

PENYUNTINGAN GEN *MeSGT1* MELALUI CRISPR/CAS9 UNTUK KETAHANAN UMBI UBI KAYU PASCA PANEN: PENDEKATAN DARI INDUKSI KALUS EMBRIOGENIK HINGGA KARAKTERISASI UMBI

FEBRIANA DWI WAHYUNI



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



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

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.

Perpustakaan IPB University



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “**PENYUNTINGAN GEN *MeSGT1* MELALUI CRISPR/CAS9 UNTUK KETAHANAN UMBI UBI KAYU PASCA PANEN: PENDEKATAN DARI INDUKSI KALUS EMBRIOGENIK HINGGA KARAKTERISASI UMBI**” 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 disertasi ini.

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

Bogor, Juli 2026

Febriana Dwi Wahyuni
A2603211003



RINGKASAN

FEBRIANA DWI WAHYUNI. Penyuntingan Gen *MeSGT1* Melalui CRISPR/Cas9 untuk Ketahanan Umbi Ubi Kayu Pasca Panen: Pendekatan dari Induksi Kalus Embriogenik hingga Karakterisasi Umbi. Dibimbing oleh SUDARSONO, AHMAD FATHONI, DEWI SUKMA dan SINTHO WAHYUNING ARDIE.

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk menghasilkan genotipe ubi kayu yang toleran terhadap kerusakan fisiologis pasca panen (*Postharvest Physiological Deterioration/PPD*) dengan masa simpan lebih panjang dibandingkan tipe liarnya, melalui penerapan teknologi *genome editing* CRISPR/Cas9 yang menargetkan gen *MeSGT1* (pengkode enzim *scopoletin-glucosyltransferase*). Penelitian dibagi menjadi tiga topik utama untuk mencapai tujuan tersebut. Topik pertama bertujuan mengembangkan protokol induksi embrio somatik dan *friable embryogenic callus* (FEC) yang efektif pada genotipe ubi kayu Indonesia sebagai langkah awal yang krusial sebelum transformasi genetik. Penelitian ini menguji pengaruh jenis auksin (2,4-D 10 mg l⁻¹ dan pikloram 12 mg l⁻¹) dan jenis eksplan (tunas aksilar, *leaf lobe*, daun, batang, tangkai daun) untuk induksi embrio somatik pada ubi kayu genotipe Menti, Manggu dan Nangka, serta penambahan L-tirosin terhadap keberhasilan FEC pada genotipe Menti dan Carvita25. Hasilnya menunjukkan bahwa eksplan tunas aksilar pada media dengan pikloram 12 mg l⁻¹ merupakan metode paling efektif, dengan genotipe Menti menghasilkan hingga 202,3 embrio somatik per 10 eksplan. Hasil induksi FEC, menunjukkan bahwa respons terhadap L-tirosin bersifat spesifik genotipe. Carvita25 memerlukan L-tirosin 500 µM, 60444 (kontrol) optimal tanpa L-tirosin, sedangkan Menti kurang responsif sehingga memerlukan eksplorasi faktor lain. Protokol ini menjadi fondasi teknis bagi transformasi genetik ubi kayu di Indonesia. Topik kedua bertujuan mentransformasikan konstruk plasmid CRISPR/Cas9 yang menargetkan gen *MeSGT1* ke dalam genom ubi kayu menggunakan eksplan FEC, serta meregenerasi tanaman T0 hasil penyuntingan yang akan dikarakterisasi lebih lanjut. Transformasi dilakukan dengan menginokulasi FEC genotipe model 60444 menggunakan *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 yang membawa vektor pYLCRISPR/Cas9p35s-HygR, dilanjutkan dengan seleksi bertahap menggunakan higromisin (5–15 mg l⁻¹) dan regenerasi menjadi plantlet. Transformasi pada 36 kluster FEC menghasilkan 59 tanaman T0 putatif dengan tingkat efisiensi transformasi mencapai 5,4%. Analisis PCR menggunakan primer gen ketahanan higromisin (*hpt*) mengonfirmasi 14 tanaman positif membawa transgen. Amplifikasi PCR pada daerah target gen *MeSGT1* menghasilkan pola pita ganda pada beberapa galur, yang mengindikasikan terjadinya mutasi kimera akibat penyuntingan gen *MeSGT1* melalui mekanisme *Non-Homologous End Joining* (NHEJ). Tanaman hasil penyuntingan berhasil diaklimatisasi di rumah kaca dengan tingkat keberhasilan 60% dan menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang tidak berbeda signifikan dengan tanaman tipe liar. Topik ketiga bertujuan mengkarakterisasi profil fenotipe (morfologi umbi), parameter biokimia (kandungan skopoletin), serta marka molekuler (profil transkriptom) pada umbi ubi kayu hasil *editing* gen *MeSGT1* untuk mengevaluasi ketahanannya terhadap PPD. Karakterisasi dilakukan pada 8 galur hasil *editing* (T02, T03, T04, T06, T07, T08, T09, T016) dan kontrol wildtype 60444. Hasil morfologi menunjukkan variasi antar

T0, dengan T02 dan T03 memiliki ketahanan PPD tertinggi (luas perubahan warna < 5% pada 24 jam), berbeda nyata dengan T0 rentan yang mencapai > 50%. Analisis LCMS menunjukkan bahwa T02 berhasil menekan akumulasi skopoletin hingga hanya 12,8% dari kontrol pada 24 jam setelah panen, sesuai target penyuntingan, sedangkan galur T06 mengalami peningkatan 4,5 kali lipat akibat dugaan *off-target mutation*. Analisis transkriptomik pada T03 sebagai kandidat T0 tahan PPD mengidentifikasi 108 gen yang mengalami perubahan ekspresi (56 *up-regulated*, 52 *down-regulated*). Analisis *Gene Ontology* dan KEGG mengungkap bahwa mutasi *MeSGT1* memengaruhi jalur respons terhadap stres oksidatif (pengikatan heme/tetrapyrrole), metabolisme fenilpropanoid (biosintesis skopoletin/skopolin), serta metabolisme sianogenik glukosida (linamarin/lotaustralin). Rekomendasi mengarah pada T02 dan T03 sebagai kandidat potensial untuk pengembangan varietas ubi kayu tahan PPD. Secara keseluruhan, ketiga tahapan penelitian ini telah berhasil membangun alur kerja yang terintegrasi dan sistematis, mulai dari pengembangan protokol induksi embrio somatik dan FEC pada genotipe ubi kayu Indonesia, transformasi CRISPR/Cas9 yang menargetkan gen *MeSGT1*, hingga karakterisasi fenotipe, biokimia, dan molekuler umbi hasil penyuntingan. Keberhasilan induksi FEC pada genotipe Carvita25 dengan penambahan L-tirosin 500 μ M dan pada 60444 tanpa L-tirosin menunjukkan bahwa optimalisasi media harus dilakukan secara spesifik per genotipe. Transformasi yang berhasil menghasilkan tanaman T0 dengan bukti awal terjadinya mutasi kimera pada gen *MeSGT1*, dibuktikan dengan pola pita ganda pada PCR serta efisiensi transformasi 5,4%. Karakterisasi lebih lanjut membuktikan bahwa T02 dan T03 mampu menekan akumulasi skopoletin hingga 12,8% dari kontrol dan memperlambat luasan PPD hingga kurang dari 5% pada 48 jam setelah panen, sementara T06 menunjukkan peningkatan skopoletin 4,5 kali lipat yang tidak diinginkan. Penelitian ini tidak hanya berhasil menghasilkan kandidat T0 ubi kayu tahan PPD (T02 dan T03) yang berpotensi dikembangkan lebih lanjut, tetapi juga menyediakan protokol transformasi dan media induksi FEC yang dapat diadopsi untuk perbaikan genotipe lokal ubi kayu Indonesia lainnya di masa depan.

Kata Kunci: embrio somatik, FEC, skopoletin, transgenik, transkriptomik

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.



SUMMARY

FEBRIANA DWI WAHYUNI. CRISPR/Cas9-Mediated Editing of *MeSGT1* Gene for Postharvest Tuber Rot Resistance in Cassava: An Approach from Embryogenic Callus Induction to Tuber Characterization. Supervised by SUDARSONO, AHMAD FATHONI, DEWI SUKMA dan SINTHO WAHYUNING ARDIE.

This research generally aimed to produce cassava genotypes tolerant to postharvest physiological deterioration (PPD) with a longer shelf life than the wild type, by applying CRISPR/Cas9 genome editing technology targeting the *MeSGT1* gene (encoding scopoletin-glucosyltransferase). To achieve this objective, the research was divided into three main topics. The first topic aimed to develop an effective protocol for somatic embryo and friable embryogenic callus (FEC) induction in Indonesian cassava genotypes as a crucial initial step prior to genetic transformation. This study examined the effects of auxin type (2,4-D 10 mg l⁻¹ vs. picloram 12 mg l⁻¹) and explant type (axillary shoot, leaf lobe, leaf, stem, petiole) on somatic embryo induction in Menti, Manggu and Nangka genotype, as well as the effect of tyrosine supplementation on FEC success in Menti and Carvita25 genotype. The results showed that axillary shoot explants on medium with 12 mg l⁻¹ picloram were the most effective method, with the Menti genotype producing up to 202.3 somatic embryos per 10 explants. For FEC induction, the response to tyrosine was genotype-specific: Carvita25 required 500 µM tyrosine, 60444 (control) was optimal without tyrosine, while Menti was less responsive, requiring exploration of other factors. This protocol serves as a technical foundation for cassava genetic transformation in Indonesia. The second topic aimed to transform the CRISPR/Cas9 plasmid construct targeting the *MeSGT1* gene into the cassava genome using FEC explants, and to regenerate T0 plants for further characterization. Transformation was performed by inoculating FEC of the model genotype 60444 with *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404 carrying the pYLCRISPR/Cas9p35s-HygR vector, followed by stepwise selection using hygromycin (5–15 mg l⁻¹) and regeneration into plantlets. From 36 FEC clusters, 59 putative T0 plants were regenerated, with a transformation efficiency of 5.4%. PCR analysis using hygromycin resistance gene (*hpt*) primers confirmed 14 plants positive for the transgene. Furthermore, PCR amplification of the *MeSGT1* target region revealed double-band patterns in several lines, indicating chimeric mutations resulting from editing via the Non-Homologous End Joining (NHEJ) mechanism. The edited plants were successfully acclimatized in the greenhouse with 60% survival and showed vegetative growth not significantly different from wild-type plants. The third topic aimed to characterize the phenotypic (tuber morphology), biochemical (scopoletin content), and molecular (transcriptomic profile) traits of *MeSGT1*-edited cassava tubers to evaluate their resistance to PPD. Characterization was performed on 8 edited lines (T02, T03, T04, T06, T07, T08, T09, T016) and the wild-type control 60444. Morphological results showed variation among lines, with lines T02 and T03 exhibiting the highest PPD resistance (discoloration area <5% at 48 hours), significantly different from susceptible lines which reached >50%. LCMS analysis revealed that line T02 successfully suppressed scopoletin accumulation to only 12.8% of the control at 24 hours postharvest, consistent with the editing objective, while line T06 showed a 4.5-fold increase due to suspected

off-target mutations. Transcriptomic analysis of the resistant line T03 identified 108 differentially expressed genes (56 upregulated, 52 downregulated). Gene Ontology and KEGG pathway analyses revealed that *MeSGT1* mutation affected pathways related to oxidative stress response (heme/tetrapyrrole binding), phenylpropanoid metabolism (scopoletin/scopolin biosynthesis), and cyanogenic glucoside metabolism (linamarin/lotaustralin). Thus, lines T02 and T03 are recommended as potential candidates for developing PPD-tolerant cassava varieties. Overall, these three stages of research have successfully established an integrated and systematic workflow, starting from the development of somatic embryo and FEC induction protocols in Indonesian cassava genotypes, CRISPR/Cas9 transformation targeting the *MeSGT1* gene, to the phenotypic, biochemical, and molecular characterization of edited tubers. The successful FEC induction in Carvita25 with 500 μ M tyrosine supplementation and in 60444 without tyrosine demonstrates that media optimization must be performed on a genotype-specific basis. The successful transformation produced T0 plants with preliminary evidence of chimeric mutations in the *MeSGT1* gene, as shown by double-band PCR patterns and a transformation efficiency of 5.4%. Further characterization proved that lines T02 and T03 were able to suppress scopoletin accumulation to only 12.8% of the control and delay PPD discoloration area to less than 5% at 48 hours postharvest, while line T06 showed an undesirable 4.5-fold increase in scopoletin. Thus, this research has not only successfully generated candidate PPD-tolerant cassava lines (T02 and T03) with potential for further development but has also provided transformation protocols and FEC induction media that can be adopted for the improvement of other local Indonesian cassava genotypes in the future.

Keywords: FEC, scopoletin, somatic embryo, transgenic, transcriptomics



@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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
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.

**PENYUNTINGAN GEN *MeSGT1* MELALUI CRISPR/CAS9
UNTUK KETAHANAN UMBI UBI KAYU PASCA PANEN:
PENDEKATAN DARI INDUKSI KALUS EMBRIOGENIK
HINGGA KARAKTERISASI UMBI**

FEBRIANA DWI WAHYUNI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman

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

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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Diny Dinarti, M.Si
- 2 Dr. Ima Mulyama Zainuddin, S.Si., M.Si

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Ir. Diny Dinarti, M.Si
- 2 Prof. (R) Dr. Dra. N. Sri Hartati, M.Si

Judul Disertasi : Penyuntingan Gen *MeSGT1* Melalui CRISPR/Cas9 untuk Ketahanan Umbi Ubi Kayu Pasca Panen: Pendekatan dari Induksi Kalus Embriogenik hingga Karakterisasi Umbi

Nama : Febriana Dwi Wahyuni

NIM : A2603211003

Nama
NIM

@Hak cipta milik IPB University

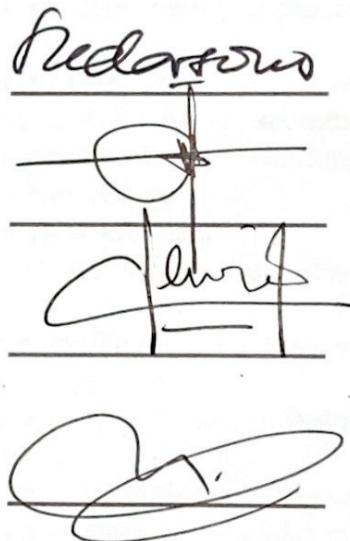
Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Sudarsono, M.Sc

Pembimbing 2:
Dr. Ahmad Fathoni, M.Eng

Pembimbing 3:
Prof. Dr. Dewi Sukma, S.P., M.Si

Pembimbing 4:
Dr. Sintho Wahyuning Ardie, S.P., M.Si



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Dewi Sukma, S.P., M.Si
NIP 197004041997022001

Dekan Fakultas Pertanian:
Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, M.Sc.Agr
NIP 196902121992031003



Tanggal Ujian: 14 Juli 2026

Tanggal Lulus: 10 AUG 2026



@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.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Karya ilmiah ini sebagai rangkaian penelitian yang dilaksanakan dari Juni 2022 - November 2025 dengan judul “Penyuntingan Gen *MeSGT1* Melalui CRISPR/Cas9 untuk Ketahanan Umbi Ubi Kayu Pasca Panen: Pendekatan dari Induksi Kalus Embriogenik hingga Karakterisasi Umbi”.

Penulis berterimakasih kepada semua pihak yang sudah membantu dan mendoakan penulis sampai tahap ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih dalam kesempatan ini kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Sudarsono, M.Sc, Dr. Ahmad Fathoni M.Eng, Prof. Dr. Dewi Sukma, S.P., M.Si, dan Dr. Sintho Wahyuning Ardie, S.P., M.Si. sebagai komisi pembimbing yang sudah membimbing dan memberikan masukan dari segi ilmiah dan pengalaman dalam penyusunan disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Darda Efendi. M.Si sebagai penguji prakualifikasi lisan.
3. Dr. Ima Mulyama Zainuddin, M.Sc sebagai penguji prakualifikasi lisan dan penguji ujian tertutup
4. Dr. Ir. Diny Dinarti, M.Sc sebagai penguji ujian tertutup dan sidang promosi terbuka yang sudah memberikan saran dan masukkan tugas akhir.
5. Prof. Dr. Dra. N. Sri Hartati, M.Si sebagai penguji sidang promosi terbuka yang sudah memberikan saran dan masukkan tugas akhir.
6. Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi melalui Beasiswa Pendidikan Indonesia yang telah memberikan beasiswa pendidikan doktor kepada penulis
7. Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi atas Penelitian Disertasi Doktor tahun 2024 yang telah membiayai sebagian penelitian dalam disertasi ini.
8. Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di Laboratorium Genomik dan GH Riset
9. Ketua Yayasan Pendidikan Kemala Bangsa, Rektor Universitas Esa Unggul, Dekan Fakultas Ilmu-ilmu Kesehatan, dan Ketua Program Studi Bioteknologi Universitas Esa Unggul yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melanjutkan studi doktor.
10. Dr. Baoxiu Qi beserta tim dari Liverpool John Moores University yang telah membuat konstruk yang penulis gunakan dalam penelitian ini.
11. Prof. Hervé Vanderschuren yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan penelitian di Laboratory of Tropical Crop Improvement, KU Leuven
12. Suami, Yudho Dwi Cahyo, beserta kedua ananda Abidzar Khalif Alfarezy dan Zayan Khalid Alfarizky yang selalu memberikan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan disertasi.
13. Kedua orang tua, Ibu Lasmini dan Bapak Sunarko, serta kakak saya Wira Hendra Cahyana dan Amanda Tiara yang senantiasa mendoakan serta memberi dukungan kepada penulis untuk tetap semangat dalam menyelesaikan tugas akhir.
14. Teman-teman dosen UEU yang selalu memberikan dukungan spiritual kepada penulis untuk menyelesaikan disertasi.



15. Teman-teman S3 PBT 2021 yang sudah lulus yaitu Bu Wage, Pak Undang, Pak Wira, Mas Roiyan, Mas Helfi, Mbak Fitri, Mbak Dayah, Pak Redi yang selalu memberikan semangat agar penulis dapat segera menyusul, dan para Cand. Doktor Mbak Rina, Mbak Ariani, Pak Heri, Mas Warid, dan Pak Candra yang saling menyemangati satu sama lain.
16. Rekan-rekan di Laboratorium GH Riset yang telah memberikan semangat dalam menyelesaikan penelitian, serta menjadi tempat berkeluh kesah.

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

Bogor, Juli 2026

Febriana Dwi Wahyuni



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	..xv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Kebaruan Penelitian	5
1.6 Hipotesis	5
II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Potensi Ubi Kayu (<i>Manihot esculenta</i> Crantz) sebagai bahan Pangan dan Industri	6
2.2 <i>Friable Embryogenic Callus</i> (FEC) sebagai Eksplan dalam Transformasi Genetik	7
2.3 Mekanisme Kejadian <i>Post-Harvest Physiological Deterioration</i> (PPD) pada Ubi Kayu	8
2.4 Strategi Menunda PPD	11
2.5 Teknologi Genome Editing sebagai Pendekatan dalam Perakitan Ubi Kayu Tahan PPD	12
III INDUKSI EMBRIO SOMATIK DAN <i>FRIABLE EMBRYOGENIC CALLUS</i> PADA BEBERAPA GENOTIPE UBI KAYU INDONESIA	15
3.1 Abstrak	15
3.2 Pendahuluan	16
3.3 Bahan dan metode	18
3.4 Hasil dan Pembahasan	21
3.5 Simpulan	30
IV TRANSFORMASI GEN MESGT1 YANG DIMEDIASI OLEH <i>AGROBACTERIUM TUMEFACIENS</i> PADA EKSPLAN <i>FRIABLE EMBRYOGENIC CALLUS</i> PADA UBI KAYU	31
4.1 Abstrak	31
4.2 Pendahuluan	32
4.3 Bahan dan Metode	33
4.4 Hasil dan Pembahasan	36
4.5 Simpulan	43
V KARAKTERISASI FENOTIPE, BIOKIMIA, DAN MOLEKULER UMBI UBI KAYU HASIL PENYUNTINGAN GEN MESGT1 UNTUK MENINGKATKAN KETAHANAN TERHADAP PEMBUSUKAN UMBI PASCA PANEN	44
5.1 Abstrak	44
5.2 Pendahuluan	45



5.3	Bahan dan Metode	46
5.4	Hasil dan Pembahasan	48
5.5	Simpulan	63
VI	PEMBAHASAN UMUM	65
VII	SIMPULAN DAN SARAN	71
7.1	Simpulan	71
7.2	Saran	71
	DAFTAR PUSTAKA	72
	LAMPIRAN	84
	KERAWAYAT HIDUP	102

- 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 TABEL

1	Nilai P dari hasil uji F pada persentase eksplan berkalus (PEB), persentase pembentukan embrio somatik (PPES), jumlah embrio somatik (JES), persentase embrio somatik berkecambah (PEK), persentase embrio somatik bertunas (PET), rata-rata panjang tunas (RPT) pada genotipe, tipe eksplan, dan tipe auksin	21
2	Pengaruh jenis eksplan dan auksin terhadap persentase rata-rata kalus pembentuk embrio somatik (PPES) dan jumlah total embrio somatik (JES) pada ketiga genotipe ubi kayu	22
3	Pengaruh jenis eksplan dan auksin terhadap persentase embrio berkecambah (PEK) pada ketiga genotipe ubi kayu	25
4	Pengaruh Penambahan Tirosin pada pembentukan FEC pada genotipe Carvita25, Menti, dan 60444	28
5	Tinggi dan diameter batang pada delapan T0 ubi kayu hasil pengeditan gen <i>MeSGT1</i> dan kontrol (60444) pada 8 bulan setelah aklimatisasi	42
6	Karakter agronomi umbi pasca panen pada delapan T0 hasil penyuntingan gen <i>MeSGT1</i> dan tipe liar 60444	48
7	Luas Area PPD (%) pada Genotipe Hasil Editing dan Wild Type (60444) pada 0, 6, 12, dan 24 jam setelah panen	50

DAFTAR GAMBAR

1.	Ruang lingkup penelitian disertasi yang terdiri dari tiga percobaan	4
2.	Tahapan proses regenerasi dari kalus embrio somatik menjadi tanaman	8
3.	Visual PPD pada ubi kayu yang ditanam di lapang	8
4.	Tiga jalur alternatif biosintesis skopoletin dan skopolin pada ubi kayu	10
5.	Tiga tipe <i>genome editing</i> yang dibedakan berdasarkan mekanisme perbaikan DSB	13
6.	Induksi Embrio Somatik dan regenerasinya menjadi plantlet utuh	25
7.	Analisis Histologi dengan pewarnaan Hematoxylin-Eosin	26
8.	Pencitraan tahapan embrio somatik dengan <i>cryo-EM</i>	27
9.	Tahapan produksi FEC ubi kayu	29
10.	Plasmid pYLCRISPR/Cas9p35s-HygR	33
11.	Transformasi ubi kayu 60444 .	37
12.	Visualisasi hasil PCR pada tanaman transgenik T0 menggunakan primer gen resistensi higromisin (<i>hpt</i>)	39
13.	Visualisasi hasil PCR dengan primer gen skopoletin	40
14.	Keragaan tanaman ubi kayu transgenik dan tipe liar	41
15.	Hubungan antara karakter morfologi umbi dengan berat umbi	49
16.	Perubahan visual umbi ubi kayu pasca panen akibat PPD yang didokumentasikan dengan <i>scanner</i> pada interval 0-24 jam	51
17.	Profil akumulasi skopoletin pada genotipe ubi kayu hasil editing	51



18.	Hubungan antara kadar skopoletin dan luas area PPD pada umbi ubi kayu hasil editing gen <i>MeSGT1</i>	53
19.	Analisis sekuens alel T0 (T02 dan T06) hasil penyuntingan gen <i>MeSGT1</i> yang disejajarkan dengan sekuens tipe liarnya (WT) dan gen referensi	54
20.	Analisis sekuens asam amino pada T0 hasil penyuntingan gen <i>MeSGT1</i> yang disejajarkan dengan sekuens tipe liarnya (WT)	55
21.	Matriks PAE struktur protein SGT hasil prediksi AlphaFold	56
22.	Jumlah gen yang mengalami perubahan ekspresi secara signifikan (<i>Differentially Expressed Genes</i> / DEGs) pada umbi ubi kayu T0 dibandingkan kontrol	57
23.	Hasil analisis <i>Gene Ontology</i> (GO) pada tingkat <i>Biological Process</i> dari umbi ubi kayu antara perlakuan editing dibandingkan dengan kontrol	58
24.	Hasil analisis <i>Gene Ontology</i> (GO) pada tingkat <i>Cellular component</i> dari umbi ubi kayu antara perlakuan editing dibandingkan dengan kontrol	59
25.	Hasil analisis <i>Gene Ontology</i> (GO) pada tingkat <i>molecular function</i> dari umbi ubi kayu antara perlakuan editing dibandingkan dengan kontrol	60
26.	Hasil analisis KEGG dari umbi ubi kayu antara perlakuan editing dibandingkan dengan kontrol	63

DAFTAR LAMPIRAN

1.	Kromatogram senyawa skopoletin pada umbi ubi kayu T0 dan <i>wild type</i>	85
2.	Hasil DEG pada gen <i>up-regulated</i>	91
3.	Hasil DEG pada gen <i>down-regulated</i>	96