangkaan pupuk, mahalnya biaya pupuk dan pemupukan serta isu penurunan kualitas lingkungan akibat residu pupuk pada perkebunan kelapa sawit merupakan tantangan utama dalam industri kelapa sawit. Kalium merupakan salah satu unsur makro esensial yang penting dalam produksi kelapa sawit. Kalium dibutuhkan oleh kelapa sawit dalam jumlah yang banyak dan perannya tidak tergantikan oleh unsur hara lain, selain itu harga pupuk kalium juga relatif lebih mahal dibanding pupuk lain dan aksesnya relatif sulit karena sangat bergantung pada impor. Hal ini menjadikan pupuk kalium salah satu titik kritis dalam pencapaian produksi kelapa sawit. Kultur teknis yang tepat dibarengi penggunaan bahan tanaman unggul merupakan upaya yang dapat dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Bahan tanaman kelapa sawit yang efisien hara kalium (*Kalium Use Efficiency*) diharapkan dapat menjadi alternatif solusi untuk mendapatkan produksi yang tinggi dengan biaya yang lebih efisien sekaligus turut berpartisipasi dalam memelihara kesehatan lingkungan. Penelitian ini terdiri atas tiga percobaan yang mencakup analisis pertumbuhan bibit, analisis metabolit (metabolomik), dan analisis ekspresi gen.

Percobaan pertama (analisis pertumbuhan) bertujuan mendapatkan data pertumbuhan bibit dan indeks efisiensi yang dapat digunakan sebagai dasar pemilihan progeni kontras yang paling efisien dan tidak efisien hara kalium. Percobaan pertama berhasil mengidentifikasi kandidat progeni yang efisien dan tidak efisien hara kalium. Penilaian terhadap progeni kontras diputuskan dengan mempertimbangkan indikator dari berbagai parameter yang meliputi parameter pertumbuhan, biomassa bibit, serapan hara, dan penilaian efisiensi. Parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, jumlah daun, dan diameter batang dijadikan dasar pertimbangan karena parameter ini merupakan informasi yang paling mudah diamati secara visual. Parameter biomassa, serapan hara, dan indeks efisiensi diperlukan untuk memastikan kaitan perkembangan tanaman dengan kemampuan tanaman dalam mengambil dan memanfaatkan kalium.

Parameter pertumbuhan, kandungan hara, dan serapan hara tidak secara tegas menunjukkan progeni yang paling efisien, namun dapat mengidentifikasi secara jelas progeni yang tidak efisien. Percobaan dilakukan dengan memberikan perlakuan pemupukan kalium yang berbeda yaitu P0 (perlakuan dengan 0% K), P1 (perlakuan dengan 100% K), P2 (perlakuan dengan 75% K), dan P3 (perlakuan dengan 50% K) terhadap enam progeni yaitu V1 - V6 (progeni 1 hingga progeni 6). Parameter efisiensi menunjukkan progeni yang potensial efisien kalium, namun tidak mengacu pada salah satu progeni yang efisien dalam berbagai parameter efisiensi. Penggunaan skoring dengan metode normalisasi merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memutuskan progeni yang efisien dan progeni yang tidak efisien. Pendekatan normalisasi indeks skoring menunjukkan



Progeni V4 terindikasi efisien secara agronomis dan Progeni V6 terindikasi efisien secara internal, sedangkan Progeni V5 terindikasi *inefisien*.

Kajian metabolomik bertujuan untuk mengetahui metabolit yang dihasilkan oleh bibit kelapa sawit yang berada dalam cekaman kekurangan hara kalium. Metabolit yang ditemukan diproduksi secara unik pada sampel progeni yang efisien dan tidak efisien diharapkan dapat digunakan sebagai penanda biologis (biomarka). Sampel untuk analisis metabolit adalah hasil dari percobaan 1 yaitu Progeni V6 sebagai progeni yang efisien dan Progeni V5 sebagai progeni *inefisien* dengan jumlah masing-masing sebanyak tiga tanaman sebagai ulangan biologis. Data kelimpahan atau penurunan jumlah metabolit tertentu pada sampel bibit kelapa sawit yang diberi perlakuan cekaman kalium merupakan informasi penting dalam mempelajari mekanisme pertahanan bibit kelapa sawit yang tercekam defisiensi kalium. Percobaan kedua berhasil mengidentifikasi *Echinenone*, *Stearic acid*, *Zingerol*, *Violaxanthin*, *Chlorophyll b*, *Antheraxanthin*, *Eleostearic acid*, *Violaxanthin*, pada daun sebagai kandidat biomarka pada daun. Senyawa-senyawa *Maleamate*, *Piceatannol*, *Choline*, *Anilic acid*, *DL Arginine*, *Cathecine*, *Furfural* dan *Citric acid* merupakan kandidat metabolit pembeda (biomarka) yang ditemukan pada akar sampel bibit kelapa sawit yang efisien kalium

Analisis ekspresi gen bertujuan mempelajari tingkat ekspresi gen-gen dengan pendekatan *quantitative Real-Time Polymerase Chain Reaction (qRT-PCR)* yang terkait dengan penyerapan, mobilisasi, dan penggunaan kalium. tingkat ekspresi gen-gen yang terkait kalium diduga berdasarkan nilai *cycle threshold (C_T)*, yaitu banyaknya jumlah siklus yang melampaui ambang terdeteksi. Gen-gen yang terlibat seperti gen-gen transporter dan gen *Putrescine* digunakan untuk *mengarakterisasi* hasil transkripsi dari sampel tanaman yang efisien dan tidak efisien dari hasil percobaan pertama. Progeni V5 dan V6 dipilih sebagai sampel untuk analisis ekspresi gen mewakili kelompok progeni yang *inefisien* dan efisien berdasarkan hasil dari percobaan satu. Analisis gen menggunakan primer KUP8 dan GORKAT menunjukkan ekspresi yang signifikan membedakan sampel yang efisien dari yang *inefisien* saat diberi perlakuan rendah kalium sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai marka seleksi.

Hasil dari ketiga percobaan memberikan informasi bahwa pertumbuhan morfologi semata tidak cukup untuk menentukan progeni yang efisien kalium. Penggabungan karakter morfologi dengan parameter efisiensi dapat membantu mengarahkan penentuan progeni kontras namun dengan pertimbangan dan kriteria yang ketat karena tidak ada progeni yang secara statistik dinyatakan efisien ataupun tidak efisien. Metabolit yang terekspresi secara berbeda membantu melengkapi informasi mekanisme efisiensi pada bibit kelapa sawit saat menghadapi cekaman kalium. Ekspresi yang berbeda pada gen yang dianalisis menggambarkan pengaturan yang dimiliki bibit kelapa sawit untuk mempertahankan kondisi yang optimal saat terpapar kalium dalam dosis 50% dari rekomendasi.

Kata kunci: cekaman kalium, gen transporter, *kalium use efficiency*, metabolomik

SUMMARY

RETNO DIAH SETIOWATI. Integration of Seedling Growth Analysis, Metabolomics, and Gene Expression in the Study of Potassium Efficiency in Oil Palm Seedlings. Supervised by Sudarsono, Sri Wenings, and Megayani Sri Rahayu.

Oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) is a strategic commodity, the largest contributor to national foreign exchange, alongside oil and gas. Palm oil productivity is closely linked to agricultural practices, particularly fertilization. Fertilizer scarcity, the high cost of fertilizers and fertilization, and the issue of environmental degradation due to fertilizer residues in oil palm plantations are major challenges in the oil palm industry. Potassium is one of the essential macronutrients important in oil palm production. Potassium is needed by oil palms in large quantities and its role is irreplaceable by other nutrients. In addition, the price of potassium fertilizer is also relatively expensive compared to other fertilizers and hardly accessible due to dependently to import. This makes potassium fertilizer one of the critical points in achieving oil palm production. Appropriate technical culture accompanied by the use of superior plant materials are efforts that can be done to obtain maximum results. Oil palm plant materials that are efficient in potassium nutrients (Potassium Use Efficiency) are expected to be an alternative solution to achieve high production at a more efficient cost while also participating in maintaining environmental health. This study consisted of three experiments, including seedling growth analysis, metabolite analysis (metabolomics), and gene expression analysis.

The first experiment (growth analysis) aimed to obtain seedling growth data and efficiency indices that could be used as a basis for selecting the most and least efficient K-nutrient-efficient contrasting progenies. The first experiment successfully identified candidate K-nutrient-efficient and -inefficient progenies. The assessment of the contrasting progenies was determined by considering indicators from various parameters, including growth parameters, seedling biomass, nutrient uptake, and efficiency assessment. Morphology, nutrient content, and nutrient uptake parameters did not clearly indicate the most efficient progeny, but they could clearly identify the least efficient progeny. The experiment was conducted by applying different kalium fertilization treatments: P0 (treatment with 0% kalium), P1 (treatment with 100% kalium), P2 (treatment with 75% kalium), and P3 (treatment with 50% kalium) to six progenies, V1-V6 (progenies 1 to 6). The efficiency parameter indicates potentially potassium-efficient progeny, but does not indicate which progeny is efficient across various efficiency parameters. Using a scoring method with a normalization method is one approach that can be used to determine efficient and inefficient progeny. Based on this approach, Progeny V4 was indicated as agronomically efficient and V6 was indicated as internally efficient progenies meanwhile Progeny V5 was strongly indicated as inefficient progeny

The metabolomic study investigated metabolites produced by oil palm seedlings under kalium deficiency through metabolomic analysis. Differentially expressed metabolites were considered both as potential biomarkers and as indicators of defense mechanisms against kalium stress. Several compounds in leaves—such as Echinenone, Stearic acid, Zingerol, Violaxanthin, Chlorophyll b,

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.

Antheraxanthin, and Eleostearic acid-emerged as candidate biomarkers, being consistently detected across at least two analytical methods. Similarly, root metabolites including Maleamate, Piceatannol, Choline, Anilic acid, DL-Arginine, Catechin, Furfural, and Citric acid demonstrated biomarker potential.

Gene experiment aimed to investigate the expression levels of genes related to kalium uptake, mobilization, and utilization using a quantitative real-time polymerase chain reaction (qRT-PCR) approach. The expression levels of potassium-related genes were estimated based on the cycle threshold (CT) value, which is the number of cycles exceeding the detectable threshold. Involved genes, such as transporter genes and putrescine genes, were used to characterize the transcriptional output of efficient and inefficient plant samples from the first experiment. The gene expression analysis using primers of KUP8 and GORKAT showed significantly different gene expression in both different efficient and inefficient sample categories under low kalium treatment, making them potential for further development as promising candidates for selection markers.

Collectively, the result of the three experiments demonstrate morphological information could not stand alone determining the efficient and inefficient oil palm progenies in the nursery. Integrating morphological data with efficiency parameters provides partial guidance but requires strict criteria, as no progeny achieved statistical confirmation of efficiency. Metabolite profiling provides insights into the biochemical mechanisms underlying kalium-stress responses, while differential gene expression reveals transcriptional regulatory strategies in seedlings exposed to 50% of recommended kalium dose..

Keywords: *metabolomics, potassium use efficiency, transporter genes, transcriptomics*



Judul Disertasi : Integrasi Analisis Pertumbuhan Bibit, Metabolomik, dan Ekspresi Gen data Studi Efisiensi Kalium pada Bibit Kelapa Sawit

Nama : Retno Diah Setiowati

NIM : A2603221008

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Sudarsono, M.Sc.

Pembimbing 2:

Sri Wening, S.P., M.Si., Ph.D.

Pembimbing 3:

Dr. Ir. Megayani Sri Rahayu, M.Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Dewi Sukma, S.P., M.Si.

NIP. 19700404199702001

Dekan Fakultas Pertanian:

Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, M.Sc.Agr.

NIP. 196902121992031003

Tanggal Ujian:

13 Juli 2026

Tanggal Lulus: 10 AUG 2026



PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karuniaNya sehingga Disertasi ini berhasil diselesaikan. Penelitian panjang ini dimulai pada November 2022 hingga Maret 2025 dengan judul “Integrasi Analisis Pertumbuhan Bibit, Metabolomik, dan Ekspresi Gen dalam Studi Efisiensi Kalium pada Bibit Kelapa Sawit”. Penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penelitian hingga penulisan disertasi ini tidak terlepas dari dukungan dan doa dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini dengan setulus hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Sudarsono M.Sc, Ibu Sri Wening, S.P. M.Si, Ph.D. dan Ibu Dr. Megayani Sri Rahayu M.Sc. selaku komisi pembimbing yang telah banyak memberi saran, arahan dan dukungan dalam proses penelitian dan penyusunan disertasi.
2. Ketua Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman serta seluruh dosen yang telah memberikan ilmu pengetahuan terutama di bidang pemuliaan tanaman.
3. Pusat Penelitian Kelapa Sawit yang telah memfasilitasi pelaksanaan pengujian laboratorium penelitian.
4. Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) yang telah mendanai kegiatan riset berjudul “Safira: Sawit efisien hara”, yang sebagian dari riset tersebut menjadi topik riset disertasi ini
5. Kedua orang tua penulis, Almarhum Bapak Hartono dan Almarhumah Ibunda Suriati yang semasa hidupnya berharap penulis dapat mencapai pendidikan tertinggi
6. Sahabat kecil dan teman hidup selamanya Prito Rachmadani Syahputra yang jika bukan karena ridhonya, perjalanan ini akan sulit dilalui
7. Anak-anak, Aldebaran Adam Syahputra dan Aldevaro Haidar Syahputra yang selalu menemani, menyemangati, dan meramaikan jalan panjang pascasarjana mamanya
8. Adik-adik penulis yang telah banyak memberi warna dan doa; Yudhistira Prasetya Nugraha & Bayu Robby Tri Hartanto
9. Rekan-rekan tim peneliti SAFIRA (Sawit efisien hara), teman-teman di Kelti Pemuliaan Tanaman dan teman di PPKS maupun di PT RPN yang selalu membantu dan mendengarkan keluh kesah selama kegiatan perkuliahan dan penelitian
10. Teman seangkatan Pascasarjana IPB 2022 atas pengalaman suka cita perkuliahan yang menyenangkan.
11. Serta semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung selama perencanaan, pelaksanaan, sampai disertasi ini dapat diselesaikan.

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

Bogor, Agustus 2026

Retno Diah Setiowati
A2603221008



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.6 Kebaruan Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tanaman Kelapa Sawit	5
2.2 Kelapa Sawit di Indonesia	5
2.3 Konsep Nutrient Use Efficiency (NUE)	6
2.4 Menuju Kelapa Sawit yang Ramah Lingkungan	7
2.5 Defisiensi Kalium pada Tanaman	8
2.6 <i>Kalium Use Efficiency</i> (KUE) dengan Pendekatan Molekuler	9
III ANALISIS PERTUMBUHAN UNTUK IDENTIFIKASI PROGENI POTENSIAL EFISIEN KALIUM MELALUI SKRINING DI PEMBIBITAN	11
3.1 Abstrak	11
3.2 Pendahuluan	11
3.3 Metode	12
3.4 Hasil dan Pembahasan	16
3.5 Simpulan	26
IV ANALISIS METABOLOMIK UNTUK IDENTIFIKASI SENYAWA PEMBEDA PADA BIBIT KELAPA SAWIT YANG EFISIEN KALIUM	27
4.1 Abstrak	27
4.2 Pendahuluan	27
4.3 Metode	30
4.4 Hasil dan Pembahasan	33
4.5 Simpulan	39
V ANALISIS EKSPRESI GEN PADA BIBIT KELAPA SAWIT (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq) DENGAN PERLAKUAN CEKAMAN KALIUM	40
5.1 Abstrak	40
5.2 Pendahuluan	40
5.3 Metode	43
5.4 Hasil dan Pembahasan	46
5.5 Simpulan	52

VI PEMBAHASAN UMUM	53
IX SIMPULAN DAN SARAN	59
9.1 Simpulan	59
9.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60
RIWAYAT HIDUP	88

DAFTAR TABEL

1	Daftar tetua yang digunakan dalam penelitian	12
2	Faktor dan taraf perlakuan	13
3	Dosis rekomendasi pemupukan bibit kelapa sawit	13
4	ANOVA Karakter morfologi bibit pada umur 10 BSP dengan $\alpha=0.05$	16
5	Uji lanjut DMRT morfologi bibit pada umur 10 BSP ($\alpha = 0.05$)	19
6	Komparasi indeks efisiensi dengan pendekatan normalisasi indeks	23
7	Analisis metabolomik pada kajian defisiensi hara tanaman	28
8	Perbandingan <i>platform</i> analisis metabolomik	30
9	Identifikasi biomarka berdasarkan nilai SAM	37
10	Perbedaan mekanisme LATS dan HATS pada transport K	42
11	Daftar primer yang digunakan pada penelitian	43
12	Hasil kuantifikasi RNA untuk analisis transkriptomik	48
13	Nilai P ekspresi gen sampel bibit yang efisien dan tidak efisien K	49

DAFTAR GAMBAR

1	Bagan alir penelitian	4
2	Ringkasan kompleks CBL-CIPK pada respons defisiensi kalium	8
3	<i>Lay out</i> rancangan peta percobaan	14
4	Performa bibit pada usia 10 BSP dengan perlakuan dosis pupuk K	17
5	Dinamika pertumbuhan bibit selama 10 bulan pengamatan	18
6	Biomassa, kandungan Kalium serta distribusinya	21
7	Grafik <i>scatter plot</i> progeni terhadap nilai serapan hara dan biomassa bibit kelapa sawit umur 10 BSP pada dosis P3 (pupuk kalium 50% dari rekomendasi)	23
8	Grafik <i>Stacked bar</i> kontribusi parameter efisiensi	24
9	Grafik skor efisiensi gabungan pada perlakuan P3 (50% kalium)	25
10	Jalur metabolik yang terpengaruh oleh defisiensi K	29
11	Penyiapan sampel segar untuk analisis metabolit	31
12	Asesmen kualitas data berdasarkan ANOVA	34
13	Hasil analisis SAM pada akar dan daun	35
14	Identifikasi biomarka menggunakan VIP score dan profil <i>heat map</i>	36

15	Pathway analysis pada akar (atas) dan daun (bawah)	38
16	Diagram perbedaan mekanisme HATS dan LATS	41
17	Ilustrasi masuk dan keluarnya K ⁺ serta Protein pembawa yang berperan dalam penyerapan dan pergerakan K ⁺ di akar dan daun	42
18	Hasil optimasi qRT-PCR pada gel elektroforesis agarose 1%	46
19	Ekspresi relatif gen-gen terkait Kalium pada akar dan daun	50
20	Kemungkinan silsilah populasi Dura Deli	53
21	Kemungkinan silsilah populasi Tenera/Pisifera di Indonesia	54
22	Ilustrasi prediksi mekanisme efisiensi kalium	57

DAFTAR LAMPIRAN

1	Hasil analisis hara media tanam pasir sebelum perlakuan	76
2	Dosis pupuk bibit kelapa sawit MN berdasarkan usia	77
3	Kandungan hara pada pupuk yang digunakan	77
4	Dosis pupuk tunggal rekomendasi PPKS	78
5	Daftar Transporter Kalium pada tanaman	79
6	Daftar Transporter Kalium pada tanaman	80
7	Daftar sampel untuk analisis metabolomik	81
8	Daftar metabolit signifikan pada akar tanaman efisien K	82
9	Daftar metabolit signifikan pada akar tanaman efisien K	83
10	Daftar metabolit signifikan pada daun tanaman efisien K	84
11	Daftar sampel yang digunakan untuk analisis transkriptomik	85
12	Kuantifikasi RNA-cDNA sampel akar	86
13	Kuantifikasi RNA-cDNA sampel daun	87