

**SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000
TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN
PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume)
HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO***

TESIS

Oleh:

**HANIK ISNAINI
NIM. 230602210008**



**PROGRAM STUDI MAGISTER BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000
TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN
PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume)
HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO***

TESIS

Oleh:

**HANIK ISNAINI
NIM. 230602210008**

diajukan Kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Magister Sains (M.Si)**

**PROGRAM STUDI MAGISTER BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000
TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN
PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume)
HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO***

TESIS

**Oleh:
HANIK ISNAINI
NIM. 230602210008**

**telah diperiksa dan disetujui untuk diuji pada
tanggal 10 Juni 2025**

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Evika Sandi Savitri, M.P
NIP. 19741018 200312 2 002

Dosen Pembimbing II



Dr. H. Sulisetijono, M.Si
NIP. 19670125 199103 1 003



**Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Biologi**

Prof. Dr. drh. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si
NIP. 19710919 2000 03 2 001

**SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000
TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN
PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume)
HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO***

TESIS

**Oleh:
HANIK ISNAINI
NIM. 230602210008**

**telah dipertahankan
di depan dewan penguji tesis dan dinyatakan diterima sebagai salah satu
persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si)**

tanggal 23 Juni 2025

Penguji Utama	: Prof. Dr. drh. Hj. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si	(.....)
	NIP. 19710919 2000 03 2 001	
Ketua Penguji	: Dr. Eko Budi Minarno, M.Pd	(.....)
	NIP. 19630114 199903 1 001	
Anggota Penguji I	: Prof.Dr. Evika Sandi Savitri, M.P	(.....)
	NIP. 19741018 200312 2 002	
Anggota Penguji II	: Dr.H. Sulisetijono, M.Si	(.....)
	NIP. 19670125 199103 1 003	



**Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Biologi**

Prof. Dr. drh. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si
NIP. 19710919 2000 03 2 001

MOTTO

“Mengalirlah seperti air—tanpa gaduh, tanpa pamrih, namun selalu memberi kehidupan di mana pun kau singgah”

“خَيْرُ النَّاسِ أَنْفَعُهُمْ لِلنَّاسِ”

**“Sebaik-baik manusia adalah yang memberi manfaat kepada orang lain.”
(HR. ath-Thabrani dalam Al-Mu’jam al-Ausath No.5787)**

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hanik Isnaini
NIM : 230602210008
Program Studi : Magister Biologi
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN
PEG 6000 TERHADAP KARAKTER ANATOMI-
BIOKIMIA DAUN DAN PERTUMBUHAN VEGETATIF
PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume) HASIL
MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO*

menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan tesis ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi akademik maupun hukum atas perbuatan tersebut.

Malang, 10 Juni 2025
Yang membuat pernyataan,



Hanik Isnaini
NIM. 230602210008

PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS

Tesis ini tidak dipublikasikan namun terbuka untuk umum dengan ketentuan hak cipta ada pada penulis. Daftar pustaka diperkenankan untuk dicatat tetapi pengutipan dapat dilakukan dengan seizin penulis dan harus disertai kebiasaan ilmiah untuk menyebutkannya.

**SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000
TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN
PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume)
HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA *IN VITRO***

Hanik Isnaini, Evika Sandi Savitri, Sulisetijono

Program Studi Magister Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam
Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang

ABSTRAK

Tanaman porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) merupakan komoditas pangan potensial yang mendukung peningkatan ekspor Indonesia, namun ketergantungan pada sistem budidaya konvensional, keterbatasan varietas unggul, dominasi lahan marginal, serta cekaman kekeringan ekstrem yang berdampak pada penurunan kuantitas dan kualitas hasil, menjadi kendala produksi porang. Seleksi genotipe toleran kekeringan secara *in vitro* menawarkan pendekatan modern untuk menskrining varietas unggul yang mampu mempertahankan produktivitas porang pada lahan marginal. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan seleksi toleransi kekeringan tanaman porang hasil mutasi gamma cobalt-60 melalui subkultur pada media polietilen glikol (PEG) 6000. Penelitian didesain secara eksperimental menggunakan Rancangan Acak lengkap (RAL) dengan 2 faktor berupa genotipe mutan (0 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy, dan 8 Gy) dan konsentrasi PEG (0% (0 Mpa), 2,5% (-0,024 Mpa), 5% (-0,050 Mpa), 7,5% (-0,089 Mpa) dan 10% (-0,140 Mpa)). Parameter pengamatan terdiri atas karakter anatomi-biokimia daun (lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total), pertumbuhan vegetatif (tinggi planlet, jumlah akar, dan jumlah daun), dan tingkat toleransi kekeringannya. Data dianalisis menggunakan analisis variansi (ANOVA) dan uji lanjut Duncan (DMRT) pada taraf 5% jika terdapat pengaruh yang nyata ($p < 0,05$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif menunjukkan respon adaptif terhadap kekeringan PEG 6000. Genotipe mutan 2 Gy, 4 Gy, dan 6 Gy tergolong toleran kekeringan tingkat ‘moderat’, sedangkan genotipe mutan 8 Gy dan genotipe kontrol (0 Gy) termasuk ‘sensitif’ berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK). Genotipe mutan 4 Gy merupakan kandidat bibit unggul porang yang memiliki karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif paling adaptif terhadap cekaman kekeringan.

Kata kunci: *Mutasi gamma, Polietilen glikol, Seleksi in vitro, Toleran Kekeringan*

**DROUGHT TOLERANCE SELECTION USING PEG 6000 ON LEAF'S
ANATOMICAL-BIOCHEMICAL CHARACTERS AND VEGETATIVE
GROWTH OF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume) RESULT
OF IN VITRO GAMMA COBALT-60 MUTATION**

Hanik Isnaini, Evika Sandi Savitri, Sulisetijono

Master of Biology Study Program, Faculty of Science and Technology, Maulana
Malik Ibrahim State Islamic University Malang

ABSTRACT

The porang plants (*Amorphophallus muelleri* B.) are potential food commodities that support the increase in Indonesian exports, but dependence on conventional cultivation systems, limited superior varieties, dominance of marginal land, and extreme drought stress that has an impact on decreasing the quantity and quality of results, are obstacles to porang production. In vitro selection of drought-tolerant genotypes offers a modern approach to screening superior varieties that are able to maintain porang productivity on marginal land. This study aims to select drought tolerance of porang plants resulting from gamma cobalt-60 mutations through subculture on PEG 6000 media. PEG concentration (0% (0 Mpa), 2.5% (-0.024 Mpa), 5% (-0.050 Mpa), 7.5% (-0.089 Mpa) and 10% (-0.140 Mpa)). Observation parameters consisted of leaf's anatomical-biochemical characters (stomata width, stomata density, and total chlorophyll content), vegetative growth (plantlet height, number of roots, and number of leaves), and drought tolerance levels. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's Advanced Test (DMRT) at the 5% level if there was a significant effect ($p < 0,05$). The results of the study showed that the anatomical-biochemical characteristics of leaves and vegetative growth showed an adaptive response to PEG 6000 drought. The 2 Gy, 4 Gy, and 6 Gy mutant genotypes are classified as having 'moderate' drought tolerance, while the 8 Gy mutant genotype and the control genotype (0 Gy) are 'sensitive' based on the drought sensitivity index (DSI) value. The 4 Gy mutant genotype is a candidate for superior porang seeds that have the most adaptive leaf's anatomical-biochemical characters and vegetative growth to drought stress.

Keywords: *Gamma mutation, Polyethylene glycol, In Vitro selection, Drought Tolerance*

اختيار مقاومة الجفاف باستخدام PEG 6000 على الخصائص التشريحية - الكيميائية الحيوية لأوراق
ونبات البورانج (*Amorphophallus muelleri* Blume) الناتجة
عن طفرة جاما كوبالت-60 في المختبر

هانيك إثنائيني، إيفيكا ساندي سافيتري، سوليسيتيجونو

برنامج ماجستير الأحياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج

مستخلص البحث

تُعدّ نباتات البورانج (*Amorphophallus muelleri* Blume) سلعًا غذائيةً محتملةً تدعم زيادة الصادرات الإندونيسية، إلا أن الاعتماد على أنظمة الزراعة التقليدية، ومحدودية الأصناف المتميزة، وهيمنة الأراضي الهامشية، والجفاف الشديد الذي يؤثر على كمية وجودة المحصول، تُشكل عوائق أمام إنتاج البورانج. يُتيح اختيار الأنماط الجينية المقاومة للجفاف في المختبر نهجًا حديثًا لاختيار الأصناف المتميزة القدرة على الحفاظ على إنتاجية البورانج في الأراضي الهامشية. تهدف هذه الدراسة إلى إجراء اختيار نباتات البورانج المقاومة للجفاف الناتجة عن طفرة جاما كوبالت-60 من خلال الزراعة الفرعية على وسط بولي إيثيلين جلايكول 6000 (PEG). صُممت الدراسة تجريبيًا باستخدام التصميم العشوائي الكامل (CRD) مع عاملين في شكل أنماط جينية متحولة (0 جراي، 2 جراي، 4 جراي، 6 جراي، و8 جراي) وتركيز PEG (0%، 0.024%، 0.050%، 0.140%، و10% ميجا باسكال)، و7.5% (-0.089 ميجا باسكال) و10% (-0.140 ميجا باسكال). تتكون معلمات الملاحظة من تشريح الورقة - الخصائص الكيميائية الحيوية (عرض الثغور، وكثافة الثغور، ومحتوى الكلوروفيل الكلي)، والنمو الخضري (ارتفاع النبات، وعدد الجذور، وعدد الأوراق)، ومستوى تحمل الجفاف. تم تحليل البيانات باستخدام تحليل التباين (ANOVA) واختبار دنكان المتقدم (DMRT) عند مستوى 5% إذا كان هناك تأثير كبير ($p < 0.05$). أظهرت النتائج أن الخصائص التشريحية والكيميائية الحيوية للأوراق والنمو الخضري أظهرت استجابة تكيفية لجفاف PEG 6000. صُنفت الطفرات الجينية ذات 2 غراي، و4 غراي، و6 غراي على أنها "متوسطة التحمل" للجفاف، بينما صُنفت الطفرات الجينية ذات 8 غراي والنمط الجيني الضابط (0 غراي) على أنها "حساسة" بناءً على قيمة مؤشر حساسية الجفاف (DSI). يُعد النمط الجيني الطفري ذو 4 غراي مرشحًا مثاليًا لبذور بورانج متفوقة تتميز بخصائص تشريحية وكيميائية حيوية للأوراق والنمو الخضري الأكثر تكيفًا مع إجهاد الجفاف.

الكلمات المفتاحية: طفرة جاما، بولي إيثيلين جلايكول، الاختيار في المختبر، تحمل الجفاف

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis dengan judul “Seleksi Toleransi Kekeringan Menggunakan PEG 6000 Terhadap Karakter Anatomi-Biokimia Daun dan Pertumbuhan Vegetatif Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) Hasil Mutasi Gamma Cobalt-60 Secara *In Vitro*” dengan baik. Shalawat serta salam semoga tetap tercurahkan pada junjungan Nabi Muhammad saw. yang telah membawa umatnya dari zaman kegelapan menuju zaman yang terang benderang. Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, bantuan, dan dukungan kepada penulis hingga terselesaikannya tesis ini, khususnya:

1. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, M.A selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Prof. Dr. drh. Hj. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Prof. Dr. Evika Sandi Savitri, M.P selaku dosen pembimbing tesis I yang telah membimbing dan memberikan dorongan, motivasi, dan saran selama penyusunan tesis.
5. Dr. H. Sulisetijono, M.Si selaku dosen pembimbing tesis II yang telah meluangkan waktu, tenaga, serta ilmu untuk memberikan bimbingan, saran, dan masukan selama penyusunan tesis.
6. Dr. Eko Budi Minarno, M.Pd selaku dosen wali yang senantiasa memberikan arahan dan motivasi selama perkuliahan.
7. Bapak Moh. Habib Mustana dan Ibu Hindun Daryani sebagai kedua orang tua tercinta yang tidak pernah putus mendoakan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan baik
8. Kerabat dekat dan rekan sahabat yang tidak pernah lelah memberikan dukungan yang senantiasa memotivasi.
9. Teman seperjuangan Magister Biologi, serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan semangat selama penyusunan tesis ini.

Penulis berharap tesis ini menjadi kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Malang, 10 Juni 2025

Hanik Isnaini

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur selalu dipanjatkan kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia serta hidayah-Nya yang diberikan sehingga tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang menuntun kepada jalan kebenaran. Tesis ini dipersembahkan kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi, serta doa sepanjang perjalanan penyelesaian penelitian penulis, terlebih khusus kepada:

1. Orang tua tercinta, Bapak Moh Habib Mustana dan Ibu Hindun Daryani yang merawat, mendidik, dan memotivasi untuk menjadi pribadi yang lebih baik serta tiada henti memberikan dukungan dan doa untuk kelancaran studi.
2. Zuliyah Istiqomah sebagai kakak terbaik yang selalu menjadi motivasi dalam menyelesaikan studi dan senantiasa menjadi tempat berbagi keluh kesah.
3. Naufal Mumtaza dan Arsyad Rifqi Azamy sebagai adik - adik kesayangan yang menjadi motivasi dan semangat untuk cepat menyelesaikan studi.
4. Diri sendiri, Hanik Isnaini yang tetap kuat melanjutkan kehidupan sehingga berhasil melangkah selangkah lebih maju. Tesis ini menjadi bukti dari kesungguhan tekad, kerja keras, dan kesabaran dalam menghadapi *roller coaster* perjalanan menyelesaikan studi.
5. Teman seperjuangan Laboratorium Kultur Jaringan Tumbuhan yang memberikan motivasi dan semangat selama perjalanan menyelesaikan studi.
6. Teman-teman Magister Biologi angkatan 2023 yang sudah kebersamaan masa studi dengan penuh kenangan yang berharga.

Malang, 10 Juni 2025

Hanik Isnaini

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	vi
PEDOMAN PENGGUNAAN TESIS	vii
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
مستخلص البحث.....	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xix
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Hipotesis Penelitian	8
1.6 Batasan Masalah	8
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Tanaman Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> Blume) dalam Perspektif Al- Qur'an	9
2.2 Tanaman Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> Blume) dalam Perspektif Sains	10
2.3 Kandungan dan Manfaat Tanaman Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> B.)....	16
2.4 Sinar Gamma Cobalt-60 Sebagai Iradiasi Pngion Mutagenik.....	18
2.5 Cekaman Kekeringan	21

2.6 Respon dan Regulasi Adaptif Tanaman terhadap Cekaman Kekeringan	24
2.5.1 Respon Morfofisioanaatomi dan Biokimia	24
2.5.2 Respon Pertumbuhan Vegetatif dan Generatif.....	29
2.6 Mekanisme Resistensi Kekeringan pada Tanaman.....	35
2.7 Polietilen Glikol (PEG) Sebagai Media Selektif.....	39
2.8 Aplikasi PEG 6000 dalam Pemuliaan Tanaman	41
2.9 Kerangka Konseptual	45
BAB III. METODE PENELITIAN	48
3.1 Rancangan Penelitian	48
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	48
3.3 Variabel Penelitian	49
3.4 Alat dan Bahan	49
3.4.1 Alat.....	49
3.4.2 Bahan	50
3.5 Prosedur Kerja	50
3.5.1 Sterilisasi Alat.....	50
3.5.2 Pembuatan Larutan Stok PEG 6000	50
3.5.3 Pembuatan Media Seleksi	51
3.5.4 Sterilisasi Ruang Kerja	51
3.5.5 Subkultur pada Media Seleksi	52
3.5.6 Pengamatan	52
3.5.6.1 Karakter Anatomi-Biokimia Daun	52
3.5.6.2 Pertumbuhan Vegetatif	55
3.5.7 Penilaian Indeks Sensitivitas Kekeringan (ISK)	55
3.6 Analisis Data	56
3.7 Kerangka Operasional	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Karakter Anatomi - Biokimia Daun Mutan Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> Blume) Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan Menggunakan PEG 6000 Secara <i>In Vitro</i>	58
4.2 Pertumbuhan Vegetatif Mutan Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> Blume)	

Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan Menggunakan PEG 6000 Secara <i>In Vitro</i>	67
4.3 Klasifikasi Tingkat Toleransi Kekeringan Mutan Porang (<i>Amorphophallus muelleri</i> Blume) Berdasarkan Nilai Indeks Sensitivitas Kekeringan (ISK) ..	76
4.4 Tinjauan Hasil Penelitian dalam Perspektif Al-Qur'an	78
BAB V PENUTUP	82
5.1 Simpulan	82
5.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA	83

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Kombinasi Perlakuan Genotipe Mutan dan Konsentrasi PEG 6000	48
4.1 Hasil Uji DMRT 5% Lebar Stomata Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	58
4.2 Hasil Uji DMRT 5% Kerapatan Stomata Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	61
4.3 Hasil Uji DMRT 5% Kadar Klorofil Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	64
4.4 Hasil Uji DMRT 5% Tinggi Planlet Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	68
4.5 Hasil Uji DMRT 5% Jumlah Akar Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	71
4.6 Hasil Uji DMRT 5% Jumlah Daun Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST	73
4.7 Klasifikasi Tingkat Toleransi Mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. Terhadap Kekeringan (2,5% - 10% PEG 6000) Berdasarkan Nilai Indeks Sensitivitas Kekeringan (ISK)	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Habitus Porang	10
2.2 Morfologi Akar Porang	12
2.3 Morfologi Batang Porang	12
2.4 Morfologi Daun Porang	13
2.5 Morfologi Umbi Porang	14
2.6 Morfologi Bunga Porang	14
2.7 Morfologi Buah dan Biji Porang	15
2.8 Mekanisme Mutagenesis Akibat Iradiasi Sinar Gamma	21
2.9 Respon Morfofisioanatomy dan Biokimia Tanaman terhadap Cekaman Kekeringan	25
2.10 Sistem <i>Signaling Network</i> dalam Mekanisme Regulasi terhadap Cekaman Kekeringan pada Tanaman	33
2.11 Rumus Kimia Polietilen Glikol (PEG)	39
2.12 Skema Kerangka Konseptual	45
3.1 Skema Kerangka Operasional	57
4.1 Stomata pada mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 (perbesaran $\times 200$)	59
4.2 Rerata lebar stomata (μm) mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST	60
4.3 Rerata kerapatan stomata ($/\text{mm}^2$) mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST	62
4.4 Rerata kadar klorofil (mg/L) mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST	66
4.5 Tinggi planlet mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 umur 50 HST	68
4.6 Rerata tinggi planlet (cm) mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST	69
4.7 Rerata jumlah akar (satuan) mutan <i>Amorphophallus muelleri</i> B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST	72

- 4.8 Rerata jumlah daun (helai) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST 74
- 4.9 Penggulungan daun pada kelompok mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada berbagai konsentrasi 75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran 1 Konversi Konsentrasi PEG ke Potensial Osmotik (ψ_s)	97
Lampiran 2 Pengenceran Larutan Stok PEG untuk Pembuatan Media Seleksi....	98
Lampiran 3 Anatomi Stomata Mutan Porang Hasil Seleksi Toleransi Ke- keringan Menggunakan PEG 6000 Secara <i>In Vitro</i>	99
Lampiran 4 Pertumbuhan Vegetatif Mutan Porang Hasil Seleksi Toleransi Ke- keringan Menggunakan PEG 6000 Secara <i>In Vitro</i>	100
Lampiran 5 Hasil Analisis SPSS.....	101
Lampiran 6 Dokumentasi Penelitian.....	111
Lampiran 7 Jurnal Bimbingan Tesis (SIKAD)	113

DAFTAR SINGKATAN

Simbol / Singkatan	Keterangan
ABA	<i>Abscisic acid</i>
ADP	<i>Adenosin difosfat</i>
AREB/ABF	<i>ABA-Responsive Element Binding Protein</i>
ASC	Askorbat
ANOVA	<i>Analysis of Varian</i>
ATP	<i>Adenosin Trifosfat</i>
ATPase	<i>Adenosin Trifosfat synthase</i>
BA	<i>Benzyl Adenin</i>
bar	Satuan tekanan
bHLH	<i>basic-helix-loop-helix</i>
bZIP	<i>basic leucine zipper</i>
Ca ²⁺	Kation Kalsium
CAT	Katalase
CDPK	<i>Calcium-dependent protein kinase</i>
cm	<i>centimeter</i>
CO ₂	Karbondioksida
DMRT	<i>Duncan Multiple Range Test</i>
DNA	<i>Deoxyribo nucleic acid</i>
g	<i>gram</i>
Gy	<i>Gray</i>
H ⁺	Kation hidrogen
H ₂ O ₂	Hidrogen Peroksida
HCl	Asam Klorida
HST	Hari Setelah Tanam
ISK	Indeks Sensitivitas Kekeringan
L	Liter
LAF	<i>Laminar Air Flow</i>
K ⁺	Kation Kalium
KGM	<i>Konjac glucomannan</i>
KKF	Koefisien keragaman fenotipe
KL	Kapasitas lapang
MeV	<i>Megaelectron-volt</i>
mg	<i>miligram</i>
Mg	<i>Magnesium</i>
mho	Satuan konduktansi listrik
mL	<i>mililiter</i>
mm	<i>milimeter</i>
MPa	<i>Megapascal</i>

Simbol / Singkatan	Keterangan
MPASI	Makanan pengganti air susu ibu
MS	<i>Murashige and Skoog</i>
MYB	<i>Myeloblastosis oncogene</i>
MYC	<i>Myelocytomatosis oncogene</i>
N	mol ekuivalen per liter
	Nitrogen
NaOH	Natrium Hidroksida
Ni	Nikel
nm	nanometer
NO.mm ⁻²	<i>Number of per square millimeter</i>
O ₂ ⁻	Anion Superoksida
PEG	<i>Polyethylene glycol</i>
pH	<i>power of Hydrogen</i>
POD	Peroksidase
POE	<i>Polyoxyethylene ether</i>
RAL	Rancangan Acak Lengkap
ROS	<i>Reactive Oxygen Species</i>
RSA	<i>Root system architecture</i>
RuBisCO	<i>Ribulose-1,5-biphosphate carboxylase /oxygenase</i>
SGR	<i>Stay Green Rice</i>
SnRK2s	<i>Sucrose Non-Fermenting 1-Related Protein Kinases 2</i>
SOD	<i>Superoksida dismutase</i>
TF	<i>Transcription factor</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>
UV-Vis	<i>Ultraviolet-Visible</i>
ZPT	Zat Pengatur Tumbuh
μm	<i>micrometer</i>
μmol	<i>micromol</i>
Ψ _s	Potensial osmotik
⁶⁰ Co	<i>Cobalt-60</i>
°C	derajat Celsius
%	Persen

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Allah SWT telah menciptakan segala sesuatu di muka bumi untuk digunakan dengan sebaik mungkin, termasuk berbagai macam tumbuhan yang memiliki manfaat berlimpah. Tumbuhan termasuk jenis sumber daya hayati yang dapat dimanfaatkan untuk kelangsungan hidup manusia maupun makhluk hidup lain. Kebermanfaatan tumbuhan antara lain sebagai bahan pangan, sandang, dan papan. Hal ini selaras dengan firman Allah SWT yang termaktub dalam Al-Qur'an surah Asy-Syu'ara ayat 7:

﴿أَوَلَمْ يَرَوْا إِلَى الْأَرْضِ كَمْ أَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ كَرِيمٍ﴾

Artinya: *“Dan apakah mereka tidak memperhatikan bumi, berapakah banyaknya Kami tumbuhkan di bumi itu berbagai macam tumbuh - tumbuhan yang baik?”* (QS. Asy-Syu'ara[26]: 7).

Tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) menyatakan bahwa dalam kata (tumbuh-tumbuhan yang baik) terdapat ajakan kepada manusia untuk memanfaatkan potensi berbagai macam tumbuhan yang telah disediakan oleh Allah SWT di muka bumi ini. Tafsir Jalalain dalam Al-Mahalli, dkk. (2002) mengungkapkan ‘tumbuhan yang baik’ dapat didefinisikan sebagai tumbuhan yang memiliki kebermanfaatan melimpah bagi kehidupan manusia maupun makhluk hidup lainnya. Satu di antara tumbuhan yang memiliki manfaat bagi pemenuhan kebutuhan hidup, baik bidang pangan maupun non pangan ialah tumbuhan porang (*Amorphophallus muelleri* Blume).

Tumbuhan porang merupakan tanaman dari famili *Araceae* (umbi-umbian) asli Indonesia yang banyak dijumpai di hutan liar (Susanto, 2020). Tumbuhan ini termasuk satu di antara umbi yang bernilai ekonomi tinggi dengan nilai keuntungan mencapai Rp 42,18 juta perhektar sehingga berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia (Mutmaidah & Rozi, 2015). Ekspor porang di Indonesia pada tahun 2020 tercatat sebanyak 32.000 ton atau setara dengan Rp 1,42 triliun (Widyasari, 2021).

Umbi porang mengandung glukomanan paling tinggi di antara umbi jenis tumbuhan lainnya. Nilai glukomanan pada *Amorphophallus muelleri* B. mencapai 64,22 % (Masniawati dkk., 2023), *Amorphophallus konjac* 58,8%, *Amorphophallus albus* 59,3% (Chua *et al.*, 2010), dan *Amorphophallus bulbifer* 34% (Zhao *et al.*, 2010). Glukomanan merupakan polisakarida D-glukosa dan D-manosa (Masniawati dkk., 2023). Kandungan glukomanan banyak dimanfaatkan dalam bidang pangan (Irianto *et al.*, 2023), non pangan (Hermanto *et al.*, 2019), farmasi, dan kosmetik (Sari & Suhartati, 2015), di antaranya *edible film*, konyaku, shirataki, agar, bahan lem, bioetanol (Widari & Rasmito, 2018; Supriyati, 2016). Porang juga dimanfaatkan sebagai beras analog untuk diet bagi penderita diabetes melitus (Puspita dkk., 2022).

Potensi yang besar dalam pemanfaatan porang di segala bidang mendorong peningkatan ekspor porang di Indonesia. Ekspor porang Indonesia ke beberapa negara seperti China, Vietnam, Jepang dan New Zealand berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2024) mengalami peningkatan mencapai 511,97 ton pada tahun 2023. Eksportir utama porang adalah Republik Rakyat Tiongkok (RRT) dengan pangsa ekspor 56,2%, sedangkan Indonesia sendiri menduduki urutan ke-5 sebagai pemasok tanaman porang terbesar di dunia setelah Tiongkok, Ekuador, Fiji, dan

Costa Rica, dengan pangsa ekspor sebesar 2,2% terhadap total ekspor porang dunia pada 2020. Ekspor sebesar itu baru memenuhi sekitar 10% dari permintaan dunia (Haerunnisa dkk., 2023).

Tingkat ekspor porang yang masih rendah dapat disebabkan oleh beberapa faktor meliputi perkembangan budidaya porang di Indonesia yang masih tergantung pada alam, luas penanaman yang masih terbatas, dan pedoman budidaya yang belum lengkap, serta keterbatasan bibit unggul porang (Pasaribu dkk., 2021; Lestari, 2016). Tumbuhan porang secara genetik memiliki pertumbuhan umbi yang lambat dengan nilai variabilitas genetik tergolong lebih rendah daripada *Amorphophallus titanum*, yakni sebesar 0,14 – 0,59 (Lestari, 2016). Di sisi lain, plastisitas fenotipe bergantung pada variabilitas genetik yang berkontribusi pada adaptasi dan evolusi di bawah tekanan lingkungan yang berbeda (Mukhopadhyay & Bhattacharjee, 2016), termasuk kondisi kekeringan.

Porang termasuk kelompok tumbuhan yang peka terhadap kekeringan dan tumbuh di bawah naungan dengan intensitas sinar matahari 40% sehingga memerlukan drainase yang cukup untuk menyuplai pertumbuhan (Kementerian Pertanian, 2021; Udarno, 2020; Wardani dan Handrianto, 2019). Namun, lahan di Indonesia $\pm 80\%$ didominasi oleh lahan marginal (suboptimal), yakni seluas 144,5 juta hektar (Syauqi & Amzeri, 2023). Lahan suboptimal memiliki ketersediaan air yang rendah sehingga produktivitas porang tidak dapat ditunjang secara optimal (Aryanti & Abidin, 2015). Defisit air merupakan satu di antara faktor penyebab terjadinya cekaman kekeringan yang membatasi pertumbuhan tanaman baik secara struktural maupun fungsional (Ridwan dkk., 2016). Cekaman kekeringan dapat berdampak negatif terhadap kualitas dan produksi tanaman (Andreea *et al.*, 2016).

Bahkan, penurunan produksi khususnya pada tanaman pangan yang terjadi dalam skala besar menjadi dampak kekeringan yang diperkirakan akan menjadi lebih parah akibat pemanasan global dan variabilitas iklim (Bal & Minhas, 2017; Hafez & Seleiman, 2017). Oleh karena itu, diperlukan peningkatan produksi porang secara intensif melalui pemuliaan tanaman guna merakit varietas unggul yang toleran terhadap cekaman kekeringan.

Pemuliaan tanaman untuk merakit varietas unggul tanaman porang di Indonesia dapat diupayakan dengan cara manipulasi genetik melalui induksi mutasi buatan. Mutagenesis menggunakan Cobalt-60 (^{60}Co) memiliki penetrasi yang tinggi hingga DNA sel, tidak menimbulkan risiko terhadap lingkungan, dan dapat digunakan untuk menyinari sel, jaringan, organ, dan seluruh tanaman (Serrano-Fuentes *et al.*, 2022). Mutasi dengan iradiasi sinar gamma pada tanaman yang berkembang biak secara vegetatif dapat diaplikasikan pada tanaman berumbi (Suprasanna & Nakagawa, 2013), termasuk tanaman porang. Induksi mutasi pada tanaman yang memperbanyak diri secara vegetatif memungkinkan perubahan satu atau beberapa karakter suatu kultivar tanpa mengubah genotipe unggul yang telah ada pada kultivar tersebut (Hidayati dkk., 2012).

Induksi mutasi yang dikombinasikan dengan seleksi *in vitro* telah dianggap sebagai alternatif pemuliaan tanaman yang potensial. Teknik ini dapat mempercepat pembentukan varietas baru dengan sifat-sifat unggul tertentu, satu di antaranya ialah varietas toleran terhadap perubahan iklim ekstrem, termasuk cekaman kekeringan (Yunita *et al.*, 2020). Genotipe mutan hasil seleksi tersebut dapat langsung digunakan sebagai genotipe harapan yang lebih unggul atau menjadi bahan tetua yang akan digabung dengan genotipe lain untuk menghasilkan genotipe

unggul pada pemuliaan tanaman berikutnya (Hidayati dkk., 2012).

Kondisi cekaman kekeringan secara *in vitro* dapat disimulasi melalui penambahan PEG (*polyethylene glycol*) pada media kultur (Savitri, 2010). Hal ini bertujuan untuk menurunkan potensial air pada media sebagai upaya seleksi toleransi kekeringan tanaman (Sinaga, 2015). PEG dipilih sebagai agen selektif karena memiliki berat molekul yang tinggi dengan sifat non-ionik yang secara homogen mampu menurunkan potensial air dalam media (Shekafandeh & Hojati, 2012) tanpa dipenetrasi ke dalam jaringan tanaman sehingga mampu menciptakan kondisi kekeringan mendekati sebenarnya (Purwito dkk., 2016). PEG juga dipilih sebagai agen selektif karena mampu dikontrol secara tepat tanpa menimbulkan keracunan sehingga varian genotipe tanaman yang toleran terhadap kondisi drainase yang kurang baik diharapkan dapat terbentuk (Rosawanti dkk., 2016; Kurniawan dkk., 2023).

Seleksi kekeringan secara *in vitro* menggunakan PEG 6000 pada mutan menghasilkan variasi genotipe dengan perubahan karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif. Penelitian Ridwan dkk. (2016) menunjukkan bahwa tanaman kentang hitam (*Plectranthus rotundifolius* (Poir.) Spreng.) aksesori D3 yang telah diiradiasi dengan sinar gamma dan telah diuji secara *in vitro* menggunakan PEG (*Polyethylene glycol*), tergolong toleran terhadap cekaman kekeringan 20% kapasitas lapang (KL) dengan penurunan pada semua parameter pertumbuhan vegetatif (tinggi tanaman, luas daun, dan bobot kering tanaman), namun tidak mengalami penurunan lebar stomata dan memiliki kandungan klorofil tertinggi, yaitu sebesar 0,0043 $\mu\text{mol/ml}$. Hapsari dkk. (2017) membuktikan bahwa media seleksi dengan penambahan PEG 2,5% secara *in vitro* menghasilkan daya hidup

tertinggi pada tanaman *Tacca leontopetaloides* (L.) Kuntze tanpa iradiasi, yakni sebesar 100%, begitu pula pada planlet hasil iradiasi 20 Gy dengan penambahan PEG 7,5%. Dewi dan Wiendi (2023) juga telah menunjukkan bahwa perlakuan iradiasi gamma ^{60}Co 500 Gy dan media seleksi kekeringan menggunakan PEG 174.674 g/L (-0.4 bar) berpengaruh terhadap peningkatan nilai koefisien keragaman fenotipe (KKF) pada parameter tinggi tanaman dan multiplikasi tunas *Oryza sativa*.

Seleksi toleransi kekeringan dilakukan pada mutan generasi pertama yang telah diiradiasi gamma Cobalt-60 (^{60}Co) pada paparan dosis 0 Gy (kontrol), 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy, dan 8 Gy. Adapun PEG 6000 dalam seleksi *in vitro* ini diaplikasikan pada berbagai taraf konsentrasi 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% yang setara dengan potensial osmotik (ψ_s) sebesar 0 MPa, -0,024 MPa, -0,050 MPa, -0,089 MPa, dan -0,140 Mpa berdasarkan rumus Michel & Kaufmann (1973) (Lampiran 1). Hubungan antara mutasi gamma dan seleksi toleransi kekeringan secara *in vitro* menawarkan pendekatan untuk meningkatkan ketahanan kekeringan yang berpotensi menghasilkan peningkatan produktivitas porang dalam kondisi iklim yang semakin bervariasi. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melakukan seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* terhadap sifat karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif porang hasil mutasi gamma cobalt-60, serta mengidentifikasi tingkat toleransinya terhadap cekaman kekeringan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakter anatomi-biokimia daun pada mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro*?

2. Bagaimana pertumbuhan vegetatif tanaman pada mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro*?
3. Bagaimana tingkat toleransi mutan porang terhadap cekaman kekeringan berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menyeleksi toleransi kekeringan pada karakter anatomi-biokimia daun tanaman porang hasil mutasi gamma cobalt-60 menggunakan PEG 6000 secara *in vitro*.
2. Untuk menyeleksi toleransi kekeringan pada pertumbuhan vegetatif tanaman porang hasil mutasi gamma cobalt-60 menggunakan PEG 6000 secara *in vitro*.
3. Untuk mengidentifikasi tingkat toleransi genotipe mutan porang terhadap cekaman kekeringan berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK).

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengevaluasi karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif tanaman porang hasil mutasi gamma pada kondisi kekeringan secara *in vitro*.
2. Menyediakan data yang bermanfaat bagi pengembangan varietas porang yang lebih adaptif terhadap cekaman kekeringan.
3. Mendukung upaya pemuliaan tanaman berbasis teknologi seleksi *in vitro* untuk meningkatkan produktivitas porang terutama di lahan kering.

1.5 Hipotesis Penelitian

Hipotesis pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakter anatomi-biokimia daun pada mutan porang hasil seleksi *in vitro* menggunakan PEG 6000 menunjukkan respon adaptif terhadap kekeringan.
2. Pertumbuhan vegetatif pada mutan porang hasil seleksi *in vitro* menggunakan PEG 6000 menunjukkan respon adaptif terhadap kekeringan.

1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Tanaman porang yang digunakan merupakan tanaman mutan hasil mutasi gamma Cobalt-60 secara *in vitro* dengan dosis iradiasi 0 Gy (kontrol), 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy, dan 8 Gy.
2. Eksplan yang digunakan adalah tunas mutan generasi pertama pada subkultur ketiga (M1V3) umur 65 Hari Setelah Tanam (HST).
3. Tanaman hasil induksi mutasi diberi perlakuan cekaman kekeringan berupa PEG 6000 dengan taraf konsentrasi 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%.
4. Media seleksi berupa *Murashige and Skoog* (MS) dengan penambahan 2 mg/L *Benzyladenine* (BA) dan PEG 6000 sesuai pola perlakuan.
5. Karakter anatomi-biokimia daun yang diamati meliputi lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total ketika planlet berumur 50 HST.
6. Pertumbuhan vegetatif yang diamati meliputi tinggi planlet, jumlah akar, dan jumlah daun ketika planlet berumur 50 HST.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) dalam Perspektif Al-Qur'an

Tanaman porang merupakan tanaman dari famili Aracea (umbi-umbian) dengan kandungan glukomanan yang tinggi sehingga menyumbang kontribusi positif bagi kehidupan manusia dalam berbagai bidang pangan dan non pangan. Hal ini selaras dengan Firman Allah SWT yang tercantum dalam Surah Al-An'am ayat 141.

وَهُوَ الَّذِي أَنشَأَ جَنَّاتٍ مَّعْرُوشَاتٍ وَغَيْرَ مَعْرُوشَاتٍ وَالنَّخْلَ وَالزَّرْعَ مُخْتَلِفًا أَكْلُهُ
وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُتَشَابِهًا وَغَيْرَ مُتَشَابِهٍ كُلُوا مِنْ ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَآتُوا حَقَّهُ يَوْمَ حَصَادِهِ
وَلَا تُسْرِفُوا إِنَّهُ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِينَ

Artinya: “Dialah yang menumbuhkan tanaman-tanaman yang merambat dan yang tidak merambat, pohon kurma, tanaman yang beraneka ragam rasanya, serta zaitun dan delima yang serupa (bentuk dan warnanya) dan tidak serupa (rasanya). Makanlah buahnya apabila ia berbuah dan berikanlah haknya (zakatnya) pada waktu memetik hasilnya. Akan tetapi, janganlah berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebih-lebihan.”

Tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) menjelaskan bahwa Allah SWT telah menciptakan tanaman yang merambat, yakni disanggah tiang dan yang tidak merambat dalam berbagai variasi rasa, bentuk, dan aroma. Ayat ini menjadi pengingat akan nikmat-nikmat yang telah dianugerahkan oleh Allah SWT melalui ciptaan-Nya di bumi untuk kemaslahatan manusia. Satu di antara nikmat tersebut ialah berbagai jenis tanaman yang diciptakan dengan aneka rasa dan manfaat yang beragam, di antaranya ialah tanaman Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume).

Kementerian Agama (2012) menyebutkan bahwa ayat tersebut memberikan motivasi untuk senantiasa mempelajari dan memaparkan secara rinci terkait metode bercocok tanam (budidaya tanaman). Oleh karena itu, peluang untuk menciptakan inovasi dan teknologi di bidang budidaya dan pemuliaan tanaman terlebih khusus tanaman porang semakin digencarkan, di antaranya melalui manipulasi lingkungan menggunakan polietilen glikol (PEG) secara *in vitro* sebagai media selektif toleran kekeringan. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman porang dapat dijadikan sebagai sumber pembelajaran yang bermanfaat dalam bidang pemuliaan tanaman.

2.2 Tanaman Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) dalam Perspektif Sains

Porang termasuk tumbuhan famili Araceae dengan habitus tanaman perdu (herba) (Gambar 2.1) yang banyak dijumpai hidup liar di hutan tropis Indonesia (Hosiana *et al.*, 2023; Yuzammi, 2014). Porang pada awalnya tumbuh liar di Kepulauan Andaman, India kemudian menyebar ke arah timur hingga Burma, Thailand utara dan selatan, serta Indonesia, termasuk pulau Sumatra, Jawa, Flores, dan Timor (Hosiana *et al.*, 2023). Porang biasanya tumbuh liar di bawah tegakan pohon, semak, dan di antara tanaman bambu karena porang termasuk kelompok tanaman yang toleran terhadap naungan dengan intensitas sinar matahari 40% (Udarno, 2020).



Gambar 2.1 Habitus Porang
(Dokumentasi Pribadi, 2024)

Porang merupakan tumbuhan umbi-umbian asli Indonesia dari famili Araceae dengan siklus hidup bersifat perennial melalui perkembangbiakan secara vegetatif melalui umbi batang, bulbil, dan secara generatif menggunakan biji (Yuzammi *et al.*, 2017; Afifi *et al.*, 2019). Umbi porang dapat tumbuh dengan baik pada suhu udara sekitar 25°C - 35°C, curah hujan antara 300-400 mm per bulan dan ketinggian tempat sampai 1000 meter di atas permukaan laut (mdpl). Kandungan unsur hara yang tinggi, derajat keasaman (pH) tanah dengan nilai pH 6 sampai 7 (netral), gembur, dan drainase yang baik dengan kondisi tidak tergenang air diperlukan untuk pertumbuhan tanaman porang yang baik (Wardani dan Handrianto, 2019; Siswanto dan Karamina, 2016). Porang memiliki siklus hidup yang unik, umbi mulai berkecambah saat hujan mulai turun kemudian tumbuh dengan baik pada musim hujan dan menghempaskan bagian udara sebelum musim kemarau tiba. Umbi merupakan bagian tubuh porang yang masih hidup pada musim kemarau (Santosa *et al.*, 2016).

Tanaman porang memiliki akar serabut berwarna putih yang berfungsi untuk adsorpsi unsur hara dan air yang diperlukan selama pertumbuhan dan perkembangan (Saleh dkk., 2015). Tanaman porang memiliki 2 macam akar primer yang tumbuh di pangkal batang dan akar yang tumbuh di bagian bawah umbi. Sebelum bibit membentuk daun, pertumbuhan akar yang cepat terjadi lebih awal dalam waktu 7–14 hari dan mengikuti pertumbuhan tunas baru. Santosa *et al.* (2016) menyebutkan bahwa ada sekitar 30 akar pada dasar tangkai daun dan bunga (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Morfologi Akar Porang
(Dokumentasi Pribadi, 2024)

Porang merupakan tanaman perdu dengan tinggi mencapai 1-1,5 m. Tumbuhan dari famili Araceae ini memiliki batang yang tegak, lunak, halus, dan memiliki garis hijau atau bintik-bintik putih. Satu batang bercabang menjadi tiga batang sekunder yang masing-masing bercabang kembali ke daun. Nugrahaeni *et al.* (2021) menyampaikan bahwa batang porang pada tahun pertama berwarna hijau muda merata dari pangkal batang hingga tangkai batang, namun batang-batang tersebut mengalami perubahan warna seiring berjalannya waktu sehingga tampak gradasi warna hijau tua di pangkal dan hijau muda di atas, atau hijau tua merata (Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Morfologi Batang Porang
(Dokumentasi Pribadi, 2024)

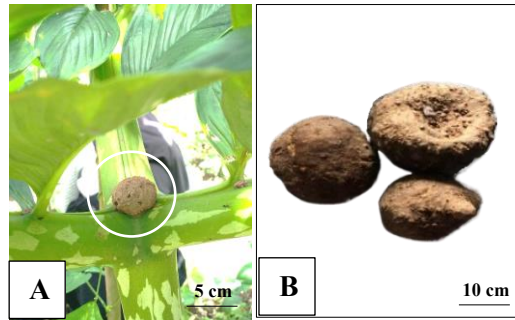
Daun porang hanya memiliki satu umbi, namun terkadang umbinya berpasangan. Menurut Anturida & Azrianingsih (2015), daun porang memiliki tangkai daun licin dengan banyak bercak hijau pucat yang besar, elips memanjang, berbentuk wajik atau bergaris, dan kadang-kadang dengan banyak titik kecil hijau

pucat dan bulat. Helaian daun ini berkisar antara 75-200 cm diameter. Anak-anak daun (terutama yang masih muda) memiliki bentuk lanset atau elips lanset, pangkal yang kuat, dan bagian adaksial hijau atau hijau tua dengan pinggiran sempit berwarna merah agak putih atau merah muda (Illahi dkk., 2022). Tulang rusuk bersayap ditemukan pada segmen distal cabang utama bawah (Gambar 2.4). Daun porang bergelombang dan memiliki bintil pada sambungan saluran pembuluh sebagai ciri khas (Anturida & Azrianingsih, 2015).



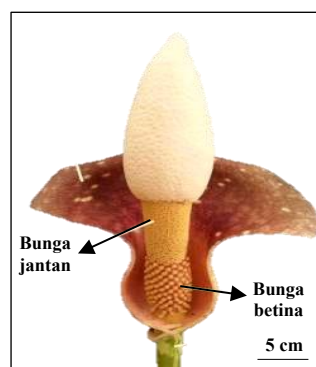
Gambar 2.4 Morfologi Daun Porang
(Dokumentasi Pribadi, 2024)

Umbi porang merupakan alat perkembangbiakan secara vegetatif (Afifi dkk., 2019). Tumbuhan porang memiliki 2 jenis umbi, yakni umbi daun dan umbi batang. Umbi daun yang dikenal dengan istilah *khatak* atau *bulbil* (Isnaini *et al.*, 2023) menjadi karakter pembeda porang dengan genus *Amorphophallus* lainnya (Soemarwoto, 2005). Bulbil tumbuh di setiap pertemuan batang dan pangkal daun, atau di bagian ketiak daun dan berwarna cokelat kehitaman (Gambar 2.5A). Sebagai bibit porang, bulbil dapat digunakan untuk penanaman pada musim berikutnya (Hidayat *et al.*, 2020). Umbi batang porang berwarna cokelat tua dengan daging buah berwarna kuning hingga jingga dengan serat yang halus (Gambar 2.5B). Umbi batang porang berbentuk bulat cekung dengan diameter hingga 28 cm dan memiliki bekas akar yang membengkak berbentuk lingkaran (Anturida & Azrianingsih, 2015).



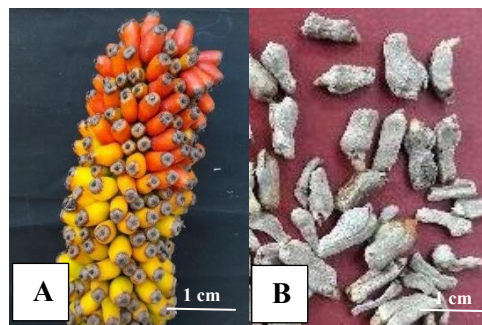
Gambar 2.5 Morfologi Umби Porang
A. Umби Daun (Khatak / Bulbil), B. Umби Batang
 (A. Dokumentasi Pribadi, 2024; B. Febrianti dkk., 2023)

Bunga porang memiliki struktur yang padat, longgar, atau sedang, dengan spadiks sesil atau intermediat yang lebih panjang daripada *spathe*, kira-kira 8 hingga 40 milimeter. Susunan bunga bagian atas lebih rapat daripada bunga bagian paling bawah (Gambar 2.6). Bunga jantan (*staminate*) porang tampak transparan, berdiameter 3,5–6,8 μm , dengan penampang melintang prismatic atau persegi panjang dan 3-5 androus berwarna kuning pucat (Gusmalawati *et al.*, 2013). Bunga betina (*pistillate*) memiliki memiliki kepala putik (stigma) berbentuk silinder atau sedikit fusiform 1,5–10 x 1-5 cm, dan ovariumnya pendek 3-3,5 x 1-1,5 mm. Separuh bawah dan separuh atas bunga berwarna merah muda dengan lokular berjumlah 2-3 buah (Santosa *et al.*, 2018).



Gambar 2.6 Morfologi Bunga Porang
 (Santosa *et al.*, 2016)

Buah porang merupakan buah buni dengan bentuk membulat seperti beri. Buah porang berwarna hijau ketika belum matang dan, namun ketika sudah matang buah akan berubah merah cerah (Afifah dkk., 2014). Buah porang memiliki kisaran ukuran antara 0,4-0,7 cm dengan variasi warna putih kehitaman, dan coklat abu-abu yang bergantung pada tingkat kemasakan. Santosa *et al.*, (2018) memaparkan bahwa tanaman porang menghasilkan biji triploid apomiktik yang terbentuk tanpa penyerbukan. Satu buah beri berisi 1-5 biji, buah beri berbiji satu atau dua pada umumnya ditemukan dalam satu perbungaan diikuti oleh biji tiga dan empat biji kecil lainnya (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Morfologi Buah dan Biji Porang
A. Buah Porang; B. Biji Porang
 (Santosa *et al.*, 2018)

Tanaman porang dalam sistematika taksonomi menurut Pusat Penelitian dan Pengembangan Porang Indonesia (2019) diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Division	: Magnoliophyta
Class	: Liliopsida
Order	: Arales
Family	: Araceae
Genus	: <i>Amorphophallus</i>
Species	: <i>Amorphophallus muelleri</i> Blume

2.3 Kandungan dan Manfaat Tanaman Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume)

Porang merupakan kelompok tanaman umbi-umbian yang mempunyai potensi untuk dikembangkan di Indonesia karena kaya akan nutrisi yang baik untuk tubuh. Sahputra (2023) melaporkan bahwa tanaman porang mempunyai kandungan nutrisi antara lain 45% glukomanan, 9,7% protein, 16 jenis asam amino hingga 7,8%, 7 asam amino esensial hingga 2,5% mengandung mineral seperti kalsium, fosfor, besi, seng, mangan, dan tembaga. Kandungan glukomanan pada porang dapat larut dalam air dan membentuk massa kental dengan kekekentalan hingga 35.000 cps sehingga bersifat plastis. Sifat kekentalan pada porang jauh lebih baik dibandingkan dengan bahan pengental alami lainnya (Sahputra, 2023). Umbi porang memiliki kandung serat kasar hingga 15% (Nurlela dkk., 2021). Mulyaningsih dkk. (2023) menyampaikan bahwa kandungan gizi umbi porang bersifat rendah kalori dengan kandungan glukomanan yang cukup tinggi sehingga sangat baik untuk makanan diet yang menyehatkan, terutama bagi penderita penyakit kencing manis (diabetes).

Umbi tanaman porang memiliki kandungan glukomanan yang paling tinggi dibandingkan dengan umbi jenis tanaman lainnya di Indonesia yaitu sebesar 45-65% (Aryanti & Abidin, 2015). Glukomanan ialah polisakarida yang tersusun atas monomer 33% D-glukosa dan 67% D-manosa yang berikatan 1,4 (Saleh dkk., 2015; Gusmalawati *et al.*, 2019). Glukomanan dikenal juga sebagai *Konjac glucomannan* (KGM), yakni senyawa polisakarida jenis hemiselulosa yang bersifat hidrokoloid, larut dalam air, rendah kalori, dan bebas gluten (Aryanti & Abidin, 2015; Ibrahim, 2019). Senyawa glukomanan adalah sebuah senyawa dalam bentuk gula kompleks dan kaya akan serat terlarut, sebagai sumber energi tertinggi di Indonesia, sebagai

sumber pangan fungsional, glukomanan mempunyai daya serap air yang sangat baik dan memiliki salah satu serat makanan yang paling kental sehingga akan memberikan efek gel (Handayani *et al.*, 2020).

Glukomanan termasuk dalam kelompok polisakarida pada umbi porang yang memiliki banyak manfaat (Chairiyah *et al.*, 2023). Kandungan glukomanan di dalam umbi tanaman porang dapat digunakan untuk berbagai keperluan baik sebagai bahan pangan, maupun bahan non pangan. Aisah dkk. (2017) menyebutkan bahwa glukomanan pada tanaman porang dapat dimanfaatkan sebagai bahan pangan seperti pembuatan mie (shirataki) dan tahu (konyaku), selain itu glukomanan juga banyak dimanfaatkan dalam industri farmasi sebagai bahan lem, bahan *edible film*, pengganti pengawet, dan pengganti lemak (Hidayah, 2016). Porang juga kaya akan kalsium sehingga bagus untuk makanan bayi dan bisa diolah menjadi makanan pengganti air susu ibu (MPASI). Sejumlah pelaku industri selama ini memang telah rutin menggunakan porang sebagai bahan baku misalnya untuk pembuatan jeli dan bisa pula dimanfaatkan untuk bahan komestik (Nurcahya dkk., 2022).

Glukomanan memberikan dampak positif terhadap bidang kesehatan. Li *et al.* (2018) mengungkapkan bahwa porang bisa diolah menjadi makanan suplemen untuk menurunkan gula darah, mengurangi lemak, mengurangi risiko kanker dan sembelit, serta dapat digunakan sebagai emulsifier. Alifianto *et al.* (2013) juga menyebutkan kandungan glukomanan pada umbi porang baik untuk penderita diabetes tipe 2 karena mampu menjaga kondisi gula darah sehingga dapat juga dijadikan sebagai tablet untuk menjalankan program diet. Wigoeno *et al.* (2013) menambahkan bahwa kandungan glukomanan pada porang dapat dimanfaatkan

untuk menjaga ideal berat badan, menekan kolesterol jahat/*low density lipoprotein* (LDL), menurunkan risiko terkena penyakit kanker, dan mengurangi bahkan dapat menyembuhkan konstipasi (sembelit).

2.4 Sinar Gamma Cobalt-60 Sebagai Iradiasi Pengion Mutagenik

Iradiasi sinar gamma merupakan salah satu teknik mutasi yang tergolong sebagai mutasi fisik yang memiliki panjang gelombang terpendek dengan energi terbesar dalam spektrum elektromagnetik. Sinar gamma dihasilkan oleh reaktor *gamma cell* 2200 dengan bahan aktif berupa Cobalt-60 (^{60}Co) yang terus bereaksi mencapai kestabilannya. Cobalt-60 adalah isotop radioaktif sintetis dari cobalt. Isotop ini tidak ditemukan di alam karena waktu paruhnya yang pendek, yakni 5,27 tahun (Sari dkk., 2020) sehingga Cobalt-60 menjadi sumber iradiasi gamma yang stabil dan andal (Bharath *et al.*, 2024).

Cobalt-60 (^{60}Co) digunakan sebagai sumber sinar gamma karena dapat diproduksi dalam jumlah yang dapat diprediksi dan memiliki aktivitas tinggi dengan membombardir Cobalt-59 dengan neutron. Cobalt-60 adalah sejenis metal yang memiliki karakter mirip dengan besi/nikel. Cobalt-60 meluruh menjadi Nikel-60, ($^{60}\text{Ni}_{28}$) melalui emisi partikel beta. Inti nikel yang teraktivasi memancarkan dua foton sinar gamma dengan energi 1,17MeV dan 1,33MeV sehingga menghasilkan energi pancaran rata-rata 1,25MeV (Baba *et al.*, 2013).

Iradiasi gamma dapat menyebabkan mutasi menguntungkan pada tanaman yang menyebabkan perubahan dalam pertumbuhan, perkembangan, dan karakteristik fisiologis (Bharath *et al.*, 2024). Energi yang dipancarkan oleh sinar gamma dapat menyebabkan mutasi pada kromosom tanaman yaitu pemindahan atau hilangnya kromosom pada titik tertentu atau disebut mutasi titik (Lestari dkk.,

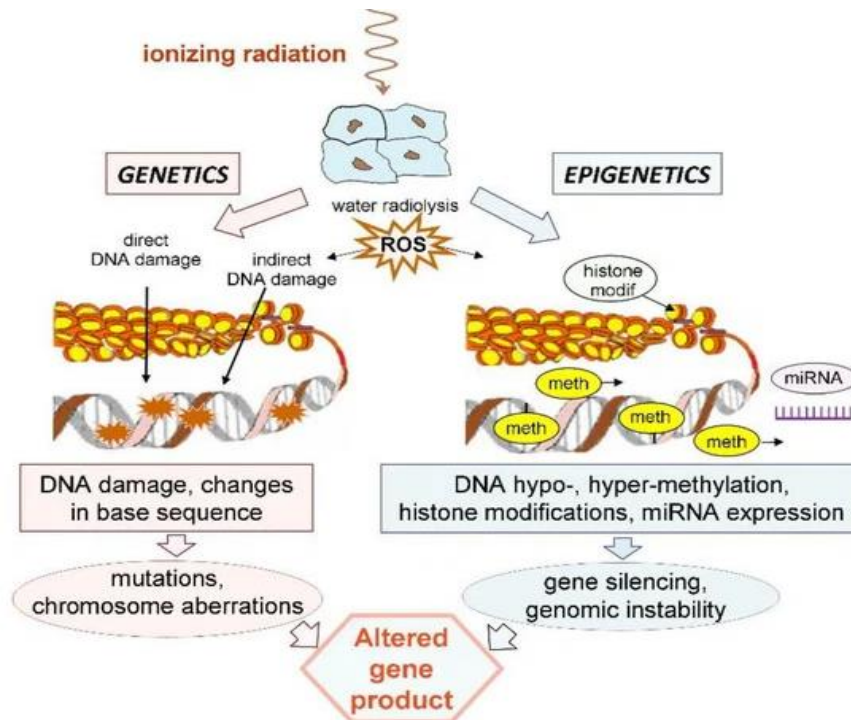
2012). Mutasi tersebut diekspresikan melalui perubahan morfologi, anatomi, proses biokimia, maupun fisiologi tanaman (Lisdyayanti dkk. 2019). Perubahan tersebut dapat disebabkan oleh interaksi antara sinar gamma dengan molekul – molekul yang dapat menghasilkan radikal bebas (Hartati dkk., 2022). Penggunaan sinar gamma sebagai mutasi fisik dianggap lebih aman dibandingkan dengan mutasi kimawi karena tidak meninggalkan residu. Srivastava *et al.* (2018) menjelaskan bahwa induksi mutasi oleh mutagen sinar gamma dapat menghasilkan karakteristik tanaman yang tidak terduga (acak).

Keragaman genetik yang diperoleh dari mutagenesis *in vitro* disebut dengan variasi somaklonal. Variasi somaklonal hasil induksi mutasi sinar gamma bebas dari peraturan dan memungkinkan regenerasi variasi genetik dalam waktu relatif singkat dengan biaya yang terjangkau. Regenerasi ini juga memungkinkan adanya manipulasi genetik pada eksplan di ruang terbatas dan terkendali dalam kondisi aseptis (laboratorium). Oleh karena itu, mutagenesis secara *in vitro* dipilih sebagai teknik alternatif untuk menginduksi variabilitas genetik (Harsanti dan Yulindar, 2015).

Iradiasi sinar gamma merupakan jenis iradiasi pengion yang dapat bereaksi dengan atom-atom atau molekul-molekul, dan menghasilkan radikal bebas yang selanjutnya menyebabkan kerusakan atau modifikasi kromosom pada tanaman (Lelang *et al.*, 2015). Dampak langsung dari iradiasi sinar gamma yaitu terjadinya kematian pada sel tanaman yang diiradiasi (Lisdyayanti dkk., 2019). Iradiasi sinar gamma dengan dosis rendah mampu menstimulasi pembelahan sel, pertumbuhan, dan perkembangan berbagai organisme, sedangkan iradiasi sinar gamma dalam dosis yang tinggi justru bersifat letal (Zaka *et al.*, 2004).

Iradiasi sinar gamma mampu membentuk radikal bebas yang dapat bereaksi dengan molekul organik seperti protein, lipid dan asam nukleat, sehingga dapat menghambat metabolisme sel yang diiradiasi (Nurrachmamila & Saputro, 2017). Radikal bebas kemudian memicu terjadinya modifikasi komponen sel yang mengakibatkan adanya perubahan morfologi tanaman. Hartati dkk. (2022) menambahkan bahwa apabila jaringan tanaman terpapar sinar radioaktif maka terjadi ionisasi molekul air, kemudian akan mengoksidasi gula dalam DNA sehingga rangkaian nukleotida akan putus.

Iradiasi dengan sinar gamma menyebabkan terbentuknya elektron bebas. Elektron bebas dapat menginduksi terbentuknya radikal yang dapat bereaksi dengan makromolekul. Zanzibar dkk. (2015) menyampaikan bahwa elektron bebas yang terbentuk pada ioniasi iradiasi mungkin juga masuk dalam jalur respirasi yang biasanya menggunakan elektron yang dilepas dari penggunaan ATP (Adenosin Trifosfat) menjadi ADP (Adenosin difosfat). Mekanisme perubahan genetik memiliki jalur yang sama dari produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang dipicu oleh radiolisis air (Gambar 2.8). Produksi ROS yang tidak seimbang menyebabkan stres oksidatif pada mitokondria. Radikal bebas dan akumulasi ROS menyebabkan stres oksidatif yang mengarah pada modifikasi basa DNA dan pemutusan untai tunggal DNA, modifikasi asam amino dan fragmentasi struktur primer protein, dan peroksidasi lipid (Belli dan Tabocchini, 2020).



Gambar 2.8 Mekanisme Mutagenesis Akibat Iradiasi Sinar Gamma

(Belli & Tabocchini, 2020)

Pengendalian karakter mutan somaklonal pada induksi mutasi buatan dapat bersifat genetik atau epigenetik, bergantung pada sifat hereditas atau tidaknya suatu karakter dari satu generasi ke generasi selanjutnya. Karakter unggul pada varian somaklonal dapat menurun ke generasi berikutnya dan bersifat stabil sehingga dapat digunakan dalam program pemuliaan tanaman, sedangkan karakter yang diakibatkan oleh perubahan ekspresi gen (epigenetik) tidak bersifat mewaris, sehingga tidak dapat digunakan dalam program pemuliaan tanaman (Yusnita, 2015).

2.5 Cekaman Kekeringan

Kekeringan merupakan salah satu stres abiotik yang terjadi secara signifikan ketika potensial air dan turgor berkurang hingga ke titik yang menghambat fungsi metabolisme normal dan kapasitas reproduksi tanaman (Begna, 2020). Cekaman

kekeringan menghambat proses fotosintesis dan respirasi yang telah dikaitkan dengan penurunan jumlah klorofil, stabilitas membran sel, jumlah air di daun, dan aktivitas enzim antioksidan (Wang *et al.*, 2018). Stres kekeringan menghambat rantai transfer elektron dan meningkatkan pembentukan spesies oksigen reaktif (ROS), seperti hidrogen peroksida (H_2O_2) dan radikal superoksida (O_2^-) yang dapat menyebabkan peroksidasi autokatalitik lipid membran sehingga mengubah fungsi membran sehingga sel-sel pada tanaman kehilangan semipermeabilitasnya (Collin, 2019). Hal ini menunjukkan pentingnya ketersediaan air terhadap keberlangsungan hidup tanaman yang sejalan dengan firman Allah SWT dalam surah Al-An'am ayat 99 berikut.

وَهُوَ الَّذِي أَنزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ نَبَاتَ كُلِّ شَيْءٍ فَأَخْرَجْنَا مِنْهُ خَضِرًا ۝٩٩

Artinya: “Dan Dialah yang menurunkan air dari langit lalu dengannya Kami menumbuhkan segala macam tumbuhan. Maka, darinya Kami mengeluarkan tanaman yang menghijau”

Ayat di atas berdasarkan tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) , mengarahkan manusia untuk mengamati fenomena yang terjadi di sekelilingnya agar dapat sampai pada kesimpulan bahwa Allah SWT adalah Dzat Yang Maha Esa, termasuk air hujan yang dapat menumbuhkan berbagai tanaman yang menghijau (Shihab, 2002). Manfaat air bagi tumbuhan tersebut disifatkan sebagai *akhraja* (mengeluarkan), yakni air hujan yang tersimpan di permukaan bumi menjadikan tanah subur sehingga dari air itu tumbuh berbagai macam tumbuhan (Suskha dkk., 2020). Hal ini mengindikasikan bahwa ada korelasi yang begitu erat antara air dan tumbuhan, yakni ketersediaan air merupakan syarat utama untuk pertumbuhan tumbuhan sehingga apabila tumbuhan tidak memperoleh air maka

akan layu dan mengering. Ayat ini menunjukkan bukti kesempurnaan kekuasaan Allah SWT dari sudut ilmu-Nya, hikmah-Nya, kasih sayang-Nya, dan belas kasihan terhadap makhluk ciptaan-Nya sebagai bukti kepada hamba-Nya untuk berada di jalan kebenaran (Zaini, 2022).

Air internal pada tanaman sebagian besar hilang ke atmosfer akibat peningkatan suhu yang diakibatkan oleh pemanasan global, sebuah fenomena yang semakin memperburuk masalah defisit air yang sudah ada di berbagai sistem pertanian di seluruh dunia (Sultan *et al.*, 2019). Perubahan iklim global diperkirakan akan semakin cepat di masa mendatang karena suhu udara dan kadar CO₂ atmosfer terus meningkat, yang pada akhirnya mengubah pola curah hujan dan distribusinya (Yang *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2018). Meskipun kurangnya masukan air dari curah hujan biasanya menjadi pendorong utama stres kekeringan, hilangnya air dari tanah melalui penguapan, yang disebabkan oleh peristiwa suhu tinggi, intensitas cahaya tinggi, dan angin kering, dapat semakin memperburuk peristiwa stres kekeringan yang ada (Cohen *et al.*, 2021).

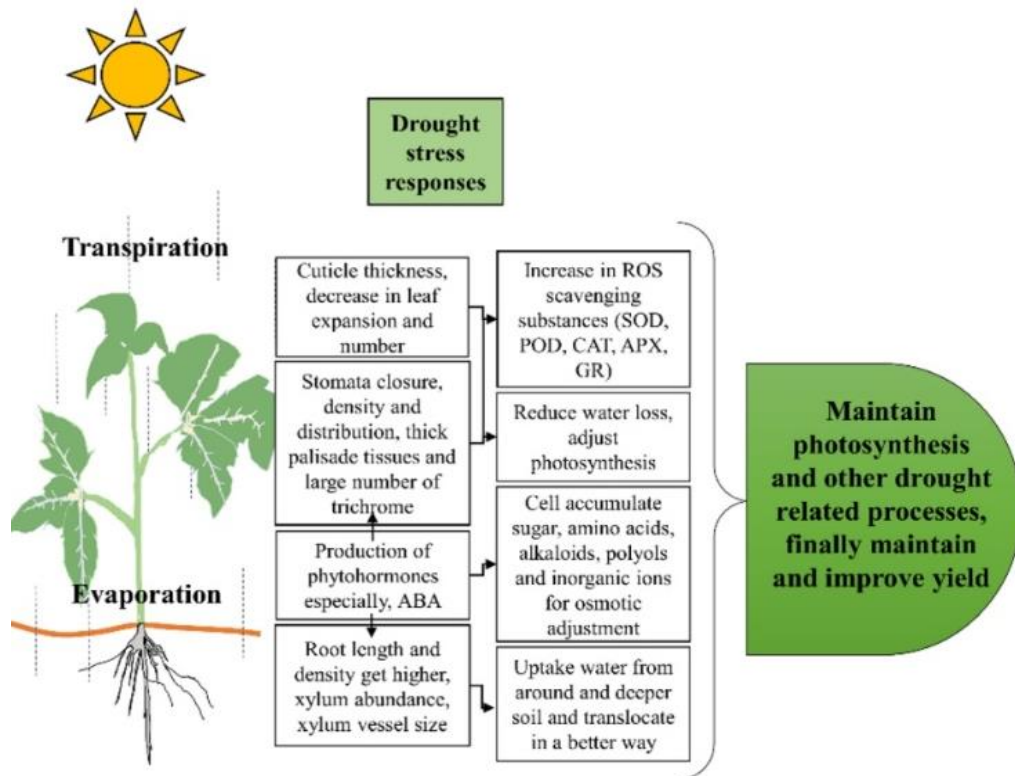
Perubahan iklim global biasanya mengakibatkan distribusi kondisi stres kekeringan meluas dalam skala global (Mostofa *et al.*, 2018). Mayoritas cekaman diperkirakan terjadi di wilayah yang produksi tanamannya hanya bergantung pada curah hujan dibandingkan dengan wilayah yang diairi melalui kanal, sungai, dan saluran air (Konapala *et al.*, 2020). Oleh karena itu, fenomena kekeringan di daerah tadah hujan berkaitan erat dengan distribusi curah hujan sepanjang tahun dan kemungkinan besar stres air diamati dalam beberapa tahun selama periode waktu tertentu.

Beberapa sifat kompleks yang relevan dengan biomassa dalam kondisi stres juga digunakan untuk mengevaluasi ketahanan kekeringan tanaman dalam hal produktivitas tanaman terutama pada sektor pertanian. Sifat - sifat tersebut meliputi berat segar atau kering, tingkat viabilitas dan vigor (kelangsungan hidup), kemampuan *stay-green*, tingkat pembentukan biji, kesuburan spikelet (bakal biji), berat biji, dan sebagainya. Sifat kompleks ini lebih bermakna dan efektif dalam pemuliaan tanaman untuk merakit varietas tahan kekeringan, meskipun jarang digunakan untuk mengungkap mekanisme ketahanan terhadap kekeringan pada tingkat fisiologis dan molekuler (Fang & Xiong, 2015).

2.6 Respon dan Regulasi Adaptif Tanaman terhadap Cekaman Kekeringan

2.6.1 Respon Morfofisioanatomi dan Biokimia

Tanaman memiliki banyak mekanisme adaptasi terhadap kekeringan termasuk respon morfofisioanatomi dan biokimia (Gambar 2.9). Karakteristik kadar air relatif, kompleks pigmen, struktur xeromorfik daun dianggap sebagai kriteria yang dapat diandalkan untuk ketahanan tanaman terhadap kekeringan. Daun tanaman mengembangkan beberapa karakter xeromorfik, dan mengubah strukturnya untuk meningkatkan toleransi kekeringan, seperti pengurangan luas daun, reduksi ukuran dan jumlah stomata, perubahan kerapatan stomata, penebalan kutikula, jaringan palisade yang tebal, modifikasi jaringan epidermis menjadi trikoma, serta perkembangan jaringan pembuluh (Iqbal *et al.*, 2013; Tapia *et al.*, 2015).



Gambar 2.9 Respon Morfofisioanatomi dan Biokimia Tanaman terhadap Cekaman Kekeringan

(Ilyas *et al.*, 2020)

Penggulungan daun juga menjadi bentuk adaptasi morfologi dan fisiologi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Perlikowski & Kosmala, 2020). Kekurangan air secara signifikan yang terjadi ketika tanaman tercekam kekeringan ekstrem menyebabkan kelayuan yang diindikasikan dengan daun terkulai (menggulung) karena tanaman kehilangan tekanan turgor sel. Fenomena ini terjadi dalam rangka mengurangi radiasi matahari yang masuk guna meminimalkan konsumsi air berlebih selama kondisi kekeringan (Fang & Xiong, 2015). Efisiensi penggunaan air oleh tanaman diregulasi melalui penutupan stomata yang mengakibatkan asupan CO_2 berkurang (Ilyas *et al.*, 2020). Hal ini dapat membatasi pertumbuhan tunas yang mengarah pada peningkatan rasio akar sehingga penyerapan air ditingkatkan melalui pertumbuhan akar halus,

pembentukan akar yang dalam, dan akumulasi zat terlarut untuk menurunkan potensial air dalam jaringan akar (Mahmood *et al.*, 2020).

Toleransi kekeringan dan konduktansi stomata memiliki korelasi berlawanan. Penutupan stomata mengurangi transpirasi yang meningkatkan toleransi kekeringan, sementara pembukaannya meningkatkan transpirasi dan selanjutnya mengurangi toleransi kekeringan tanaman (Ullah *et al.*, 2017; Clauw *et al.*, 2015). Namun, terdapat proporsi langsung konduktansi stomata dengan fotosintesis karena regulasi stomata terlibat dalam pemeliharaan kemampuan fotosintesis tanaman di bawah tekanan kekeringan (Martin *et al.*, 2014). Pembukaan stomata menyebabkan CO₂ masuk ke jaringan mesofil dan melanjutkan proses fotosintesis, namun penutupan stomata masing-masing mengurangi laju fotosintesis (Urban *et al.*, 2017). Dengan demikian, penutupan stomata merupakan respon awal tanaman untuk mengurangi transpirasi (Ullah *et al.*, 2017).

Stres kekeringan berdampak pada sifat pertumbuhan tanaman dan perubahan pada jumlah dan ukuran organel, serta struktur organel daun tanaman (Anjum *et al.*, 2011). Penurunan jumlah stomata merupakan respons fisiologis lain terhadap stres kekeringan. Kekeringan tingkat sedang memiliki dampak aditif pada jumlah stomata, sedangkan jumlah stomata menurun dalam kondisi kekeringan yang ekstrem. Penurunan ukuran area pori stomata (*stomatal pore area*) secara signifikan terjadi di bawah kondisi stres air. Bukaan stomata yang kecil mampu meningkatkan toleransi kekeringan pada tanaman (Ilyas *et al.*, 2020). Penyesuaian struktural stomata tersebut sejalan dengan prinsip keseimbangan yang tercantum dalam surah Al-Mulk ayat 3 berikut:

الَّذِي خَلَقَ سَبْعَ سَمَوَاتٍ طِبَاقًا مَا تَرَى فِي خَلْقِ الرَّحْمَنِ مِنْ تَفْوُتٍ فَارْجِعِ الْبَصَرَ
هَلْ تَرَى مِنْ فُطُورٍ ﴿٢٧﴾

Artinya: “(Dia juga) yang menciptakan tujuh langit berlapis-lapis. Kamu tidak akan melihat pada ciptaan Tuhan Yang Maha Pengasih ketidakseimbangan sedikit pun. Maka, lihatlah sekali lagi! Adakah kamu melihat suatu cela?”

Ayat di atas berdasarkan tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) mengungkapkan bahwa Allah SWT menciptakan langit — bahkan seluruh makhluk — dalam keadaan seimbang sebagai bentuk ‘rahmat’ (kasih sayang). Kekacauan antara satu dengan yang lain tentu akan terjadi apabila ciptaan-Nya tidak seimbang sehingga kenyamanan hidup manusia di muka bumi ini menjadi terganggu. Sama halnya dengan fenomena cekaman kekeringan yang menuntut tanaman untuk melakukan penyesuaian diri, termasuk penyesuaian struktural stomata. Osakabe *et al.* (2014) menyampaikan bahwa penyesuaian struktural stomata merupakan respon adaptif tanaman untuk meminimalkan transpirasi. Strategi ini memungkinkan efisiensi penggunaan air dan keseimbangan air dalam jaringan tanaman tetap terjaga meskipun tercekam kekeringan.

Cekaman kekeringan menyebabkan degradasi pada sistem membran dalam sel tanaman, termasuk membran tilakoid sebagai fondasi struktural untuk penyerapan, transmisi, dan transformasi cahaya dalam kloroplas. Hal ini berdampak secara tidak langsung pada kandungan klorofil. Tanaman yang dapat mempertahankan kandungan klorofil yang lebih tinggi dalam kondisi stres air dianggap memiliki ketahanan kekeringan yang lebih baik karena mampu menggunakan energi cahaya secara lebih efisien (Fang & Xiong, 2015).

Penyesuaian osmotik melalui akumulasi berbagai zat organik dan anorganik pada tanaman merupakan respon tanaman terhadap cekaman kekeringan (Fang & Xiong, 2015). Akumulasi tersebut meliputi gula terlarut, prolin, aktivasi enzim Peroksidase (POD), Superoksida dismutase (SOD), Askorbat (ASC) dan katalase (CAT)), serta *reduced glutathione* (GSH) sebagai zat non-enzimatik (Ilyas *et al.* 2020). Zat organik mampu mengatur potensi osmotik plasma, serta melindungi enzim dan membran plasma, sedangkan zat anorganik meregulasi potensi osmotik vakuola untuk mempertahankan tekanan turgor, namun kehadiran zat anorganik dengan konsentrasi tinggi cenderung menyebabkan gangguan metabolisme pada sel tumbuhan (Fang & Xiong, 2015).

Fitohormon ABA memainkan peran penting dalam regulasi merespons stres kekeringan dan menginduksi serangkaian kaskade pensinyalan. Pensinyalan ABA melibatkan kompleks reseptor ABA, yang terdiri dari famili reseptor ABA, fosfatase, dan kinase. Protein – protein tersebut memainkan peran sentral dalam mengatur berbagai respons terhadap stres kekeringan, termasuk aktivitas transporter ion. Sintesis ABA, terutama di jaringan pembuluh daun ditranslokasikan ke sel penjaga melalui aktivitas transporter ABA. Selama stres air, ABA menghambat aktivitas H^+ -ATPase dengan mengurangi tingkat fosforilasi H^+ -ATPase untuk mempertahankan depolarisasi membran. Depolarisasi membran akan mengaktifasi saluran K^+ keluar sehingga stomata tertutup (Osakabe *et al.*, 2014).

Tanaman dalam mentolerir kekeringan juga mampu mengembangkan sistem pertahanan antioksidan (Ahmad *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Tingkat spesies oksigen reaktif (ROS) yang lebih tinggi diproduksi untuk mempercepat

penuaan dan kematian tanaman akibat kekeringan (Yang *et al.*, 2021; Nadarajah, 2020), serta jumlah klorofil pada tanaman juga berkurang dengan cepat akibat stres kekeringan. Hal ini menyebabkan produksi fotosintat mengalami penurunan secara dramatis karena fotosintesis yang berjalan lebih lambat atau dekomposisi yang lebih cepat (Lourkisti *et al.*, 2021). Aktivitas enzim antioksidan meningkat secara bertahap seiring dengan tingkat stres kekeringan, penurunan fotosintesis yang sesuai, dan percepatan sintesis zat pengatur osmoregulasi merupakan respons positif adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Tabatskaya *et al.*, 2020).

2.6.2 Respon Pertumbuhan Vegetatif dan Generatif

Kekeringan dapat memengaruhi tahap vegetatif dan generatif tanaman secara berbeda. Daun merupakan organ vegetatif yang paling peka terhadap perubahan lingkungan termasuk defisit air akibat cekaman kekeringan (Nenko *et al.*, 2019). Abnormalitas pada tekanan turgor, kadar air daun, gerakan stomata, pewarnaan daun, fotosintesis dan respirasi, dan vitalitas daun dialami selama siklus perkembangan vegetatif ketika stres kekeringan. Respons ini mungkin mendorong tanaman untuk mempersingkat periode vegetatif dan bergerak cepat melalui tahap generatif. Stres kekeringan yang dialami pada tahap generatif dapat menyebabkan produktivitas yang bersifat *irreversible*. Periode tanaman seperti penyerbukan, pembuahan, pembentukan biji, dan pengisian buah pada tahap generatif merupakan periode kritis ketika hasil panen menurun (Oguz *et al.*, 2022).

Kekeringan dalam jangka panjang pada periode vegetatif berdampak pada proses fotosintesis sehingga mengakibatkan pertumbuhan dan produktivitas

tumbuhan juga menurun. Oguz *et al.* (2022) menyebutkan bahwa penurunan produksi biomassa segar dan kering, keterlambatan pembentukan anakan (tunas), ruas pertama yang lebih pendek, kematangan awal, dan penurunan produktivitas tanaman yang tidak terduga merupakan efek kekeringan terhadap periode vegetatif tanaman. Selain itu, pengurangan jumlah daun per tanaman, ukuran daun yang mengecil, dan peningkatan penuaan daun merupakan dampak dari stres kekeringan selama periode vegetatif (Oguz *et al.*, 2022). Rendahnya tekanan turgor selama stres kekeringan mengakibatkan penurunan pertumbuhan vegetatif yang signifikan pada parameter jumlah daun, panjang pucuk, dan biomassa (Semerci *et al.*, 2017). Karakteristik akar seperti jumlah akar, diameter, kedalaman, panjang total, distribusi, dan biomassa tanaman pada tahap akhir periode pertumbuhan vegetatif juga berkaitan erat dengan toleransi kekeringan. Perkembangan *root system architecture* (RSA) pada tanaman gandum dilaporkan memiliki korelasi positif dengan hasil gabah dalam kondisi kekeringan terminal (Ehdaie *et al.*, 2012).

Tahap vegetatif tanaman membutuhkan waktu lebih lama daripada periode generatif. Oleh karena itu, tanaman memiliki lebih banyak waktu untuk merespons stres kekeringan dengan mengoptimalkan adaptasi fisiologis. Jika kekeringan ringan terjadi di awal tahap vegetatif perkembangan tanaman secara terus-menerus menyebabkan pertumbuhan dan kebugaran tanaman yang kurang baik, bahkan tanaman tersebut mungkin tidak dapat bertahan hidup kecuali mereka dapat dengan cepat mengalihkan respons mereka ke mekanisme toleransi kekeringan yang lebih efektif. Sedangkan, dalam kondisi kekeringan terminal, tanaman mempercepat pertumbuhannya dalam upaya untuk

menyelesaikan siklus hidupnya dan meminimalkan paparan stres kekeringan melalui pembungaan lebih awal (Shavrukov *et al.*, 2017).

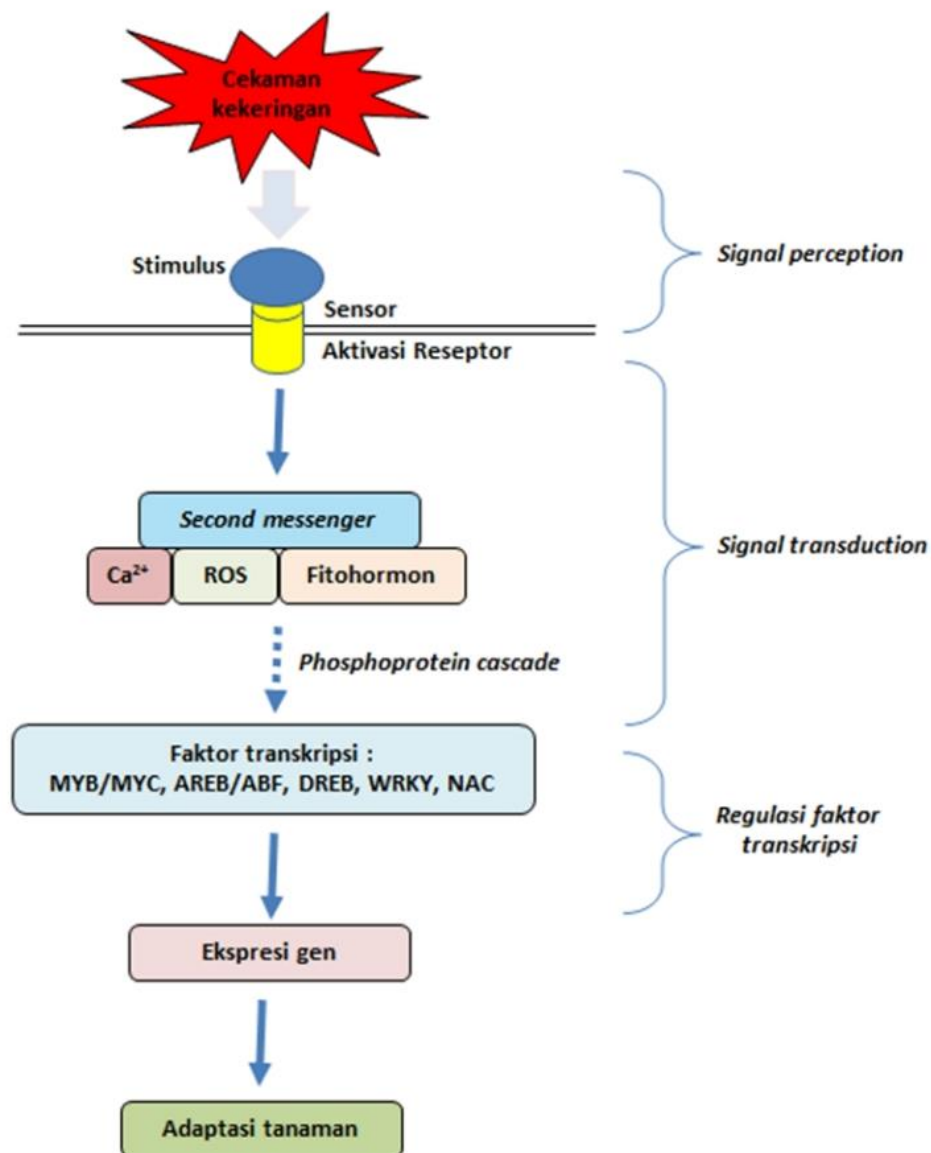
Tanaman dengan pembungaan lebih awal dapat diaplikasikan melalui seleksi buatan dalam pemuliaan tanaman. Hal ini dapat membatasi pertumbuhan vegetatif dan memungkinkan periode generatif terjadi sebelum stres terminal, dalam suatu proses yang biasanya berkorelasi dengan kematangan reproduksi awal. Namun, fase vegetatif yang singkat dapat mengurangi biomassa tanaman karena berkurangnya waktu yang tersedia untuk produksi fotosintat dan akumulasi nutrisi benih (Shavrukov *et al.*, 2017). Hal ini mengindikasikan bahwa stres kekeringan selama periode pertumbuhan vegetatif dapat memengaruhi hasil panen pada tanaman.

Hossain & Fujita (2010) melaporkan bahwa stres kekeringan menyebabkan penurunan yang signifikan pada tinggi tanaman, biji, dan hasil panen per tanaman, serta mempersingkat waktu berbunga tanaman *Brassica campestris* L. Panda *et al.* (2016) menunjukkan bahwa stres kekeringan selama periode pertumbuhan vegetatif berpengaruh nyata terhadap kadar air relatif, jumlah anakan, biomassa tanaman, dan hasil panen *Oryza sativa* L. Bangar *et al.* (2019) menyatakan bahwa kandungan air relatif, indeks stabilitas membran, kandungan prolin daun, luas daun, dan tinggi tanaman, serta hasil panen *Vigna radiata* (L.) Wilczek mengalami penurunan drastis di bawah cekaman kekeringan pada tahap vegetatif dan reproduktif; yang diperkirakan berbunga lebih awal. Fenomena - fenomena tersebut menginterpretasikan bahwa efek stres kekeringan pada tanaman bersifat kompleks dan memengaruhi semua tahap pertumbuhan tanaman mulai dari perkecambahan biji hingga reproduksi. Oleh

karena itu, cekaman kekeringan merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap penurunan hasil panen tanaman di lahan marginal dengan curah hujan yang tidak menentu, tidak merata, dan ketersediaan air terbatas (Begna, 2020).

Regulasi adaptif osmotik, mekanisme pertahanan antioksidan, akumulasi zat terlarut, dinamika metabolisme, biokimia penutupan stomata, dan peningkatan rasio tunas akar merupakan respon tanaman untuk menekan dampak buruk stres kekeringan (López-Galiano *et al.*, 2019). Kuromori *et al.* (2014) memaparkan bahwa pengembangan mekanisme respon tanaman terhadap cekaman kekeringan diregulasi dalam bentuk *network stress signaling* yang terdiri dari sistem sinyal intraseluler, komunikasi interseluler, dan regulasi faktor transkripsi (Gambar 2.10).

Respon tanaman terhadap cekaman kekeringan diawali dengan tahapan *signal perception* yang menjadi bagian dari rangkaian *signaling network* yang sangat kompleks. Selama proses *signal perception*, terjadi pengenalan stimulus dari lingkungan dalam bentuk stres kering oleh tanaman. Aktivasi dari sensor pada tahapan *signal perception* ini akan menginduksi rangkaian *signal transduction* pada tingkat seluler maupun molekuler tanaman untuk kemudian diterjemahkan dalam berbagai mekanisme adaptasi terhadap stres kekeringan (Kuromori *et al.*, 2014). Selain molekul sensor, mekanisme *sensing* pada tanaman terhadap stimulus dari lingkungannya juga melibatkan komponen *second messenger* berupa molekul kecil yang berfungsi mentransmisikan 'pesan' dalam bentuk sinyal stres secara intraseluler. *Second messenger* yang terlibat dalam mekanisme respon tanaman terhadap stres kekeringan, di antaranya adalah Ca^{2+} , ROS, dan fitohormon (Rini dkk, 2020).



Gambar 2.10 Sistem *Signaling Network* dalam Mekanisme Regulasi terhadap Cekaman Kekeringan pada Tanaman

(Rini dkk., 2020)

Mekanisme *signal transduction* pada tanaman dalam merespon cekaman kekeringan adalah CDPK (*Calcium-dependent protein kinase*). CDPK berperan dalam menangkap sinyal perubahan konsentrasi Ca^{2+} intraselular dan mentransmisikan sinyal tersebut untuk menginduksi proses fosforilasi molekul target (Liese & Romeis, 2013). *ROS signaling* di sisi lain, juga berasosiasi dengan

mekanisme *sensing* pada Ca^{2+} maupun fitohormon asam absisat / *abscisic acid* (ABA). Peningkatan ROS menghasilkan oksidasi molekul, dekomposisi membran, inaktivasi enzim, dan perubahan ekspresi gen (Singh *et al.*, 2019). Sedangkan, asam absisat yang sering dikenal sebagai 'hormon stres', diproduksi secara cepat sebagai respons tanaman ketika dalam kondisi tercekam (Zhou *et al.*, 2019).

Kompleksitas gen dan ekspresi dari masing-masing gen pada tanaman memegang kendali penuh atas mekanisme toleransi terhadap kekeringan (Rutger dan Mackill, 2001; Datta, 2002). Regulasi faktor transkripsi dalam sistem *network stress signaling* diklasifikasikan dalam beberapa famili yang berbeda, seperti *MYB/MYC*, *AREB/ABF*, *DREB*, *WRKY*, dan *NAC*. *MYB* (myeloblastosis oncogene) berperan sebagai *transcription factor* (TF) yang mendominasi dalam regulasi berbagai proses pertumbuhan dan perkembangan pada tanaman (Lata *et al.*, 2015), sedangkan *MYC* (myelocytomatosis oncogene) memiliki karakter spesifik berupa motif *bHLH* (basic-helix-loop-helix) dan *bZIP* (basic leucine zipper). Bagian motif *bHLH* inilah kemungkinan terjadi binding antara *MYC* dengan molekul lainnya membentuk struktur bimolekuler untuk meregulasi proses transkripsi pada gen target (Cui *et al.*, 2019). *AREB/ABF* (*ABA-Responsive Element Binding protein*) akan teraktivasi secara total oleh proses fosforilasi pada bagian *conserved region* yang dikatalisasi oleh serine/threonine kinase SnRK2s (*Sucrose Non-Fermenting 1-Related Protein Kinases 2*) melalui faktor induksi berupa fitohormon ABA. Regulasi TF *DREB* (*Dehydration-Responsive Element Binding protein*) dilakukan pada gen-gen yang terlibat dalam jalur *ABA-independent signaling*. Proses regulasi TF *WRKY* ini dilakukan melalui jalur *ABA signaling* (Zhao *et al.*, 2019). *NAC* meregulasi gen yang bersifat *drought-responsive* pada jalur sinyal *ABA-dependent*

dan *ABA-independent* (Rini dkk., 2020).

Sistem regulasi adaptif tanaman dalam merespon stres kekeringan menunjukkan bahwa segala sesuatu berada dalam radar pengaturan dan kadar yang ditetapkan oleh Allah SWT sebagai sang Pencipta alam semesta beserta seisinya. Hal ini selaras dengan kalam Allah SWT dalam Surah Al-Qamar ayat 49 berikut.

إِنَّا كُلَّ شَيْءٍ خَلَقْنَاهُ بِقَدَرٍ ﴿٤٩﴾

Artinya: “*Sesungguhnya Kami menciptakan segala sesuatu sesuai dengan ukuran*”.

(QS. Al-Qamar[27]: 49)

Ayat di atas berdasarkan tafsir Al – Misbah menurut Shihab (2002) ialah tiada satu pun yang Allah SWT ciptakan secara sia-sia atau tanpa tujuan yang benar. Semuanya diberi oleh-Nya potensi yang sesuai dan dengan kadar yang cukup untuk melaksanakan fungsinya, semuanya saling berkorelasi, serta tunjang menunjang dalam satu keseimbangan (Shihab, 2002). Satu di antara sistem pengaturan Allah SWT dalam memelihara keseimbangan ialah respon adaptif tanaman dalam rangka meminimalkan dampak negatif yang diakibatkan oleh cekaman kekeringan. Hal ini merupakan pemeliharaan Allah SWT terhadap keseimbangan faktor kelanjutan eksistensi dan kepunahan (Shihab, 2002).

2.7 Mekanisme Resistensi Kekeringan pada Tanaman

Ketahanan terhadap kekeringan mengacu pada kemampuan tanaman untuk bertahan hidup atau tumbuh di lingkungan yang keras akibat kondisi cekaman kekeringan. Kemampuan ini merupakan sifat inkonvensional yang terkait dengan adaptasi pada berbagai tingkatan, yang memungkinkan tanaman beradaptasi dengan habitat tertentu demi pertumbuhan dan perkembangannya. Mekanisme resistensi

kekeringan pada tanaman dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori, yakni *avoidance*, *tolerance*, *escape*, dan *recovery* (Fang & Xiong, 2015).

A. *Avoidance*

Avoidance terhadap kekeringan pada umumnya dikembangkan oleh tanaman pada awal terpapar oleh cekaman kekeringan. Orientasi dari mekanisme resistensi ini ialah untuk menjaga ketersediaan air ketika kondisi defisit air (Basu *et al.*, 2016). Mekanisme *drought avoidance* merupakan kemampuan tanaman untuk mempertahankan proses fisiologis normal yang fundamental di bawah kondisi stres kekeringan ringan/sedang dengan menyesuaikan struktur morfologi atau laju pertumbuhan tertentu untuk menghindari efek negatif yang diakibatkan oleh cekaman kekeringan (Fang & Xiong, 2015).

Adaptasi fisiologi yang dikembangkan oleh tanaman pada mekanisme ini di antaranya adalah penurunan laju transpirasi dan reduksi area transpirasi. Keduanya bersinergi melalui regulasi konduktansi stomata berupa penutupan sel penjaga dan reduksi pertambahan luas daun untuk menghindari defisit air secara berlebihan (Rini dkk., 2020). Selain itu, sistem perakaran dalam bentuk *root system architecture* (RSA) juga dikembangkan sebagai adaptasi morfologi terhadap stres kekeringan. Sistem akar dimodulasi menjadi lebih dalam untuk memaksimalkan fungsi akar dalam proses absorpsi air dari lingkungan selama kekeringan mendera tanaman (Rini dkk., 2020).

B. *Tolerance*

Tolerance terhadap kekeringan bergantung pada kemampuan tanaman untuk mempertahankan aktivitas fisiologis dalam kondisi stres kekeringan yang parah melalui perombakan regulasi gen dan jalur metabolisme untuk

mengurangi atau memperbaiki kerusakan akibat stres air (Fang & Xiong, 2015; Perlikowski & Kosmala, 2020). Mekanisme toleran terhadap kekeringan diinterpretasikan dalam bentuk penyesuaian osmotik dan perlindungan sistem membran dengan tujuan mengatasi dampak negatif pada tanaman yang ditimbulkan oleh cekaman kekeringan (Chowdhury *et al.*, 2017).

Toleransi kekeringan adalah dua mekanisme utama untuk ketahanan kekeringan yang diberikan oleh tanaman. *Pertama*, mempertahankan tekanan turgor sel melalui peningkatan molekul regulator osmosis dalam sel, *kedua* mengurangi akumulasi zat berbahaya melalui penyesuaian aktivitas enzim pertahanan sel. Indikator dalam mekanisme pada *drought tolerance* meliputi parameter fisiologis yang melibatkan penyesuaian osmotik, penurunan kerusakan akibat kekeringan (seperti aktivitas enzim pelindung dan kandungan klorofil), dan pensinyalan asam absisat (ABA) (Fang & Xiong, 2015).

C. *Escape*

Mekanisme *escape* terhadap kekeringan mengacu pada sinkronisasi secara alami atau buatan terhadap periode pertumbuhan tanaman, siklus hidup, atau waktu tanam untuk mencegah musim tanam mengalami kekeringan musiman atau iklim setempat (Fang & Xiong, 2015; Perlikowski & Kosmala, 2020). Sinkronisasi ini biasanya dijumpai pada tanaman yang memiliki siklus hidup pendek dengan tingkat pertumbuhan tinggi, seperti tanaman dari famili umbi-umbian, semak, rumput, dan serelia (Kooyers, 2015; Shavrukov *et al.*, 2017). Mekanisme *escape* juga mayoritas juga ditemukan pada tanaman semusim yang bersifat native di daerah dengan curah hujan rendah (Touchette *et al.*, 2007).

Escape drought merupakan satu di antara banyak strategi yang digunakan oleh tanaman ketika mengalami defisit air di akhir musim tanam. Mekanisme *escape* mengasumsikan tingginya laju metabolisme sehingga perluasan dan pembelahan sel terjadi secara progresif. Stomata yang terbuka dan laju pertukaran gas yang tinggi memfasilitasi fotosintesis dan fotorespirasi yang efektif dengan efisiensi penggunaan air yang rendah, dan perkembangan tanaman yang sangat cepat. Strategi ini memastikan bahwa tanaman dapat menyelesaikan siklus hidupnya dengan cepat selama periode singkat dengan kondisi yang menguntungkan, namun tanaman tetap bereaksi terhadap kondisi stres yang tiba-tiba muncul (Shavrukov *et al.*, 2017).

D. Recovery

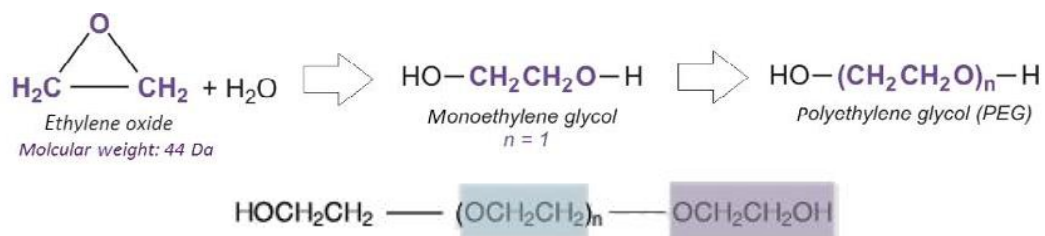
Recovery atau pemulihan dari kekeringan mengacu pada kapasitas tanaman untuk melakukan regenerasi metabolisme setelah kekeringan ekstrem berakhir. Pemulihan ini mengacu pada kemampuan tanaman untuk melanjutkan pertumbuhan dan memperoleh hasil (untuk tanaman pangan) setelah terpapar stres kekeringan parah sehingga tekanan turgor hilang dan menyebabkan dehidrasi daun secara total (Luo, 2010). Ketahanan tanaman terhadap kekeringan cukup kompleks sehingga beberapa spesies tanaman tertentu sering menggabungkan berbagai kategori mekanisme untuk memberikan ketahanan terhadap kekeringan pada berbagai tahap perkembangan (Fang & Xiong, 2015).

Ketika tingkat kekeringan menjadi terlalu parah dan mekanisme *drought escape* tidak lagi memadai, tanaman akan merespons dengan mengaktifkan mekanisme aksi zat terlarut dan protein pelindung untuk melindungi jaringan dari kerusakan seluler (Tuberosa, 2012; Claeys & Inzé, 2013). Oleh karena itu,

mekanisme *drought recovery* juga didefinisikan sebagai periode pasca kekeringan dengan pemulihan homeostasis hidrologi. Proses *recovery* di sini diartikan sebagai kondisi tidak ada perbaikan yang signifikan meskipun pasokan air memadai (Zheng *et al.*, 2023). Sifat pemulihan pasca kekeringan difokuskan pada pemulihan fotosintesis yang cepat (perbaikan membran, perlindungan dan perbaikan fotosistem, perlindungan dan perbaikan pigmen), konduktansi hidrolik (peningkatan regulasi akuaporin, pembalikan kavitasi, penyesuaian osmotik yang cepat), dan pertumbuhan akar halus (Delfin *et al.*, 2021).

2.8 Polietilen Glikol (PEG) Sebagai Media Selektif

Polietilen glikol (PEG) merupakan senyawa polieter dengan rumus kimia $(H(OCH_2CH_2)_nOH)$ yang disintesis melalui polimerisasi etilen oksida (Gambar 2.11). Polietilen glikol memiliki banyak nama lain, di antaranya polimer etilen glikol, polimer etilen oksida, polimer oksietilen, *polyoxyethylene diol*, *polyoxirane*, pluriol, *polyoxyethylene ether* (POE), *Poly(oxy-1,2-ethanediyl)*, makrogol, poligol, dan polikol (Wenande *et al.*, 2016). PEG 6000 memiliki struktur padat, berwarna putih, suhu lebur $55^{\circ}C - 63^{\circ}C$, berat molekul 6000 g/mol, dan komposit polimer karbon 0,082 mho (Hapsari *et al.*, 2017).



Gambar 2.11 Rumus Kimia Polietilen Glikol (PEG)

(Wenande *et al.*, 2016)

PEG mampu mengikat molekul air bersama ikatan hidrogen dan memiliki kemampuan untuk menurunkan potensial osmotik melalui aktivitas matriks sub-unit *ethylene oxide* (Hapsari *et al.*, 2017). PEG yang larut sempurna dalam air mengakibatkan penurunan potensial air sehingga tercipta kondisi selektif untuk mengetahui respon jaringan yang ditanam terhadap cekaman kekeringan dan mengisolasi sel atau jaringan tanaman yang memiliki toleransi terhadap cekaman (Badami & Amzeri, 2010). Kemampuan larutan PEG dalam mengikat air bergantung pada berat molekul dan konsentrasinya (Novita & Suwarno, 2014).

PEG tersedia dalam berbagai macam berat molekul mulai dari PEG 200, 400, 600, 1000, 1500, 1540, 2250, 4000, 6000, 8000, 20.000, 100.000 hingga 300.000 g/mol. PEG dengan berat molekul <1000 g/mol berbentuk cair, PEG dengan berat molekul 1000-1500 g/mol berupa semi-padat, PEG dengan berat molekul 3000 – 20.000 g/mol berupa padatan semi-kristalin, dan PEG dengan berat molekul >100.000 g/mol berbentuk resin. Jenis PEG yang sering digunakan memiliki besar molekul 6000 g/mol (PEG 6000). PEG 6000 pada umumnya dimanfaatkan sebagai sarana simulasi dan induksi stres kekeringan pada tanaman. PEG 6000 termasuk senyawa polimer non ionik dengan berat molekul yang tinggi sehingga tidak diserap oleh dinding sel tanaman (Abido *et al.*, 2023; Meher *et al.*, 2017).

Aplikasi PEG menyebabkan stres kekeringan secara signifikan dan tidak memiliki efek toksik apa pun pada tanaman. Kerusakan atau kematian tanaman karena penggunaan PEG bukanlah efek langsung dari senyawa PEG, melainkan pengaruh dari kondisi kekeringan yang tercipta karena kemampuan PEG dalam menurunkan potensial air pada media, di samping sifat PEG yang tidak dapat diserap oleh jaringan tanaman (Hapsari dkk. 2017; Shekafandeh & Hojati, 2012).

Dengan demikian, PEG dapat digunakan sebagai agen penyeleksi beberapa kultivar tanaman secara *in vitro* dengan tingkat toleransi kekeringan yang lebih baik. Penggunaan berbagai konsentrasi dan berat molekul PEG memengaruhi baik tidaknya penurunan potensial air dalam media untuk skrining (Hapsari dkk., 2017).

2.9 Aplikasi PEG 6000 dalam Pemuliaan Tanaman

Cara yang efisien dan cepat untuk penyaringan utama toleransi kekeringan di laboratorium adalah aplikasi PEG 6000 untuk menciptakan stres osmotik dari kondisi stres kekeringan (Clapco *et al.*, 2018). Aplikasi polietilen glikol (PEG) sebagai upaya skrining pada toleransi kekeringan dinilai mampu menghidrasi jaringan pada tumbuhan yang dilakukan secara *in vitro* (Hapsari dkk., 2017).

Penginderaan pertama tanaman dalam lingkungan cekaman kekeringan adalah defisit air, yakni sebagian besar air yang mengalir dari tanaman akan hilang melalui transpirasi. Upaya untuk mengurangi kehilangan air ini akan mengurangi pembukaan stomata atau bahkan menutup stomata sehingga berdampak pula pada perubahan struktur stomata. Kou *et al.* (2023) membuktikan bahwa perlakuan konsentrasi 20% PEG menghasilkan rerata kerapatan stomata tertinggi sebesar 92,33 NO.mm⁻² dengan panjang stomata rata-rata 42,6 µm, lebar stomata rata-rata 33,6 µm, dan ukuran pori stomata 3,74 µm pada daun *Betula pendula* Roth. Hal ini mengindikasikan bahwa stres kekeringan oleh PEG mengakibatkan laju transpirasi, konduktansi stomata, konsentrasi CO₂ antarsel, dan laju fotosintesis pada daun mengalami penurunan yang signifikan.

PEG 6000 dapat menimbulkan tekanan osmotik yang dapat mengurangi laju fotosintesis sehingga mempengaruhi kandungan klorofil-a dan klorofil-b (Meher *et al.*, 2017). Ridwan dkk. (2016) menunjukkan bahwa tanaman kentang hitam

(*Plectranthus rotundifolius* (Poir.) Spreng.) aksesori D3 yang telah diiradiasi dengan sinar gamma dan telah diuji secara *in vitro* menggunakan PEG, tergolong toleran terhadap cekaman kekeringan 20% kapasitas lapang (KL) dengan penurunan pada semua parameter pertumbuhan vegetatif (tinggi tanaman, luas daun, dan bobot kering tanaman), namun tidak mengalami penurunan lebar stomata dan memiliki kandungan klorofil tertinggi, yaitu sebesar 0,0043 $\mu\text{mol/ml}$. Harianja dkk. (2021) membuktikan bahwa mutan alfalfa hasil iradiasi sinar gamma dosis 500Gy (*Medicago sativa* L.) yang diberi perlakuan PEG 5% menghasilkan viabilitas 100% dengan skor kelayuan daun terendah, yakni $36,52 \pm 27,28$. Dewi dan Wiendi (2023) menunjukkan bahwa perlakuan iradiasi gamma ^{60}Co 500 Gy dan media seleksi kekeringan menggunakan PEG 174,674 g/L (-0,4 bar) berpengaruh terhadap peningkatan nilai koefisien keragaman fenotipe (KKF) pada parameter tinggi tanaman dan multiplikasi tunas *Oryza sativa*. Nurcahyani *et al.* (2024) juga melaporkan bahwa cekaman kekeringan melalui pemberian PEG 6000 dengan konsentrasi 40% menurunkan kandungan klorofil a, klorofil b dan total klorofil secara signifikan dan menghasilkan kerapatan stomata tertinggi sebesar 405 mm^2 pada tanaman *Manihot esculenta* Crantz. Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Luo *et al.* (2024) diperoleh hasil bahwa penggunaan 20% PEG 6000 secara *in vitro* menyebabkan penurunan signifikan pada ekspresi gen AkCSLA11 yang terlibat dalam sintesis *konjac glucomannan* (KGM). Hal ini mengindikasikan bahwa stres osmotik yang diinduksi oleh PEG 6000 dapat menghambat proses biosintesis KGM yang berperan penting dalam mempertahankan struktur dan fungsi dinding sel di bawah kondisi kekeringan.

Penelitian - penelitian tersebut menunjukkan bahwa PEG 6000 dapat diaplikasikan sebagai upaya pemuliaan berbagai macam tanaman, termasuk tanaman porang. Pemuliaan tanaman secara modern ini dilakukan karena pemuliaan tanaman secara konvensional telah banyak dilakukan melalui hibridasi (persilangan) memiliki beberapa kelemahan, di antaranya kebutuhan keragaman genetik yang tinggi dan minimnya tingkat keseragaman genetik yang dihasilkan dari rekombinasi sehingga segregasi tidak akan terjadi untuk gen yang sama (Mohite & Gurav, 2019). Keterbatasan plasma nutfah ini menyebabkan tingkat keberhasilan menjadi rendah sehingga penerapan persilangan ini dinilai tidak praktis, tidak efektif, dan tidak efisien. Pemuliaan tanaman secara inkonvensional diaplikasikan melalui pendekatan bioteknologi modern secara *in vitro* ditempuh sebagai alternatif memperoleh variabilitas genetik (Lestari, 2016).

Pemuliaan tanaman melalui mutasi yang dikombinasikan dengan seleksi kekeringan melalui teknik *in vitro* merupakan suatu pendekatan yang paling baik untuk memperoleh kultivar baru bagi tanaman yang diperbanyak secara vegetatif (Dewi dan Dwimahyani, 2005), seperti tanaman porang. Hal ini selaras dengan kalam Allah SWT yang tercantum dalam Surah Ali ‘Imran ayat 190.

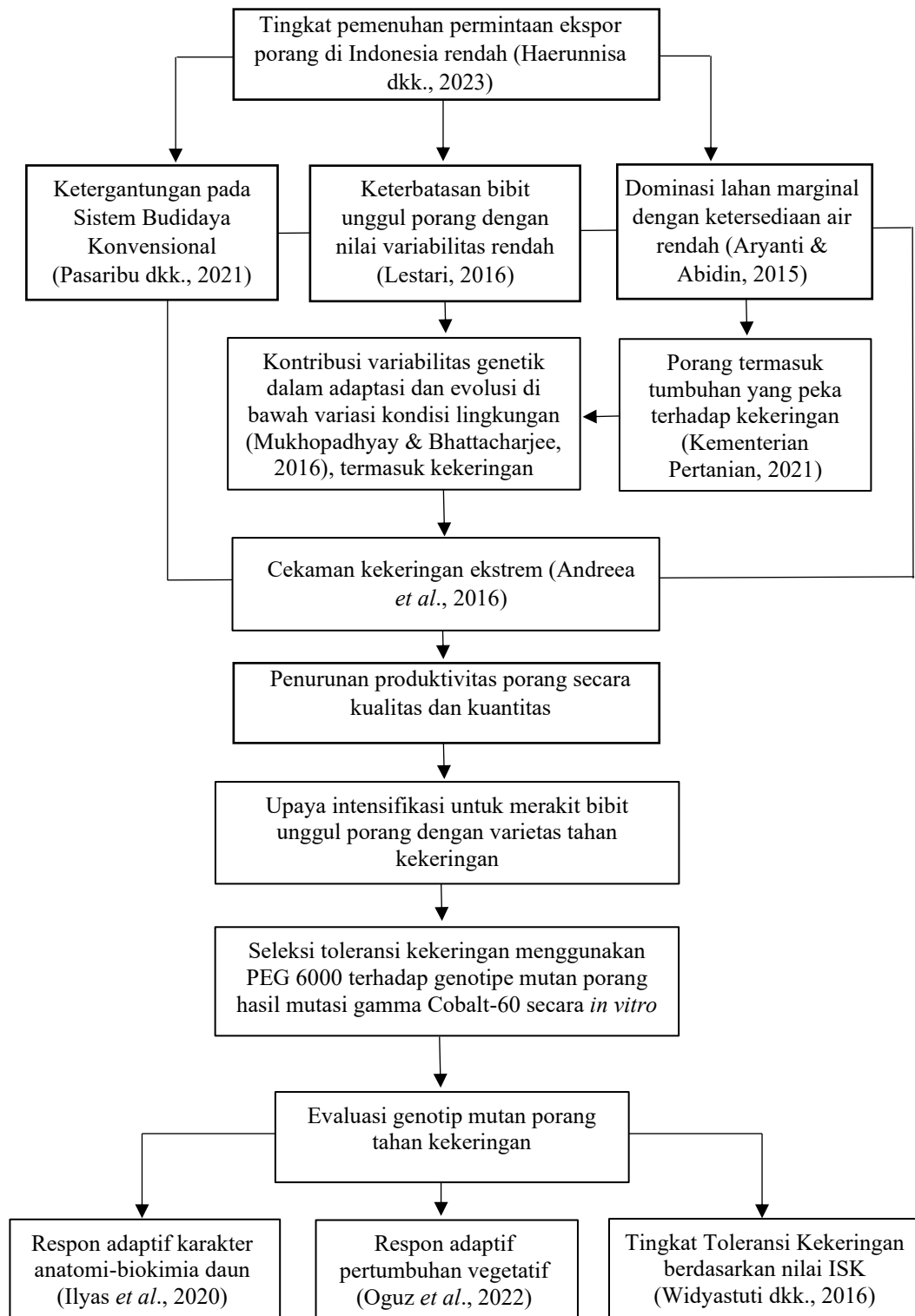
إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾

Artinya: “Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal” (QS. Ali ‘Imran [3]: 190).

Ayat di atas berdasarkan Tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002), menegaskan kepemilikan Allah SWT atas alam semesta, segala sesuatu yang ada di langit dan di bumi. Hal ini didasarkan pada pemahaman hikmah bagi *Ulul albab*, yakni orang – orang berakal yang merenungkan tentang fenomena alam semesta

hingga memperoleh bukti kebenaran yang sangat nyata terkait keesaan dan kekuasaan Allah SWT. Tanda-tanda kemahakuasaan yang terkandung dalam penciptaan-Nya mengundang manusia untuk berpikir sehingga Allah SWT menganjurkan untuk mengenal sifat-sifat keagungan, kemuliaan, dan kebesaran-Nya menggunakan akal pikiran (Sofia, 2021). Dengan demikian, pemuliaan tanaman menggunakan induksi mutasi buatan yang kemudian diseleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* merupakan upaya peningkatan produksi varietas unggul tanaman porang di Indonesia baik secara kuantitas maupun kualitas.

2.10 Kerangka Konseptual



Gambar 2.12 Skema Kerangka Konseptual

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh potensi kandungan glukomanan porang yang mendorong peningkatan ekspor porang di Indonesia, namun tingkat pemenuhan permintaan ekspor porang di Indonesia baru memenuhi sekitar 10% dari permintaan dunia dengan pangsa ekspor sebesar 2,2% terhadap total ekspor porang dunia (Haerunnisa dkk., 2023). Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor di antaranya ialah ketergantungan pada sistem budidaya konvensional (Pasaribu dkk., 2021). Sistem budidaya porang secara konvensional masih tergantung pada alam, terbatas luas penanaman, dan pedoman budidaya yang belum lengkap dapat menghambat proses produksi porang secara kuantitas.

Keterbatasan bibit unggul porang dengan nilai variabilitas rendah juga berdampak pada produksi porang (Lestari, 2016). Sifat plastisitas fenotipe yang bergantung terhadap variabilitas genetik berkontribusi dalam adaptasi dan evolusi di bawah variasi kondisi lingkungan (Mukhopadhyay & Bhattacharjee, 2016), termasuk kekeringan. Dominasi lahan marginal dengan ketersediaan air yang minim menyebabkan produktivitas porang menjadi tidak optimal (Aryanti & Abidin, 2015). Porang termasuk tumbuhan yang peka terhadap kekeringan dan tumbuh di bawah naungan dengan intensitas sinar matahari 40% sehingga memerlukan drainase yang cukup untuk mendukung pertumbuhan (Kementerian Pertanian, 2021; Udarno, 2020; Wardani & Handrianto, 2019).

Cekaman kekeringan yang ekstrem merupakan faktor eksternal yang ikut memperparah penurunan produktivitas porang secara kualitas dan kuantitas (Andreea *et al.*, 2016). Maka dari itu upaya intensifikasi untuk merakit bibit unggul porang dengan varietas tahan kekeringan dilakukan melalui seleksi tingkat toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* terhadap genotipe mutan

porang hasil mutasi secara *in vitro* menggunakan sinar gamma Cobalt-60. Seleksi tersebut dilakukan sebagai tahap evaluasi genotipe mutan porang yang tahan terhadap kekeringan berdasarkan indikasi respon adaptif karakter anatomi-biokimia daun, pertumbuhan vegetatif, dan tingkat toleransi kekeringan berdasarkan nilai ISK (Ilyas *et al.*, 2020; Oguz *et al.*, 2022; Widyastuti dkk., 2016).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah rancangan acak lengkap (RAL) dengan 2 faktorial dengan faktor A adalah genotipe mutan pada dosis sinar gamma (0 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy, dan 8 Gy), dan faktor B adalah konsentrasi PEG (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%). Jumlah ulangan dalam penelitian ini dihitung berdasarkan rumus $(t - 1)(r - 1) \geq 15$, dengan t sebagai perlakuan dan r adalah ulangan (Susilawati, 2015). Berdasarkan rumus tersebut diperoleh jumlah ulangan sebanyak 3 replikasi. Setiap unit terdiri atas 1 eksplan sehingga terdapat 25 eksplan dengan jumlah keseluruhan pengamatan adalah 75 botol kultur.

Tabel 3.1 Kombinasi Perlakuan Genotipe Mutan dan Konsentrasi PEG 6000

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0	P1	P2	P3	P4
M0	M0P0	M0P1	M0P2	M0P3	M0P4
M1	M1P0	M1P1	M1P2	M1P3	M1P4
M2	M2P0	M2P1	M2P2	M2P3	M2P4
M3	M3P0	M3P1	M3P2	M3P3	M3P4
M4	M4P0	M4P1	M4P2	M4P3	M4P4

Keterangan:

M0= Genotipe Kontrol (0 Gy)

M1= Genotipe Mutan 2 Gy

M2= Genotipe Mutan 4 Gy

M3= Genotipe Mutan 6 Gy

M4= Genotipe Mutan 8 Gy

P0= Konsentrasi PEG 0%

P1= Konsentrasi PEG 2,5%

P2= Konsentrasi PEG 5%

P3= Konsentrasi PEG 7,5

P4= Konsentrasi PEG 10%

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari - Maret 2025 berlokasi di Laboratorium Kultur Jaringan Tumbuhan Program Studi Biologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian pada penelitian ini meliputi:

1. Variabel bebas pada penelitian ini ialah genotipe porang hasil mutasi iradiasi gamma Cobalt-60 pada berbagai dosis paparan (0 Gy, 2 Gy, 4 Gy, 6 Gy, dan 8 Gy) dan konsentrasi PEG 6000 (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%).
2. Variabel terikat pada penelitian ini terdiri atas:
 - a. karakter anatomi-biokimia daun meliputi lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total.
 - b. pertumbuhan vegetatif meliputi tinggi planlet, jumlah akar, dan jumlah daun.
 - c. tingkat toleransi kekeringan berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK)
3. Variabel terkendali (kontrol) pada penelitian ini adalah media *Murashige and Skoog* (MS), Zat Pengatur Tumbuh (ZPT), cahaya, pH, dan suhu inkubasi.

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

Alat-alat yang digunakan adalah botol kultur, pipet kaca, scalpel, autoklaf, *microwave oven*, pH meter, neraca analitik, laminar air flow (LAF), *microscope inverted*, silet goal, beaker glass, pipet volume, korek api, pinset, rak kultur, lampu penyinaran, *hotplate stirrer*, *magnetic stirrer*, bunsen, penggaris, cawan petri, *object glass*, *cover glass*, *surgical blade* no.22, erlenmeyer, mortar, corong, kuvet, tabung falcon, dan spektrofotometer UV-Vis.

3.4.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan adalah tunas mutan porang generasi pertama, *Murashige and Skoog* (MS), 2mg *Benzyl Adenin* (BA), sukrosa (gula pasir), *Polyethylene glycol* (PEG) 6000, HCl 0,1 N, NaOH 0,5%, spirtus, kertas label, tisu, plastik, karet gelang, alkohol 70%, alkohol 96%, aluminium foil, aquades, betadine, kutek bening, selotip, kertas saring Whatman, dan etanol 96%.

3.5 Prosedur Kerja

3.5.1 Sterilisasi Alat

Cawan petri, gelas beaker, botol kultur, dan alat diseksi (*scalpel*, pinset, dan *blade*) dicuci menggunakan detergen dan dibilas dengan air bersih. Selanjutnya cawan petri dibungkus dengan kertas dan alat-alat diseksi dibungkus menggunakan aluminium foil. Semua alat dikemas dalam plastik dan diikat menggunakan karet, kemudian alat-alat tersebut disterilkan menggunakan autoklaf dengan suhu 121°C dalam tekanan 15 psi selama 15-30 menit.

3.5.2 Pembuatan Larutan Stok PEG 6000

Pembuatan larutan stok PEG diawali dengan penimbangan serbuk PEG 6000 dengan konsentrasi 100mg pada neraca analitik. Serbuk tersebut kemudian dilarutkan pada 100ml aquades dan dihomogenkan pada *hotplate*, lalu dilakukan pengenceran sesuai konsentrasi perlakuan (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%) menggunakan rumus $C_1V_1 = C_2V_2$ (Lampiran 2).

Keterangan:

C_1 = Konsentrasi larutan stok PEG (%)

V_1 = Volume larutan stok yang harus ditambahkan (ml)

C_2 = Konsentrasi akhir PEG dalam media *Murashige and Skoog* (%)

V_2 = Volume total pada media akhir (ml)

3.5.3 Pembuatan Media Seleksi

Pembuatan media diawali dengan menimbang *Murashige and Skoog* (MS) sebanyak 4.43g, 30g gula (sukrosa), 11.8g agar menggunakan neraca analitik. Media MS dan gula dimasukkan terlebih dahulu dalam aquades 1000 ml yang dihomogenkan pada *hotplate*. Larutan media kemudian ditambahkan *Benzyladenin* (BA) dengan konsentrasi 2 mg/L. Larutan tersebut dituang ke beberapa *beaker glass* yang telah berisi PEG dengan dosis 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% lalu dihomogenkan menggunakan *magnetic stirrer*. Larutan media kemudian diukur nilai pH pada kisaran 5,8-6 dengan pH meter, pH di atas 6 akan ditambahkan HCl untuk menurunkan pH, sedangkan pH dibawah 5,8 akan ditambahkan dengan NaOH sampai pH naik. Langkah berikutnya ialah ditambahkan agar masing – masing 2,4g (kecuali perlakuan kontrol) dan dihomogenkan lalu dimasukkan dalam *microwave oven* selama 2 menit. Media yang telah masak akan dituang ke dalam botol kultur sebanyak 12,5 ml dan ditutup dengan plastik tahan panas yang diikat dengan karet. Media yang telah siap disterilisasi di autoklaf selama 30 menit dengan suhu 121°C.

3.5.4 Sterilisasi Ruang Kerja

Langkah utama yang perlu dilakukan untuk menjaga sterilisasi ruang kerja ialah lantai ruang tanam dan ruang kultur dibersihkan menggunakan alkohol 96% sehari sebelum eksekusi penanaman. Meja *Laminar Air Flow* (LAF) disemprot alkohol 70% lalu dilap bersih menggunakan tisu. Alat-alat dan bahan (cawan petri, alat diseksi, bunsen, alkohol, korek dll.) dimasukkan ke meja LAF kemudian lampu UV dinyalakan selama 30 menit. Lampu UV dimatikan ketika akan digunakan, sedangkan lampu neon dan blower (kipas) dinyalakan.

3.5.5 Subkultur pada Media Seleksi

Tunas hasil multiplikasi dilakukan subkultur pada formulasi media seleksi berupa *Murashige and Skoog* (MS) dengan penambahan 2 mg/l *Benzyladenin* (BA) sebagai zat pengatur tumbuh dan PEG 6000 sebagai agen seleksi. Subkultur dilakukan di dalam *Laminar Air Flow* (LAF). Prosedur subkultur diawali dengan menyiapkan semua alat dan bahan yang dibutuhkan dalam proses subkultur, termasuk menyalakan bunsen. Pinset dengan alkohol 70% dan akuades steril kemudian dibakar di atas api bunsen dari pangkal sampai ujung, perlakuan tersebut dilakukan 2–3 kali. Hal ini bertujuan untuk memastikan pinset telah steril dari mikroba.

Selanjutnya diambil eksplan tunas porang dari botol kultur yang akan disubkultur dan diletakkan eksplan tersebut di atas cawan petri yang sudah berisi aquades steril dan sudah ditetesi betadine sebanyak 2 tetes, kemudian dipotong eksplan tunas porang dengan ukuran 1cm menggunakan scalpel, lalu eksplan ditanam dalam media perlakuan. Setelah proses subkultur dilakukan dan botol kultur berisi eksplan selanjutnya botol ditutup dengan plastik tahan panas dan diikat dengan karet. Selanjutnya botol-botol kultur diinkubasi selama 50 hari dalam kondisi aseptik ruang kultur bersuhu 20°C.

3.5.6 Pengamatan

3.5.6.1 Karakter Anatomi-Biokimia Daun

Karakter anatomi-biokimia daun yang diamati meliputi lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total.

1. Pembuatan preparat stomata

Pembuatan preparat stomata menggunakan model replika, yakni hasil cetak epidermis bawah dengan kuteks transparan (Khoiroh dkk., 2014). Daun bagian bawah dibersihkan dengan tisu untuk menghilangkan kotoran atau debu, kemudian kutek dioleskan pada daun bagian abaksial dan dibiarkan sekitar 3-5 menit hingga kuteks kering. Setelah kuteks kering bagian tersebut ditempel dengan selotip bening. Olesan yang sudah kering ditempel selotip bening dan diratakan, selanjutnya dikelupas dan diambil pelan-pelan, lalu ditempelkan pada objek glass, dan diberi keterangan genotipe mutan. Selanjutnya dilakukan pengamatan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 100x dan 200x. Keakuratan penghitungan stomata dilakukan dengan cara mengoles tiga daun yang berbeda pada masing - masing ulangan.

A. Lebar Stomata

Lebar stomata tiap perlakuan pada 5 bidang pandang (perbesaran 200x) diukur menggunakan software imageJ yang sebelumnya telah dilakukan kalibrasi sesuai perbesaran 200x.

Lebar stomata menurut Juairiah (2014) diklasifikasikan menjadi 3 kategori:

- 1) Kurang lebar ($<19,42 \mu\text{m}$)
- 2) Lebar ($19,42-38,84 \mu\text{m}$)
- 3) Sangat lebar ($>38,84 \mu\text{m}$)

B. Kerapatan Stomata

Pengukuran kerapatan stomata dilakukan melalui perhitungan rerata jumlah stomata dengan luas bidang pandang 100x pada 5 bidang pandang, dengan per bidang pandang mikroskop (mm^2) (Dewi *et al.*, 2020).

$\text{Kerapatan Stomata} = \frac{S1 + S2 + S3 + \dots + S_n/n}{\text{Luas bidang pandang (mm}^2\text{)}}$
--

Keterangan:

S1 : Stomata 1

S2: Stomata 2

S3: Stomata 3

S_n: Stomata jumlah ke-n

n : Jumlah bidang pandang per preparat

Luas Bidang Pandang 100x = 0,038978 mm²

Kategori kerapatan stomata menurut Karubuy dkk. (2018) yaitu:

- 1) Kerapatan rendah (<300/mm²)
- 2) Kerapatan sedang (300-500/mm²)
- 3) Kerapatan tinggi (>500/mm²)

2. Analisis Kadar Klorofil Total

Kandungan klorofil diekstraksi menggunakan spektrofotometer metode Miazek dan Ledakowicz (2013). Ekstraksi diawali dengan daun segar ditimbang sebanyak 0,1 gram lalu dihaluskan menggunakan mortar. Daun yang telah dihaluskan ditambahkan 10ml etanol 96% sebagai pelarut, lalu dihomogenkan dan dilakukan filtrasi menggunakan kertas Whatman No.1 ke erlenmeyer. Larutan sampel diambil sebanyak 1 ml menggunakan pipet, lalu dimasukkan ke kuvet, dan ditera dengan etanol 96% hingga batas garis kuvet. Asorbansi larutan tersebut diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 665 nm dan 649 nm dengan 3x replikasi untuk masing - masing sampel (Nurcahyani *et al.*, 2024). Kadar klorofil total dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$\text{Klorofil total} = 17,3 A.649 + 7,18 A.665 \text{ (mg/L)}$$

Keterangan: A.665 = Absorbansi pada panjang gelombang 665 nm

A.649 = Absorbansi pada panjang gelombang 649 nm

3.5.6.2 Pertumbuhan Vegetatif

Parameter pertumbuhan vegetatif meliputi jumlah akar, tinggi planlet, dan jumlah daun.

A. Tinggi Planlet

Tinggi planlet diukur dari pangkal batang hingga ujung titik tumbuh ketika planlet berumur 50 HST.

B. Jumlah Akar

Jumlah akar dihitung dengan cara dijumlahkan akar yang tumbuh pada tiap planlet berumur 50 HST dan dihitung reratanya pada masing-masing perlakuan.

C. Jumlah Daun

Jumlah daun dihitung dengan cara semua daun yang tumbuh pada masing-masing planlet berumur 50 HST dijumlahkan dan setiap perlakuan dihitung rata-rata. Kriteria daun yang dihitung ialah daun yang telah membuka dengan sempurna.

3.5.7 Penilaian Indeks Sensitivitas Kekeringan (ISK)

Indeks sensitivitas kekeringan (ISK) dihitung dengan rumus (Akbar dkk., 2018):

$$\text{ISK} = (1 - Y_c/Y_o) / (1 - X_c/X_o)$$

Keterangan:

Y_c = rata-rata hasil pengamatan genotipe tertentu pada kondisi cekaman kekeringan

Y_o = rata-rata hasil pengamatan genotipe tertentu pada kondisi optimum

X_c = rata-rata hasil pengamatan dari seluruh genotipe kondisi cekaman kekeringan

X_o = rata-rata hasil pengamatan dari seluruh genotipe kondisi optimum

Tingkat toleransi terhadap cekaman kekeringan menurut Widyastuti dkk. (2016) diklasifikasikan menjadi 3 kriteria, yakni:

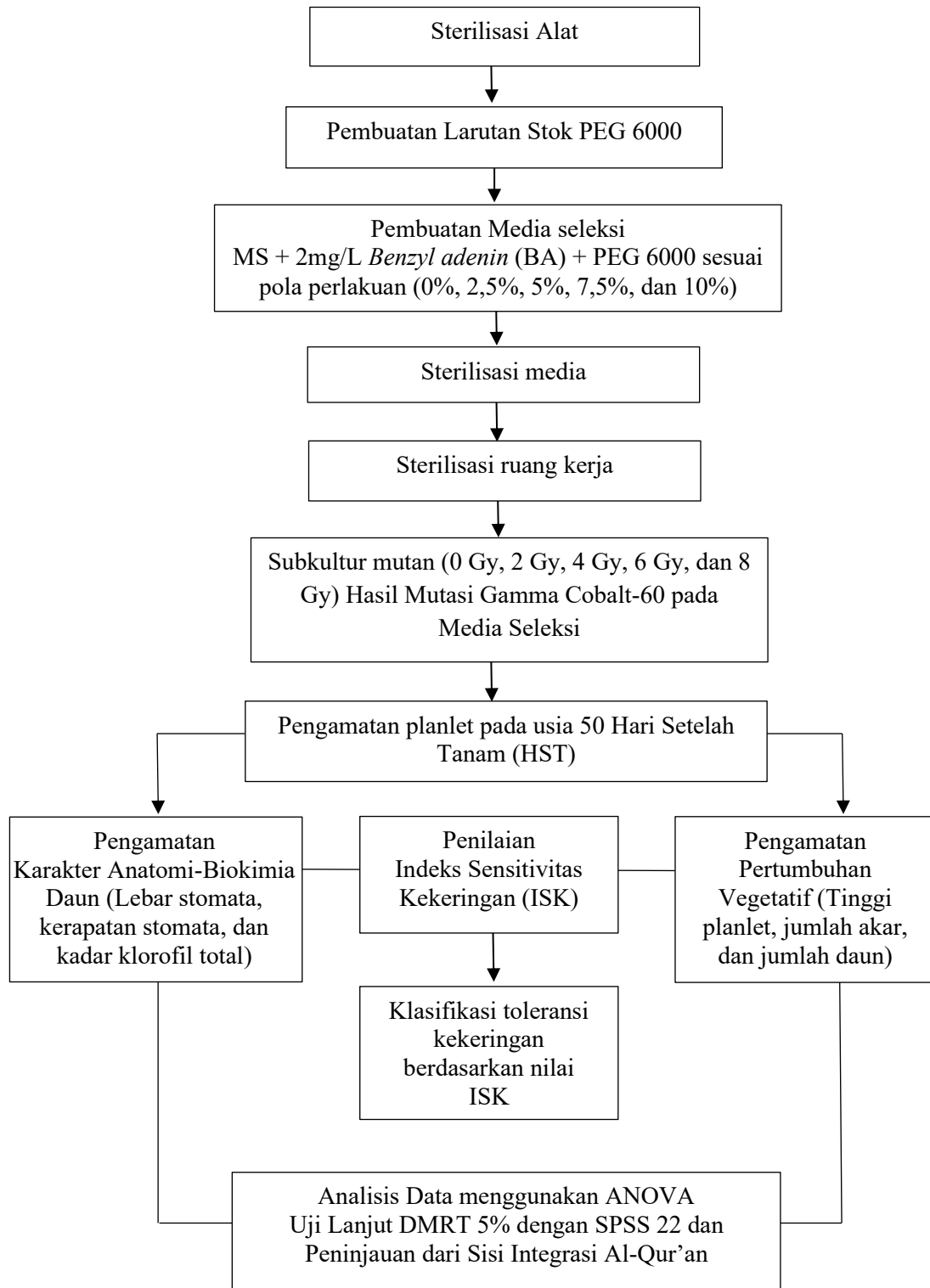
- 1) Toleran ($ISK \leq 0,5$)
- 2) Moderat ($0,5 \leq ISK \leq 1$)
- 3) Sensitif ($ISK > 1$)

3.6 Analisis Data

Hasil pengamatan yang diperoleh dari karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif berupa data kuantitatif meliputi kerapatan stomata, lebar stomata, kadar klorofil total, tinggi planlet, jumlah akar, dan jumlah daun diolah menggunakan ANOVA (*Analysis of Varian*) pada software SPSS 22. Apabila terdapat pengaruh yang nyata dengan nilai signifikansi (p) $< 0,05$ maka akan dilanjutkan dengan uji DMRT (*Duncan Multiple Range Test*) pada taraf 5%. Klasifikasi tingkat toleransi kekeringan dianalisis secara deskriptif berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK).

3.7 Kerangka Operasional

Gambaran alur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Skema Kerangka Operasional

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakter Anatomi-Biokimia Daun pada Mutan Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan Menggunakan PEG 6000 Secara *In Vitro*

Perlakuan kombinasi antara genotipe mutan dan PEG 6000 pada berbagai taraf dosis memberikan pengaruh terhadap karakter anatomi-biokimia daun mutan porang (*Amorphophallus muelleri* B.) yang meliputi lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total.

4.1.1 Lebar Stomata dan Kerapatan Stomata

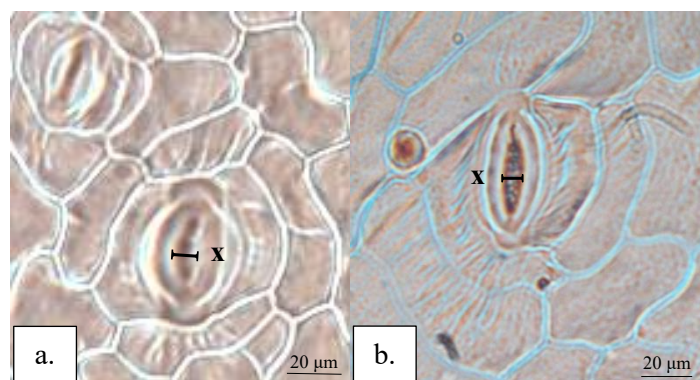
Seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 dengan berbagai konsentrasi memberikan pengaruh yang nyata ($p < 0,05$) terhadap lebar stomata dan kerapatan stomata *Amorphophallus muelleri* B. hasil mutasi gamma cobalt-60. Data yang diperoleh menunjukkan penurunan lebar dan kerapatan stomata pada genotipe mutan yang diaplikasikan PEG. Rerata lebar stomata tertinggi diperoleh dari kelompok kombinasi M3P0, yakni pada genotipe mutan 6 Gy tanpa PEG 6000, sedangkan kelompok kombinasi M4P4 yakni pada genotipe mutan 8 Gy pada media PEG 10% menghasilkan rerata lebar stomata terendah (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Hasil uji DMRT 5% lebar stomata (μm) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	19,608 ^m	17,598 ^{ij}	15,278 ^f	13,730 ^d	10,885 ^a
M1 (2 Gy)	21,363 ^o	18,495 ^l	17,333 ^{hi}	15,229 ^f	12,209 ^b
M2 (4 Gy)	21,906 ^p	21,326 ^o	18,456 ^l	17,758 ^j	13,611 ^d
M3 (6 Gy)	23,039 ^q	20,603 ⁿ	17,224 ^h	15,829 ^g	12,439 ^b
M4 (8 Gy)	18,053 ^k	15,373 ^f	14,665 ^e	12,731 ^c	10,748 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan perbedaan yang tidak nyata berdasarkan DMRT 5%.

Kelompok kombinasi antara genotipe mutan tanpa PEG dengan kelompok genotipe mutan yang diaplikasikan PEG 6000 memiliki perbedaan lebar stomata yang signifikan (Gambar 4.1). Berdasarkan klasifikasi lebar stomata menurut Juairiah (2014), lebar stomata pada kelompok kombinasi kontrol (M0P0) termasuk kategori ‘lebar’ ($19,42 - 38,84\mu\text{m}$) namun kelompok genotipe kontrol yang diaplikasikan pada media PEG mengalami penurunan lebar stomata yang cukup drastis menjadi $<19,42\mu\text{m}$ sehingga termasuk kategori ‘kurang lebar’, begitupun pada genotipe mutan 2 Gy. Genotip mutan 4 Gy dan 6 Gy yang diaplikasikan pada media PEG 6000 pada taraf konsentrasi 2,5% mengalami penurunan lebar stomata yang tidak begitu signifikan dibandingkan kelompok kontrolnya sehingga masih termasuk kategori ‘lebar’ ($19,42 - 38,84\mu\text{m}$). Sedangkan kelompok genotipe mutan 8 Gy, baik pada media kontrol maupun media PEG memiliki rerata lebar stomata kategori ‘kurang lebar’ ($<19,42\mu\text{m}$).

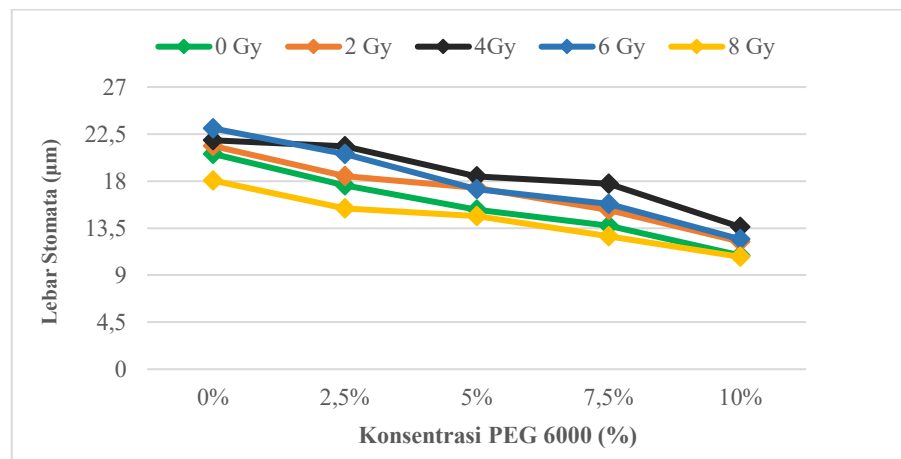


Gambar 4.1 Stomata pada mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 (perbesaran $\times 200$)

(a) Genotipe mutan pada media tanpa PEG, (b) Genotipe mutan pada media PEG, (x) Lebar stomata

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lebar stomata mengalami penurunan seiring dengan peningkatan konsentrasi PEG 6000 (Gambar 4.2). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Ridwan dkk. (2016) yang membuktikan bahwa 6 dari 7

nomor tanaman kentang hitam (*Plectranthus rotundifolius* (Poir.) Spreng.) hasil iradiasi gamma yang telah diuji secara *in vitro* menggunakan PEG mengalami penurunan rerata lebar stomata seiring dengan peningkatan cekaman kekeringan pada kondisi lapang. Kou *et al.* (2013) juga melaporkan bahwa aplikasi PEG pada konsentrasi 5% menghasilkan lebar stomata tertinggi pada daun *Betula pendula* Roth., yakni sebesar $37.56 \pm 0.70 \mu\text{m}$ dan semakin tinggi konsentrasi PEG maka semakin rendah lebar stomata yang diperoleh. Penurunan lebar stomata yang signifikan menjadi strategi tanaman untuk mengurangi laju transpirasi di bawah kondisi stres kekeringan.



Gambar 4.2 Rerata lebar stomata mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

Penurunan lebar stomata yang signifikan terutama pada genotipe kontrol (0 Gy) dan genotipe mutan 8 Gy mengindikasikan bahwa mutasi gamma mempengaruhi karakter anatomi stomata secara positif dalam kondisi stres kekeringan akibat PEG. Penurunan lebar stomata menyebabkan bukaan stomata mengalami penyempitan. Osakabe *et al.* (2014) menjelaskan bahwa kondisi kekeringan menuntut tanaman melakukan penyesuaian osmotik melalui induksi sinyal *abscisic acid* (ABA) untuk menutup stomata sehingga terjadi penyempitan

lebar stomata. Penyesuaian struktural stomata menjadi salah satu bentuk adaptasi tanaman terhadap kondisi kekeringan untuk mengurangi transpirasi.

Ukuran lebar stomata memiliki korelasi yang erat dengan konduktansi stomata sehingga ukuran bukaan stomata juga berkaitan dengan toleransi kekeringan. Ilyas *et al.* (2020) memaparkan bahwa bukaan stomata yang kecil mampu meningkatkan toleransi kekeringan pada tanaman. Hal ini diperkuat oleh penjelasan Takahashi *et al.* (2020), yakni reduksi bukaan stomata menjadi respon fisiologis tercepat terhadap stres osmotik guna mengurangi jumlah uap air yang hilang melalui stomata.

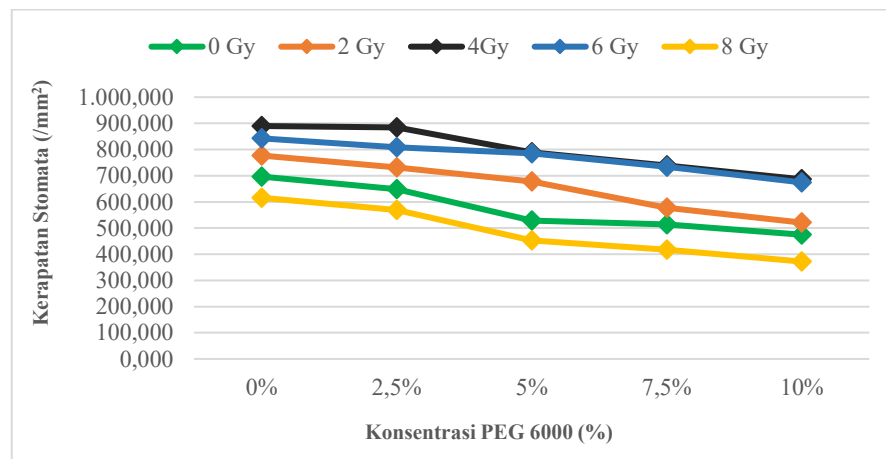
Aplikasi PEG sebagai media selektif selain berpengaruh terhadap lebar stomata juga berpengaruh terhadap kerapatan stomata. Planlet dengan genotipe mutan dan non mutan menunjukkan respon kerapatan stomata yang berbeda terhadap pemberian variasi konsentrasi PEG. Kerapatan stomata tertinggi diperoleh dari kelompok genotipe mutan 4Gy tanpa PEG (M2P0), yakni 889,818 stomata/mm², sedangkan kerapatan stomata paling rendah diperoleh dari kelompok genotipe mutan 8 Gy pada 10% PEG, yakni 372,005 stomata/mm² (Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Hasil uji DMRT 5% kerapatan stomata (/mm²) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	696,547 ⁿ	647,801 ^k	528,503 ^g	513,965 ^e	474,627 ^d
M1 (2 Gy)	776,934 ^q	732,037 ^o	677,305 ^l	577,249 ⁱ	520,807 ^f
M2 (4 Gy)	889,818 ^u	884,260 ^u	789,334 ^r	739,306 ^p	686,285 ^m
M3 (6 Gy)	842,569 ^t	809,003 ^s	785,486 ^r	733,747 ^{op}	674,312 ^l
M4 (8 Gy)	615,732 ^j	568,269 ^h	452,392 ^c	416,902 ^b	372,005 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama menunjukkan perbedaan yang tidak nyata berdasarkan DMRT 5%.

Kerapatan stomata pada kelompok kombinasi antara genotipe mutan 4 Gy dan PEG 2,5% (M2P2) tidak berbeda nyata dengan kombinasi kontrolnya (M2P0) (Tabel 4.2). Penurunan kerapatan stomata yang tidak signifikan mengindikasikan bahwa tanaman memiliki kerapatan stomata yang relatif stabil meskipun berada pada kondisi kekeringan. Caine *et al.* (2019) menyatakan bahwa tanaman yang dapat mempertahankan struktur stomata (baik ukuran maupun kerapatan stomata) saat kondisi tercekam, cenderung memiliki efisiensi penggunaan air dan toleransi kekeringan yang baik. Tanaman yang rentan justru menunjukkan respon ekstrem melalui penutupan stomata dan reduksi ukuran stomata secara signifikan.



Gambar 4.3 Rerata kerapatan stomata mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

Kerapatan stomata pada semua kelompok perlakuan media PEG mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya taraf konsentrasi PEG (Gambar 4.3). Penelitian Kou *et al.* (2013) justru menunjukkan peningkatan kerapatan stomata tanaman *Betula pendula* Roth. pada aplikasi PEG 5%-15%. Hal ini mengindikasikan bahwa tanaman porang lebih mengandalkan mekanisme adaptif terhadap stres kekeringan melalui regulasi bukaan stomata, daripada perubahan jumlah stomata. Lestari (2006) menambahkan bahwa mekanisme toleransi

tanaman terhadap cekaman kekeringan pada umumnya dikendalikan oleh gen yang kompleks dan ekspresi dari masing-masing gen tersebut.

Penurunan kerapatan stomata pada penelitian ini diduga disebabkan oleh karakter genotipe yang masih membawa pengaruh dari mutasi gamma. Insani dkk. (2022) menyebutkan bahwa aplikasi iradiasi sinar gamma dalam pemuliaan tanaman mampu meningkatkan keragaman tanaman dan menghasilkan efek positif pada karakter yang dihasilkan. Penelitian Kusmiyati *et al.* (2018) menunjukkan bahwa kedelai hasil iradiasi gamma memiliki densitas stomata yang lebih rendah daripada kontrol. Hal ini tentu juga akan berdampak positif terhadap proses transpirasi dalam merespon stres kekeringan. Tapia *et al.* (2015) menambahkan bahwa reduksi kerapatan stomata merupakan perubahan struktur karakter xeromorfik daun guna meningkatkan toleransi kekeringan. Hal ini mengindikasikan bahwa mutasi gamma memiliki korelasi positif terhadap respon adaptif tanaman terhadap kekeringan melalui modifikasi stomata.

Kerapatan stomata pada semua kelompok kombinasi genotipe pada berbagai taraf dosis PEG termasuk kategori ‘tinggi’ ($>500/\text{mm}^2$), kecuali kerapatan stomata pada kelompok kombinasi genotipe kontrol (0 Gy) pada 2,5% - 10% PEG yang dikategorikan ‘sedang’ ($300\text{--}500/\text{mm}^2$). Hal ini sesuai dengan klasifikasi kerapatan stomata menurut Karubuy dkk. (2018) yaitu kerapatan rendah ($<300/\text{mm}^2$), kerapatan sedang ($300\text{--}500/\text{mm}^2$), dan kerapatan tinggi ($>500/\text{mm}^2$). Kerapatan stomata yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan tanaman dalam menyeimbangkan kebutuhan fotosintesis dan efisiensi penggunaan air untuk mendukung pertumbuhan secara optimal (Kusumi *et al.*, 2021).

Tingkat kerapatan stomata berkorelasi erat dengan ketahanan terhadap kekeringan. Nurcahyani *et al.* (2024) memaparkan bahwa stomata yang memiliki kerapatan lebih tinggi mengindikasikan tanaman tidak mengalami stres yang berarti akibat kekeringan sehingga tanaman dapat mentoleransi cekaman kekeringan. Apabila kerapatan stomata lebih rendah maka dapat diindikasikan bahwa tanaman bersifat intoleran terhadap kekeringan sehingga mengalami dampak cekaman kekeringan. Lawson & Blatt (2014) mengungkapkan bahwa tanaman yang toleran terhadap kekeringan cenderung memiliki ukuran maupun kerapatan stomata yang stabil dalam kondisi stres ringan hingga moderat.

4.1.2 Kadar Klorofil Total

Aplikasi PEG 6000 secara *in vitro* berpengaruh terhadap kandungan klorofil total pada mutan porang hasil mutasi gamma cobalt-60. Kadar klorofil merupakan indikator penting dari kemampuan tanaman untuk mempertahankan aktivitas fotosintesis dalam kondisi cekaman. Perbedaan yang signifikan diamati antara kombinasi kontrol (tanpa PEG) dan kombinasi yang ditambahkan PEG (Tabel 4.3).

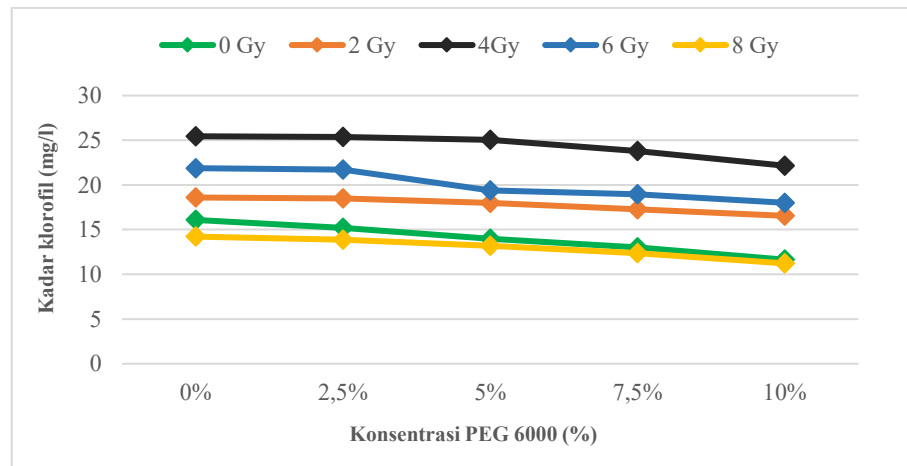
Tabel 4.3 Hasil uji DMRT 5% kadar klorofil total (mg/L) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	16,086 ^j	15,205 ⁱ	13,981 ^g	13,015 ^b	11,646 ^b
M1 (2 Gy)	18,594 ^p	18,172 ^o	17,981 ^m	17,286 ^l	16,544 ^k
M2 (4 Gy)	25,444 ^y	24,936 ^x	23,778 ^w	22,154 ^v	19,820 ^s
M3 (6 Gy)	21,875 ^u	21,091 ^t	19,403 ^r	18,950 ^q	18,005 ⁿ
M4 (8 Gy)	14,220 ^h	13,865 ^f	13,175 ^e	12,381 ^c	11,228 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan DMRT 5%.

Semua kelompok pada media PEG menunjukkan penurunan kadar klorofil total dibandingkan kelompok kontrol (tanpa PEG) (Tabel 4.3). Pola respon kadar klorofil yang menurun diduga dipicu oleh stres oksidatif serta degradasi struktur kloroplas akibat dehidrasi. Tabatskaya *et al.* (2020) menjelaskan bahwa produksi spesies oksigen reaktif (ROS) meningkat secara bertahap menyesuaikan tingkat stres kekeringan. Hal ini dilakukan oleh tanaman sebagai sistem pertahanan antioksidan dalam rangka mentolerir kekeringan (Ahmad *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019). Penurunan kadar klorofil total mengindikasikan penurunan kemampuan fotosintesis yang berimplikasi langsung terhadap pertumbuhan tanaman. Kumar *et al.* (2011) menjelaskan hal yang sama, yakni penurunan kandungan klorofil total menyebabkan reduksi kapasitas tanaman dalam menangkap cahaya sehingga menghambat laju fotosintesis dan berdampak pada penurunan pertumbuhan serta produktivitas tanaman secara keseluruhan. Lourkisti *et al.* (2021) menyebutkan bahwa penurunan laju fotosintesis yang sesuai merupakan respons positif adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan.

Kelompok kombinasi genotipe mutan 4 Gy memiliki rerata kadar klorofil yang lebih tinggi di antara kombinasi genotipe mutan lainnya pada masing-masing konsentrasi PEG (Gambar 4.4). Hal ini mengindikasikan bahwa mutan porang pada paparan 4 gy mampu menjaga integritas kloroplas dan efisiensi fotosintesis sebagai bentuk pertahanan diri dari cekaman kekeringan. Sujinah *et al.* (2016) menyatakan bahwa tanaman merespon cekaman kekeringan melalui berbagai perubahan fisiologi, morfologi, dan anatomi, baik sebagai bentuk mekanisme ketahanan aktif maupun sebagai dampak pasif dari stres kekurangan air.



Gambar 4.4 Rerata kadar klorofil mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

Kadar klorofil tanaman mengalami penurunan di bawah pengaruh stres osmotik akibat aplikasi PEG 6000 dan akan semakin menurun seiring dengan peningkatan konsentrasinya (Gambar 4.4). Hal ini selaras dengan hasil penelitian Nurcahyani *et al.* (2024) yang membuktikan bahwa semakin tinggi konsentrasi PEG 6000 yang diaplikasikan maka kandungan klorofil a, klorofil b, dan total klorofil pada tanaman *Manihot esculenta* Crantz semakin rendah. Sabatini dkk. (2022) menyampaikan bahwa biosintesis klorofil merupakan satu di antara mekanisme fisiologis penting yang terdampak langsung oleh cekaman kekeringan. Defisit air akibat cekaman kekeringan mengakibatkan inhibisi penyerapan unsur hara esensial seperti nitrogen (N) dan magnesium (Mg) sebagai komponen utama pembentukan klorofil.

Perbedaan respon adaptif tanaman dalam mempertahankan kadar klorofil di bawah kondisi kekeringan diduga disebabkan oleh variasi fenotipe “*stay-green*” pada genotipe mutan. Variabilitas somaklonal pada mutan baru mungkin membawa alel yang bersifat toleran terhadap kekeringan sehingga memungkinkan adanya fenotipe “*stay-green*” melalui perlambatan senesens meskipun dalam kondisi stres

kekeringan. Hal ini didukung oleh Jiang *et al.* (2007) yang menjelaskan bahwa mutasi gamma pada gen *Stay Green Rice* (SGR) pada tanaman padi Japonica, secara molekuler menghambat degradasi klorofil dengan mempertahankan struktur tilakoid dan kompleks protein fotosintetik sehingga daun tetap hijau meskipun memasuki fase senescence.

4.2 Pertumbuhan Vegetatif Mutan Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) Hasil Seleksi Toleransi kekeringan Menggunakan PEG 6000 Secara *In Vitro*

Pengukuran parameter pertumbuhan vegetatif (tinggi planlet, jumlah akar, dan jumlah daun) pada mutan porang hasil iradiasi gamma dilakukan untuk mengetahui performa tumbuh dari planlet yang ditumbuhkan pada media MS dengan penambahan PEG 6000 pada berbagai taraf konsentrasi. Semua parameter pertumbuhan vegetatif berkurang secara signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol yang tidak diaplikasikan PEG.

4.2.1 Tinggi Planlet

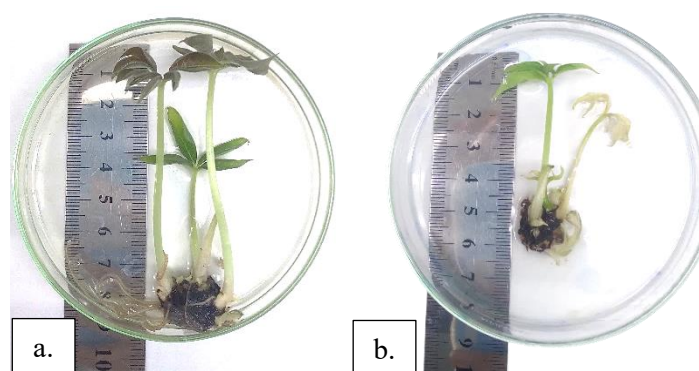
Seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 dengan berbagai konsentrasi memberikan pengaruh yang nyata ($p < 0,05$) terhadap tinggi planlet *Amorphophallus muelleri* B. hasil mutasi gamma cobalt-60. Tinggi tanaman menjadi indikator visual yang mampu menunjukkan tren pertumbuhan tanaman selama masa cekaman secara kualitatif (Harianja dkk., 2021). Rerata tinggi planlet paling tinggi diperoleh dari kelompok genotipe mutan 2 Gy tanpa penambahan PEG (M1P0), sedangkan kelompok genotipe kontrol (0 Gy) pada taraf PEG 10% (M0P4) memiliki rerata tinggi planlet terendah (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Hasil uji DMRT 5% tinggi planlet (cm) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	8,67 ^{hi}	8,20 ^g	7,73 ^{ef}	7,30 ^{de}	5,30 ^a
M1 (2 Gy)	10,67 ^m	10,47 ^m	9,93 ^{kl}	9,20 ^j	7,77 ^f
M2 (4 Gy)	10,37 ^{lm}	10,23 ^{lm}	9,70 ^k	8,73 ^{hi}	7,53 ^{ef}
M3 (6 Gy)	9,23 ^j	8,97 ^{ij}	8,5 ^{gh}	8,33 ^{gh}	7,40 ^{def}
M4 (8 Gy)	7,33 ^{def}	7,00 ^{cd}	6,67 ^{bc}	6,40 ^b	5,53 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan DMRT 5%.

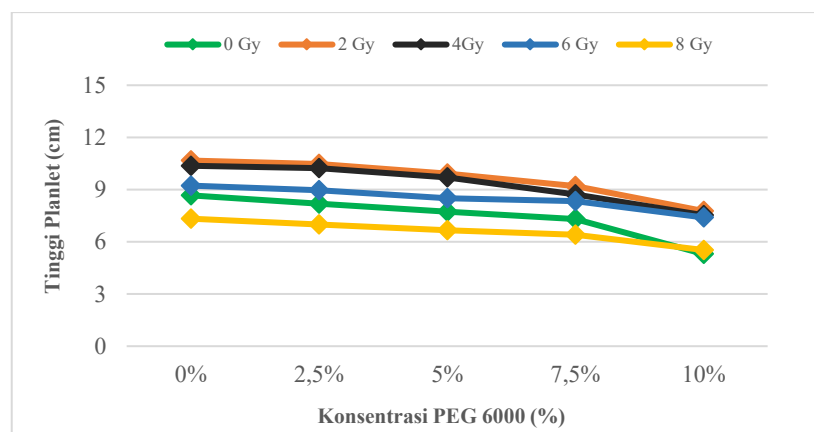
Tinggi planlet kelompok genotipe mutan (2 Gy - 8 Gy) yang diaplikasikan PEG 6000 pada taraf 2,5% (M1P2) tidak berbeda signifikan dengan tinggi planlet kelompok kontrolnya (Tabel 4.4). Perbedaan yang tidak signifikan ini mengindikasikan bahwa tanaman mampu mentolerir cekaman kekeringan, sedangkan penurunan tinggi planlet yang terjadi secara signifikan mengindikasikan tekanan osmotik yang rendah sehingga menghambat elongasi sel. Hal ini diperkuat oleh Kaur & Asthir (2017) yang menyampaikan bahwa potensial air yang lebih rendah membatasi penyerapan air oleh sel sehingga turgor menurun dan mengakibatkan inhibisi pembelahan dan pemanjangan sel.



Gambar 4.5 Tinggi planlet mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 umur 50 HST

(a) Genotipe mutan pada media tanpa PEG, (b) Genotipe mutan pada media PEG

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tinggi planlet pada semua kelompok kombinasi yang diaplikasikan PEG 6000 lebih rendah daripada kelompok kombinasi yang tidak diberi PEG 6000 (Gambar 4.5). Hasil penelitian juga membuktikan bahwa semakin tinggi perlakuan konsentrasi PEG maka tinggi planlet semakin rendah (Gambar 4.6). Piwowarczyk *et al.* (2014) menjelaskan bahwa penambahan PEG pada media menyebabkan penurunan tekanan turgor pada sel tanaman sehingga laju pemanjangan sel menurun yang berdampak pada penurunan tinggi tanaman. Harianja dkk. (2021) menyatakan bahwa lingkungan tanaman tidak menerima suplai air yang cukup saat kondisi kekeringan sehingga tanaman tidak mampu melangsungkan proses pertumbuhan dan produksi secara optimal.



Gambar 4.6 Rerata tinggi planlet mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

Konsentrasi PEG 10% pada genotipe kontrol menunjukkan pertumbuhan tinggi planlet terendah. Hal ini diduga disebabkan oleh akumulasi asam absisat / *absisic acid* (ABA) sebagai hormon stres akibat konsentrasi PEG yang terlalu tinggi. Ridwan dkk. (2016) menjelaskan bahwa ABA menginduksi penurunan konduktansi stomata untuk menghambat transpirasi dalam regulasi penyerapan air dan unsur hara dari media. Hal ini menyebabkan inhibisi pada pertumbuhan tajuk

tanaman sehingga tanaman mengalami kekerdilan. Kekeringan merupakan faktor stres multidimensi yang dapat memengaruhi berbagai aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang melibatkan pembelahan, pemanjangan, dan diferensiasi sel (Salehi-Lizar & Bakhshayashan-Agdam, 2016), termasuk pembelahan sel pada zona apikal yang bersifat meristematik.

Sifat toleransi tanaman terhadap kondisi lingkungan yang kering diduga dipengaruhi oleh asal genotipe hasil mutasi gamma. Ghasemi-Soloklui *et al.* (2025) memaparkan bahwa ionisasi dari gamma mampu mengaktivasi gen dan sinyal pada tanaman yang memprioritaskan mekanisme adaptasi dan kelangsungan hidup sehingga terjadi pengalihan alokasi sumber daya dari proses pertumbuhan vegetatif, seperti pemanjangan sel dan pembelahan meristematik, ke arah mekanisme pertahanan. Genotipe mutan toleran yang menunjukkan respon lebih adaptif dengan mempertahankan tinggi tanaman meskipun berada di bawah tekanan osmotik akibat aplikasi PEG. Ghasemi-Soloklui *et al.* (2025) menyampaikan bahwa tanaman yang tetap memiliki tinggi yang signifikan meskipun dalam kondisi stres menandakan kemampuan tanaman dalam mempertahankan aktivitas meristematik.

4.2.2 Jumlah Akar

Seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 dengan berbagai konsentrasi juga memberikan pengaruh yang nyata ($p < 0,05$) terhadap jumlah akar *Amorphophallus muelleri* B. hasil mutasi gamma cobalt-60. Rerata jumlah akar tertinggi diperoleh dari kelompok genotipe mutan 4 Gy tanpa penambahan PEG (M2P0), sedangkan kelompok genotipe 8 Gy pada taraf PEG 10% (M4P4) memiliki rerata tinggi planlet terendah (Tabel 4.5).

Tabel 4.5 Hasil uji DMRT 5% jumlah akar (satuan) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	11,0 ^{hi}	8,7 ^{fgh}	7,3 ^{defg}	5,3 ^{bcd}	4,3 ^{ab}
M1 (2 Gy)	11,7 ^{kl}	9,7 ^{hij}	9,0 ^{gh}	7,7 ^{efgh}	6,0 ^{bcde}
M2 (4 Gy)	13,0 ^l	11,7 ^{kl}	9,3 ^{ghi}	8,7 ^{fgh}	6,7 ^{cdef}
M3 (6 Gy)	11,3 ^{jkl}	8,3 ^{fgh}	7,3 ^{defg}	6,7 ^{cdef}	5,7 ^{bcde}
M4 (8 Gy)	7,3 ^{defg}	6,0 ^{bcde}	4,7 ^{abc}	4,3 ^{ab}	3,3 ^a

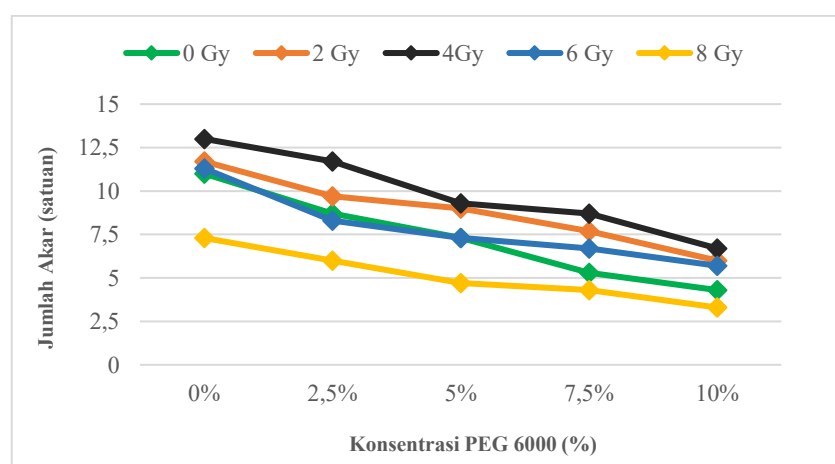
Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan DMRT 5%.

Jumlah akar pada kelompok kombinasi antara genotipe mutan 4 Gy dan PEG 2,5% (M2P2) tidak berbeda nyata dengan kombinasi kontrolnya, sama halnya pada kelompok genotipe mutan 6 Gy (M3P2) dan 8 Gy (M4P2) (Tabel 4.5). Penurunan jumlah akar yang tidak signifikan mengindikasikan bahwa tanaman mampu mentolerir cekaman kekeringan. Esan *et al.* (2023) melaporkan bahwa meskipun terjadi penurunan jumlah akar pada beberapa aksesori kedelai yang diberi perlakuan, kultivar yang toleran mampu mempertahankan jumlah akar yang lebih baik dibandingkan kultivar yang sensitif di bawah kondisi kekeringan 10% PEG 6000. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara genotipe dan konsentrasi PEG yang tepat mampu menginduksi respons adaptif terhadap stres kekeringan.

Genotipe mutan 2 Gy, 4 Gy, dan 6 Gy menunjukkan jumlah akar yang lebih tinggi daripada jumlah akar pada genotipe mutan 8 Gy dan genotipe kontrol. Keragaman fenotipe ini tergantung pada masing - masing genotipe mutan yang masih membawa pengaruh mutasi gamma yang bersifat acak. Chatse *et al.* (2024) menyebutkan bahwa mutasi gamma pada skala kecil (dosis lebih rendah) mampu menghasilkan jumlah akar per tanaman yang lebih tinggi sehingga mampu mendukung pertumbuhan vegetatif yang optimal. Namun, ketika mutasi terjadi

dalam skala besar (dosis lebih tinggi) menyebabkan jumlah akar yang terbentuk lebih sedikit sehingga pertumbuhan kemungkinan dialokasikan ke bagian lain yang lebih efisien. Keduanya menunjukkan bahwa mutasi gamma memiliki dua pola kontribusi positif terhadap adaptasi tanaman terhadap stres kekeringan melalui pembentukan jumlah akar yang bervariasi.

Aplikasi PEG pada taraf konsentrasi yang semakin tinggi pada medium tanam menyebabkan pembentukan akar yang semakin sedikit (Gambar 4.7). Kurniawan dkk. (2023) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi PEG yang diaplikasikan pada empat varietas kedelai menyebabkan pembentukan akar terhambat. Peningkatan konsentrasi PEG menyebabkan tekanan osmotik pada media menjadi tinggi sehingga air sulit diakses oleh tanaman dan berdampak langsung pada keterlambatan pembentukan akar. Hal ini diperkuat oleh Sabatini dkk. (2022) yang menyampaikan bahwa cekaman osmotik akibat penambahan PEG dalam medium kultur *in vitro* dapat menurunkan aktivitas enzim RuBisCO (ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase) sehingga mengurangi efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan, termasuk rasio akar.



Gambar 4.7 Rerata jumlah akar mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

4.2.3 Jumlah Daun

Seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 dengan berbagai konsentrasi memberikan pengaruh yang nyata ($p < 0,05$) terhadap jumlah daun *Amorphophallus muelleri* B. hasil mutasi gamma cobalt-60. Rerata jumlah daun tertinggi diperoleh dari kelompok genotipe mutan 4 Gy tanpa penambahan PEG (M2P0), sedangkan kelompok genotipe kontrol (0 Gy) pada taraf PEG 10% (M0P4) memiliki rerata jumlah daun paling rendah (Tabel 4.6).

Tabel 4.6 Hasil uji DMRT 5% jumlah daun (helai) mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan (PEG 6000) pada 50 HST

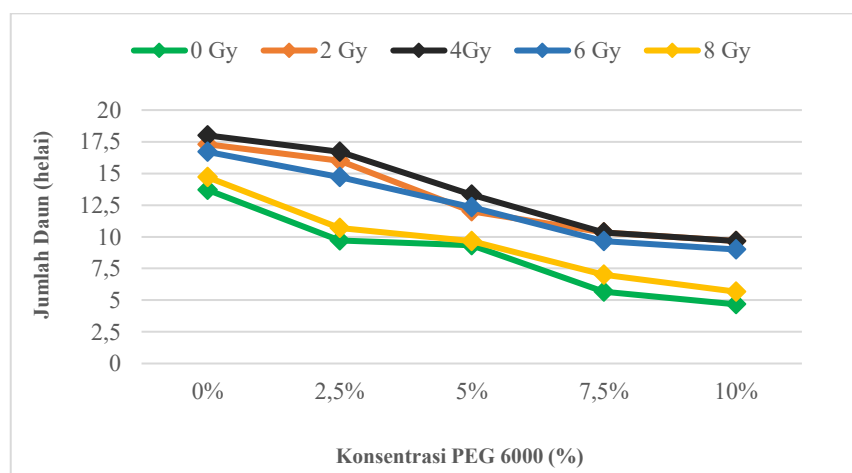
Genotipe Mutan	Konsentrasi PEG 6000				
	P0 (0%)	P1 (2,5%)	P2 (5%)	P3 (7,5%)	P4 (10%)
M0 (0 Gy)	13,7 ^{fgh}	9,7 ^{bcd}	9,3 ^{bcd}	5,7 ^a	4,7 ^a
M1 (2 Gy)	17,3 ^j	16,0 ^{hij}	12 ^{def}	10,3 ^{cde}	9,7 ^{bcd}
M2 (4 Gy)	18,0 ^j	16,7 ^{ij}	13,3 ^{fg}	10,3 ^{cde}	9,7 ^{bcd}
M3 (6 Gy)	16,7 ^{ij}	14,7 ^{ghi}	12,3 ^{efg}	9,7 ^{bcd}	9,0 ^{bc}
M4 (8 Gy)	14,7 ^{ghi}	10,7 ^{cde}	9,7 ^{bcd}	7,0 ^{ab}	5,7 ^a

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan DMRT 5%.

Jumlah daun pada kelompok kombinasi antara genotipe mutan 2-6 Gy pada media PEG 2,5% tidak berbeda signifikan dengan kombinasi kontrolnya (Tabel 4.6). Penurunan jumlah daun yang tidak signifikan mengindikasikan bahwa tanaman mampu mentolerir cekaman kekeringan. Esan *et al.* (2023) membuktikan bahwa jumlah daun pada kultivar kedelai yang toleran terhadap kekeringan mengalami penurunan moderat atau bahkan tetap stabil meskipun diberi perlakuan PEG 6000 dengan konsentrasi 10%. Hal ini menandakan kontribusi positif mutasi gamma terhadap peningkatan respon adaptif genotipe mutan terhadap kondisi yang kurang menguntungkan, seperti cekaman kekeringan. Iradiasi sinar gamma

menghasilkan berbagai keragaman fenotipik sehingga berpotensi meningkatkan pertumbuhan meskipun penyusutan media meningkat akibat aplikasi PEG (Harianja dkk., 2022).

Rerata jumlah daun pada semua kelompok genotipe yang diaplikasikan PEG 6000 mengalami penurunan seiring dengan peningkatan konsentrasi PEG (Gambar 4.8). Bhattacharya (2021) menyampaikan bahwa penurunan tekanan turgor akan menghambat pembelahan dan perluasan sel yang penting untuk pertumbuhan tanaman, termasuk jumlah daun sehingga pembentukan daun baru mengalami pelambatan atau bahkan berhenti sama sekali. Semerci *et al.* (2017) melaporkan bahwa rendahnya tekanan turgor selama stres kekeringan mengakibatkan penurunan pertumbuhan vegetatif yang signifikan pada parameter jumlah daun klon sekitar 50% pada tingkat stres air moderat dibandingkan dengan kontrolnya.

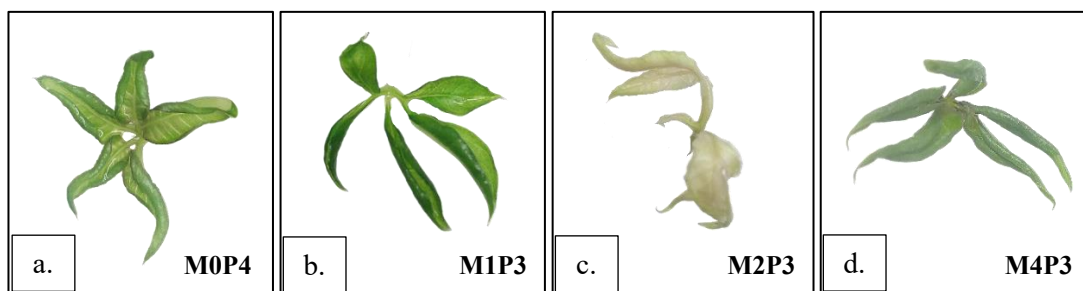


Gambar 4.8 Rerata jumlah daun mutan *Amorphophallus muelleri* B. hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada 50 HST

Reduksi jumlah daun termasuk satu di antara cara tanaman menghemat air selama periode keterbatasan air sehingga laju transpirasi dapat dikurangi. Ketersediaan air yang minim pada lingkungan tanaman ketika dalam kondisi kekeringan menyebabkan tanaman tidak mampu melaksanakan proses

pertumbuhan secara optimal. Harianja dkk. (2021) menyebutkan bahwa cekaman kekeringan menyebabkan kebutuhan suplai air untuk tanaman tidak tercukupi sehingga pertumbuhan dan produktivitas tanaman terhambat.

Respon adaptif tanaman terhadap kekeringan dapat diindikasikan dengan fenomena daun yang menggulung pada beberapa kelompok kombinasi (Gambar 4.9). Hal ini diduga tanaman mengalami kekurangan air cukup drastis akibat aplikasi PEG 6000. Defisit air secara signifikan yang terjadi ketika tanaman tercekam kekeringan menyebabkan tanaman kehilangan tekanan turgor sel sehingga tanaman mengalami kelayuan yang ditandai dengan daun terkulai. Perlikowski dan Kosmala (2020) menyebutkan bahwa penggulungan daun merupakan bentuk adaptasi morfologi dan fisiologi tanaman terhadap cekaman kekeringan. Respon adaptif tersebut dilakukan agar tanaman dapat mempertahankan fisiologis secara normal di bawah tekanan osmotik. Hal ini sependapat dengan Fang dan Xiong (2015) yang menjelaskan bahwa penyesuaian struktur morfologi atau laju pertumbuhan tertentu bertujuan untuk menghindari efek negatif yang diakibatkan oleh cekaman kekeringan.



Gambar 4.9 Penggulungan daun pada kelompok mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 pada berbagai konsentrasi

Perbedaan respon adaptif terhadap kekeringan pada genotipe mutan dipengaruhi oleh keragaman fenotipe hasil mutasi gamma. Hal ini menunjukkan

bahwa mutasi gamma ikut berperan dalam meningkatkan respon adaptif terhadap kekeringan. Dama dkk. (2020) menjelaskan bahwa iradiasi gamma dapat memperluas variasi genetik yang terlihat dari perubahan pada tingkat sel maupun jaringan tanaman. Tanaman tersebut kemudian mengembangkan sejumlah strategi pertahanan yang berbeda-beda terhadap cekaman kekeringan, salah satunya adalah penggulungan daun. Skor penggulungan daun yang semakin kecil menunjukkan semakin tinggi tingkat toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Wening & Untung, 2014).

4.3 Klasifikasi Tingkat Toleransi Kekeringan Mutan Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) Berdasarkan Nilai Indeks Sensitivitas Kekeringan (ISK)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa seluruh parameter karakter anatomi-biokimia daun (lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil) tanaman mengalami penurunan seiring dengan peningkatan konsentrasi PEG 6000 sebagai cekaman kekeringan, meskipun persentase penurunannya berbeda-beda tergantung tingkat ketahanannya terhadap cekaman kekeringan. Hasil pengamatan pertumbuhan vegetatif yang mencakup tinggi plantlet, jumlah akar, dan jumlah daun juga menunjukkan pola yang sama. Hasil penelitian berdasarkan klasifikasi toleransi kekeringan menurut Widyastuti dkk. (2016) memperlihatkan bahwa genotipe porang hasil mutasi gamma cobalt-60 pada paparan 2 Gy, 4 Gy, dan 6 Gy memiliki sifat toleran terhadap kekeringan (2,5%-10% PEG 6000) dalam kategori ‘moderat’, sedangkan genotipe mutan 8 Gy dan genotipe kontrol (0 Gy) termasuk kategori ‘sensitif’ (Tabel 4.7).

Tabel 4.7 Klasifikasi tingkat toleransi mutan *Amorphophallus muelleri* B. terhadap kekeringan (2,5%-10% PEG 6000) berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK)

Genotipe Mutan	Nilai ISK						Rerata	Klasifikasi
	LS	KS	Klo	TP	JA	JD		
M0	1,06	1,34	2,14	1,42	1,17	1,37	1,42	Sensitif
M1	1,08	1,09	0,52	0,87	0,87	0,81	0,87	Moderat
M2	0,65	0,61	0,42	0,84	0,81	0,79	0,69	Moderat
M3	1,13	0,64	1,08	0,85	1,15	0,86	0,95	Moderat
M4	1,10	1,71	1,24	1,11	1,06	1,30	1,25	Sensitif

Keterangan: **M0** (Genotipe kontrol), **M1** (Genotipe mutan 2 Gy), **M2** (Genotipe mutan 4 Gy), **M3** (Genotipe mutan 6 Gy), **M4** (Genotipe mutan 8 Gy), **LS** (Lebar Stomata), **KS** (Kerapatan Stomata), **Klo** (Kadar Klorofil), **TP** (Tinggi Planlet), **JA** (Jumlah Akar), **JD** (Jumlah Daun)

Hasil perhitungan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK) menunjukkan bahwa tanaman porang hasil mutasi gamma cobalt-60 pada paparan 4 Gy adalah tanaman paling toleran terhadap cekaman kekeringan. Genotipe mutan 4 Gy diklasifikasikan dalam kategori ‘moderat’ terhadap kekeringan dengan nilai ISK paling kecil, yakni 0,69 (Tabel 4.7). Genotipe yang toleran terhadap kekeringan akan menunjukkan penurunan yang lebih minim dibanding genotipe yang intoleran. Akbar dkk. (2018) mengungkapkan bahwa nilai ISK yang rendah menunjukkan genotipe yang diuji pada kondisi sub-optimum mengalami penurunan yang minim sehingga genotipe tersebut dikategorikan toleran.

Genotipe mutan yang toleran terhadap kekeringan adalah hasil skrining terarah pada media selektif PEG terhadap variasi genetik baru yang menunjukkan keunggulan genotipe dalam kondisi lingkungan kering. Hal ini sesuai dengan dua kata kunci pada teori seleksi alam Darwin, yaitu seleksi alam (*natural selection*) dan adaptasi (*adaptation*). Ketahanan terbentuk ketika adaptasi berkembang seiring dengan perubahan lingkungan, sehingga apabila adaptasi tidak sejalan dengan perubahan lingkungan maka dapat terjadi kepunahan (Campbell, 2003).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa genotipe mutan 4 Gy adalah kandidat bibit unggul porang yang memiliki karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif paling adaptif pada lahan marginal. Meskipun begitu, penelitian ini masih perlu dikaji lebih lanjut dari aspek produktivitas umbi karena pada dasarnya umbi tanaman porang mengandung glukomanan yang tinggi dan dimanfaatkan secara luas oleh masyarakat di berbagai kebutuhan sektor pangan maupun non pangan.

4.4 Tinjauan Hasil Penelitian dalam Perspektif Al-Qur'an

Air merupakan unsur yang sangat penting bagi keberlangsungan hidup tanaman. Nanda *et al.* (2023) menjelaskan bahwa tanaman sangat bergantung pada air untuk menjalankan proses-proses vital seperti fotosintesis, transpor nutrisi, dan pembentukan jaringan. Begna (2020) menyatakan bahwa kekurangan air akibat kekeringan menyebabkan penurunan potensial air dan tekanan turgor internal hingga ke titik inhibisi metabolisme dan reproduksi tanaman secara normal. Oleh karena itu, tanaman yang mengalami cekaman kekeringan tidak dapat tumbuh secara optimal. Hal ini selaras dengan kalam Allah SWT dalam surah Fussilat ayat 39.

وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْتَ تَرَى الْأَرْضَ خَاشِعَةً فَإِذَا أَنْزَلْنَا عَلَيْهَا الْمَاءَ اهْتَزَّتْ وَرَبَتْ إِنَّ الَّذِي أَحْيَاهَا لَمُخِي الْمَوْتِ إِنَّهُ عَلَى كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ ﴿٣٩﴾

Artinya: “Sebagian dari tanda-tanda (kebesaran)-Nya adalah bahwa engkau melihat bumi kering dan tandus, kemudian apabila Kami menurunkan air (hujan) padanya, ia pun hidup dan menjadi subur. Sesungguhnya Zat yang menghidupkannya pasti dapat menghidupkan yang mati. Sesungguhnya Dia Maha Kuasa atas segala sesuatu.”

Ayat tersebut berdasarkan tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) secara eksplisit mengungkapkan peran penting air dalam menghidupkan dan menyuburkan tanah. Ketika air hujan turun meresap ke dalam tanah, maka unsur-unsur mineral dan komponen abiotik lain dari lapisan tanah yang sebelumnya mati akan larut. Dengan kata lain, air berperan sebagai pelarut sekaligus media transportasi unsur hara sehingga memudahkan pergerakan unsur hara menuju benih dan akar tumbuhan. Air menjadi awal mula proses kehidupan tumbuhan dimulai melalui pembentukan sel-sel dan jaringan yang mendukung pertumbuhan. Fenomena tersebut menginterpretasikan bahwa tanah yang kering tanpa ketersediaan air menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat. Namun, setiap jenis tumbuhan memiliki respons yang berbeda terhadap cekaman kekeringan. Hakim *et al.* (2015) menyatakan bahwa faktor genotipe dapat menyebabkan perbedaan respon tanaman terhadap kondisi lingkungan. Oleh karena itu, pemilihan genotipe tanaman toleran terhadap kekeringan menjadi strategi penting dalam mempertahankan produktivitas tanaman di lahan yang minim air. Pemilihan genotipe yang toleran terhadap kekeringan dapat diupayakan melalui seleksi *in vitro* menggunakan PEG 6000.

Pemuliaan tanaman porang (*Amorphophallus muelleri* B.) melalui seleksi *in vitro* menggunakan PEG 6000 bertujuan untuk menskrining varietas unggul pada tanaman porang hasil mutasi gamma cobalt-60 dengan pertumbuhan dan produktivitas yang stabil meskipun berada pada kondisi kekeringan. Seleksi ini dilakukan berlandaskan firman Allah SWT QS. Yunus [11]: 101 berikut ini:

قُلْ انْظُرُوا مَاذَا فِي السَّمٰوٰتِ وَالْاَرْضِ وَمَا تُغْنِي الْاٰيٰتُ وَالنُّذُرُ عَنْ قَوْمٍ لَا يُؤْمِنُوْنَ ﴿١٠١﴾

Artinya: "Perhatikanlah apa yang ada di langit dan di bumi! Tidaklah bermanfaat tanda kekuasaan Allah dan Rasul - Rasul yang memberi peringatan bagi orang-orang yang tidak beriman." (QS. Yunus [11]: 101).

Tafsir Al-Misbah menurut Shihab (2002) menjelaskan bahwa banyak fenomena alam baik di langit maupun di bumi yang dapat diamati secara rasional. Indikasi beriman dan mengakui bahwa Allah adalah Dzat Yang Maha Kuasa ialah menggunakan akal yang telah Allah karuniakan kepada kita. Ghazali (2003) menjelaskan bahwa akal pikiran merupakan suatu kenikmatan yang dianugerahkan oleh Allah SWT agar manusia senantiasa mempelajari karunia-Nya yang telah dilimpahkan dalam kehidupan ini. Ayat ini secara implisit mendorong manusia untuk senantiasa memperhatikan keagungan Allah SWT dan makna dari tanda-tanda alam yang diamati, termasuk respon adaptif tanaman porang hasil mutasi gamma terhadap kekeringan pada media selektif PEG 6000.

Hasil penelitian mengindikasikan bahwa genotipe mutan dan cekaman kekeringan yang disimulasikan menggunakan PEG secara sinergis memengaruhi struktural tanaman, dengan genotipe toleran dan mutasi spesifik yang mampu mengurangi dampak stres osmotik. Perbedaan karakter morfologi, anatomi, dan fisiologi pada tanaman mutan di bawah pengaruh iradiasi gamma yang bersifat acak dapat memberikan efek positif maupun negatif pada tanaman tersebut (Ali *et al.*, 2015; Insani dkk., 2022). Satu di antara efek positif yang ditimbulkan dari mutasi tersebut ialah respon adaptif terhadap kekeringan.

Mutasi gamma memperbesar variabilitas genetik dengan menciptakan mutan baru, beberapa di antaranya mungkin membawa alel yang toleran terhadap kekeringan. Mutan yang toleran ketika diuji dengan PEG menunjukkan respons pertumbuhan yang lebih baik, sedangkan mutan yang intoleran akan mengalami penurunan secara signifikan. Hal ini sejalan dengan penjelasan Mukhopadhyay & Bhattacharjee (2016), yaitu variabilitas genetik berkontribusi dalam adaptasi dan

evolusi di bawah variasi kondisi lingkungan, termasuk kekeringan. Kontribusi keragaman genetik ini mengindikasikan bahwa adaptasi muncul dari seleksi terhadap genotipe yang memiliki keunggulan relatif dalam kondisi stress kekeringan. Seleksi tersebut merupakan replikasi prinsip seleksi alam Darwin, namun dilakukan secara terkontrol pada kondisi *in vitro* (laboratorium). Dengan demikian, variasi genetik hasil skrining pada penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi positif bagi perkembangan bidang pemuliaaan tanaman porang, terutama pada lahan marginal.

BAB V PENUTUP

5.1 Simpulan

Simpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakter anatomi-biokimia daun pada mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* menunjukkan respon adaptif pada parameter lebar stomata, kerapatan stomata, dan kadar klorofil total.
2. Pertumbuhan vegetatif pada mutan porang hasil seleksi toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* menunjukkan respon adaptif pada parameter tinggi tanaman, jumlah akar, dan jumlah daun.
3. Tingkat toleransi genotip mutan porang terhadap cekaman kekeringan berdasarkan nilai indeks sensitivitas kekeringan (ISK) diklasifikasikan kategori ‘moderat’ pada genotip mutan 2 Gy, 4 Gy, dan 6 Gy, sedangkan genotip kontrol (0 Gy) dan genotip mutan 8 Gy termasuk kategori ‘sensitif’. Aplikasi PEG 6000 pada konsentrasi 2,5% sudah menurunkan karakter anatomi-biokimia daun dan pertumbuhan vegetatif mutan porang pada semua parameter.

5.2 Saran

Seleksi lanjutan terhadap toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000 secara *in vitro* pada mutan porang perlu dilakukan hingga tahap evaluasi produktivitas umbi (khususnya kandungan glukomanan dan kadar kristal kalsium oksalat) untuk memastikan bahwa varietas yang dikembangkan tidak hanya unggul dari segi ketahanan, tetapi juga unggul dari aspek produktivitas umbi guna meningkatkan nilai ekonomisnya sebagai komoditas ekspor.

DAFTAR PUSTAKA

- Abido, W.A.E., Altai, D.S.K., Idan, W.J., Allem, A., Dulái, S., Hadházy, Á., Al-Farhan, I.M.H. & Zsombik, L. 2023. Polyethylene glycol (PEG) induced changes in germination, seedling growth, water relation and α - β Amylase of some Hungarian wheat landraces varieties. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1262 052055. DOI: 10.1088/1755-1315/1262/5/052055
- Afifah E., Nugrahani M.O., & Setiono. 2014. Peluang budidaya iles-iles (*Amorphophallus* spp.) sebagai tanaman sela di perkebunan karet. *Warta Perkaretan*, 33(1):35-46.
- Afifi, MN, Harijati, N., & Mastuti, R. 2019. Karakteristik anatomi meristem apikal tunas (SAM) pada tanaman bulbil porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) di akhir periode dormansi. *J.Eks. Ilmu Hayati*, 9(1): 19–24. DOI: 10.21776/ub.jels.2019.009.01.04.
- Ahmad, S., Kamran, M., Ding, R., Meng, X., Wang, H., Ahmad, I., Fahad, S., & Han, Q. 2019. Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings. *PeerJ*, 7, e7793. DOI: 10.7717/peerj.7793
- Aisah, B.N., A. Soegianto, & N. Basuki. 2017. Identifikasi morfologi dan hubungan kekerabatan tanaman oorang (*Amorphophallus muelleri* Blume) di kabupaten Nganjuk, Madiun, dan Bojonegoro. *Jurnal Produksi Tanaman*, 5(6):1035-1043.
- Akbar, M. R., Purwoko, B. S., Dewi, I. S., & Suwarno, D. W. B. 2018. Penentuan indeks seleksi toleransi kekeringan galur dihaploid padi sawah tadah hujan pada fase perkecambahan. *Indonesian Journal of Agronomy*, 46(2): 133. DOI:10.24831/jai.v46i2.19086
- Alifianto, F., R. Azrianingsih, & B. Rahardi. 2013. Peta persebaran porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) berdasarkan topografi wilayah di Malang Raya. *Jurnal Biotropika*. 1:75–79.
- Al-Mahalli, Jalaluddin, & Jalaluddin As-Suyuthi. 2002. *Tafsir Jalalain*. Terj. Bahrin Abu Bakar. Jakarta: Sinar Baru Algensindo.
- Andreea, T., Cioloca, M., Nicoleta, C., & Bădăraș, C. 2016. Influence of different in vitro simulators for hydric stress for growth and development of potato. *Scientific Bulletin: Series F. Biotechnologies*, 20. ISSN 2285-1364. XX.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. 2011. Morphological, physiological, and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agric. Res.*, 6(9):2026–2032. DOI: 10.5897/AJAR10.027
- Anturida, Z., & Azrianingsih, R. 2015. Pengaruh jarak tanam terhadap pertumbuhan porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) pada fase pertumbuhan kedua. *Jurnal Biotropika*. 3(3):132-136.
- Aryanti, N. & Abidin, K.Y. 2015. Ekstraksi glukomanan dari porang lokal (*Amorphophallus oncophyllus* dan *Amorphophallus muerelli* Blume). *METANA*, 11(1):21-30.
- Baba, M.H., Ul-Haq, M.M., & Khan, A.A. 2013. Dosimetric consistency of Co-60 teletherapy unit-a ten years study. *International Journal of Health Sciences*, 7(1):13-18.
- Badami, K., Amzeri, A. 2010. Seleksi in vitro untuk toleransi terhadap kekeringan

- pada jagung (*Zea mays* L.) dengan polyethylene glycol (PEG). *Agroekoteknologi*, 3(1): 77-86.
- Bal, S.K. & Minhas, P.S. 2017. *Atmospheric stressors: Challenges and coping strategies*. In *Abiotic Stress Management for Resilient Agriculture*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany: 9–50.
- Bangar, P., Chaudhury, A., Tiwari, B., Kumar, S., Kumari, R., & Bhat, K.V. 2019. Morphophysiological and biochemical response of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) varieties at different developmental stages under drought stress. *Turk. J. Biol.*, 43:58–69.
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A., & Pereira, A. 2016. Plant adaptation to drought stress. *Food Research*, 5:1–10. DOI:10.12688/f1000research.7678.1
- Begna, T. 2020. Effects of drought stress on crop production and productivity. *Inter. J. of Res. Studies in Agricultural Sci.*, 6(9): 34-43. DOI: 10.20431/2454-6224.0609005
- Belli, M. & Tabocchini, M.A. 2020. Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17):5993. DOI: 10.3390/ijms21175993
- Bharath, R.A. Prathmesh, S.P., Sarsu, F., & Suprasanna, P. 2024. Induced mutagenesis using gamma rays: Biological features and applications in crop improvement. *OBM Genetics*, 8(2). DOI:10.21926/obm.genet.2402233
- Bhattacharya, A. 2021. *Effect of Soil Water Deficit on Growth and Development of Plants: A Review*. In: *Soil Water Deficit and Physiological Issues in Plants*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-33-6276-5_5
- Caine, R.S., Yin, X., Sloan, J., Harrison, E.L., Mohammed, U., Fulton, T., Biswal, A.K., Dionora, J., Chater, C.C., Coe, R.A., Bandyopadhyay, A., Murchie, E.H., Swarup, R., Quick, W.P., & Gray, J.E. 2019. Rice with reduced stomatal density conserves water and has improved drought tolerance under future climate conditions. *New Phytol.*, 221(1):371-384. DOI: 10.1111/nph.15344.
- Campbell, N.A., Jane B.R., & Lawrence G.M. 2003. *Biologi*. Jakarta: Erlangga.
- Chairiyah, N., Harijati, N., & Mastuti, R. 2023. The relationship of glucomannan, oxalate, and crystal development in porang tuber (*Amorphophallus muelleri* Blume). *J. Exp. Life Sci.* 13(1):1-11.
- Chatse, D.B., Gajbhiye, R.P., Kedar, D.P., Ningot, E.P., & Shende, P.V. 2024. Impact of gamma radiation on bougainvillea varieties root parameters in the vM1 and vM2 generation. *Int. Journal of Advanced Biochemistry Research*. 8(4):521-524. DOI: 10.33545/26174693.2024.v8.i4g.1001
- Chowdhury, J.A., Karim, M.A., Khaliq, Q.A. & Ahmed, A.U. 2017. Effect of drought stress on bio-chemical change and cell membrane stability of soybean genotypes. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 42(3): 475–485.
- Chua, M., Baldwin, T. C., Hocking, T. J., & Chan, K. 2010. Traditional uses and potential health benefits of *Amorphophallus konjac* K. Koch ex N.E.Br. *Journal of ethnopharmacology*, 128(2): 268-278.
- Clapco, S., Tabara, O., Mutu, A., Gisca, I., Port, A., Joita-Pacureanu, M., & Duca, M. 2018. Screening of some sunflower hybrids for drought tolerance under

- laboratory conditions. *Seria Agronomie*, 61(1).
- Clauw, P., Coppens, F., De-Beuf, K., Dhondt, S., Van Daele, T., & Maleux, I.D. 2015. Leaf responses to mild drought stress in natural variants of *Arabidopsis*. *Plant Physiol*, 167:800-816.
- Claeys, H. & Inzé, D. The agony of choice: How plants balance growth and survival under water-limiting conditions. 2013. *Plant Physiology*, 162(4):1768–1779. DOI:10.1104/pp.113.220921
- Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C., Fritschi, F.B., & Mittler, R. 2021. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiol. Plant*, 17: 66-76.
- Collin, F. 2019. Chemical basis of reactive oxygen species reactivity and involvement in neurodegenerative diseases. *Int. J. Mol. Sci.*, 20(10):2407. DOI: 10.3390/ijms20102407.
- Cui, Y., Mao, R., Chen, J. & Guo, Z. 2019. Regulation mechanism of MYC family transcription factors in jasmonic acid signalling pathway on taxol biosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8):1843. DOI:10.3390/ijms20081843
- Dama, H., Aisyah, S. I., Sudarsono, & Dewi, A.K. 2020. Respon kerapatan stomata dan kandungan klorofil padi (*Oryza sativa* L.) mutan terhadap toleransi kekeringan. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 6(1):1-6.
- Datta SK. 2002. Recent developments in transgenic for biotic tolerance in rice. *JIRCAS Working Report*: 43- 53.
- Delfin, E.F., Drobnitch, S.T., & Comas, L.H. 2021. Plant strategies for maximizing growth during water stress and subsequent recovery in *Solanum melongena* L. (eggplant). *PLoS ONE*, 16(9): e0256342. DOI:10.1371/journal.pone.0256342
- Dewi, A.K. & Dwimahyani, I. 2005. Evaluasi keragaman fenotipe galur mutan pisang Barangan (*Maparadisiaca* kultivar Berangan) pada generasi M1V4. *Berita Biologi*, 7(6).
- Dewi, I.P. & Wiendi, N.M.A. 2023. Induksi mutasi kromosom dengan iradiasi sinar gamma Cobalt⁶⁰ untuk merakit padi (*Oryza sativa*) tahan kekeringan secara in vitro. *Bul. Agrohorti*, 11(2): 286-296
- Ehdaie, B., Layne, A. P., & Waines, J. G. 2012. Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat. *Euphytica*, 186: 219–232. DOI: 10.1007/s10681-011-0585-9
- Esan, V.I., Obisesan, I.A., & Ogunbode, T.O. 2023. Root system architecture and physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) seedlings in response to PEG 6000-simulated drought stress. *International Journal of Agronomy*, 9697246:1-13. DOI:10.1155/2023/9697246
- Fang, Y. & Xiong, L. 2015. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cell. Mol. Life Sci.*, 72: 673–689.
- Febrianti, R., Winarno, G.D., Santoso, T., & Kaskoyo, H. 2023. Pengelolaan tumbuhan porang untuk kesejahteraan masyarakat di desa Tegal Yoso. *JOPFE Journal*, 3(2): 35.
- Ghasemi-Soloklui, A.A., Kordrostami, M., & Jafari, M. 2025. Determination of optimal gamma radiation dose for mutation breeding in 'Sabz' fig (*Ficus carica* L.) cuttings based on radiosensitivity and phenotypic changes.

- PLoS One*, 20(1):e0313017. DOI: 10.1371/journal.pone.0313017.
- Ghazali, Imam. 2003. *Memahami Hikmah Penciptaan Makhluk*, Terj. Nur Faizin, Yogyakarta: Mitra Pustaka, 1.
- Gusmalawati, D., Arumingtyas, E.L., Azrianingsih, R. & Mastuti, R. 2019. LC-MS analysis of carbohydrate components in Porang tubers (*Amorphophallus muelleri* Blume) from the second and the third growth period. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 391 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/391/1/012022
- Gusmalawati, D., S. Indriyani, & R. Azrianingsih. 2013. Anatomy and histochemistry of generative organ of *Amorphophallus muelleri*. *Floribunda*. 4(7):175-181.
- Haerunnisa, Hayati, F. & Firmansyah, R. 2023. Potential analysis and mapping of Porang plants in international export markets. *Jurnal Manajemen Bisnis, Akuntansi dan Keuangan*, 2(1):13-26.
- Hafez, E.H. & Seleiman, M.F. 2017. Response of barley quality traits, yield and antioxidant enzymes to water-stress and chemical inducers. *Intern. J. Plant Prod.*, 11: 477–490.
- Hakim, L., Kisman, A. Farid, H. 2015. Skrining beberapa genotipe kacang tanah (*Arachis hypogaea*. L) terhadap cekaman naungan. *Crop. Agro.*, 3(1):1-11.
- Handayani, T., Aziz, Y., & Herlinasari, D. 2020. Pembuatan dan uji mutu tepung umbi porang (*Amorphophallus oncophyllus* Prain) di kecamatan Ngrayun. *MEDFARM: Jurnal Farmasi dan Kesehatan*, 9:13-21. DOI: 10.48191/medfarm.v9i1.27.
- Hapsari, B.W., Martin, A.F., Rudiyanto & Ermayanti, T.M. 2017. Perlakuan polyethylene glycol secara in vitro terhadap pertumbuhan tunas mutan taka untuk seleksi toleran kekeringan. *Prosiding Seminar Nasional 2017 Fakultas Pertanian UMJ*: 262 – 271.
- Harianja, D. N., Karti, P. D. M. H., & Prihantoro, I. 2021. Morfologi mutan alfalfa (*Medicago sativa* L.) hasil iradiasi sinar gamma pada cekaman kering. *Jurnal Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan*, 19(2): 59-65. DOI: 10.29244/jintp.19.2.59-65.
- Harsanti, L. & Yulindar, Y. 2015. Pengaruh iradiasi sinar gamma terhadap pertumbuhan awal tanaman kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) varietas denna 1. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta (ID): Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Hartati, S. Abednego, W.S. Trijono, D.S. 2022. Efek radiasi sinar gamma pada pertumbuhan vegetatif anggrek Vanda hibrid. *Agrotechnology Research Journal*. 6(2):80-86.
- Hermanto, H., Widjanarko, S. B., Suprpto, W., & Suryanto, A. 2019. The design and performance of continuous Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) flour mills. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 9(6): 2021-2027.
- Hidayah, Rudy. 2016. *Budidaya Umbi Porang Secara Intensif*. 10.13140/RG.2.1.3487.9600.
- Hidayat, R., Dewanti, F. D., & Guniarti, G. 2020. Kajian konsentrasi sitokinin dan dosis pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil bulbil tanaman porang (*Amorphophallus onchophyllus* Blume). *Berkala Ilmiah Agroteknologi*:

- Plumula*. 7(1):33–44. DOI: 10.33005/plumula.v7i1.20
- Hidayati, N., Sukanto, L.A., & Juhaeti, T. 2012. Pengujian ketahanan kekeringan pada tanaman garut (*Maranta arundinacea* L.) hasil mutasi dengan radiasi sinar gamma. *Jurnal Biologi Indonesia*, 8(2): 303-315.
- Hosiana, A., Pinatih, G.N.I., & Laksemi, D.A.A.S. 2023. Beneficial health effects of porang (*Amorphophallus muelleri*): A review. *Indonesia Journal of Biomedical Science (IJBS)*, 17(2): 235-238. DOI: 10.15562/ijbs.v17i2.484.
- Hossain, M.A. & Fujita, M. 2010. Evidence for a role of exogenous glycinebetaine and proline in antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems in mung bean seedlings under salt stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 16:19–29.
- Ibrahim, R., Ahmad, Z., Salleh, S., Hassan, A.A., & Ariffin, S. 2018. Mutation breeding in ornamentals. *Ornamental crops*.175-211. DOI: 10.1007/978-3-319-90698-0_8
- Illahi, A.K., Kurniasih, D., Sari, D.A., & Karmaita, Y. 2022. Karakterisasi morfologi pada bibit porang (*Amorphophallus oncophyllus*). *Lumbung*, 21(1):14–23.
- Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N. Hazrat, A., Khan, A.H., Hayat, K., Fahad, S., Khan, A., & Ullah, A. 2020. Drought tolerance strategies in Plants: A mechanistic approach. *J. Plant Growth Regul.*, 40:926–944. DOI: 10.1007/s00344-020-10174-5
- Insani, P.P., Anwar, S., & Karno. 2022. Radiosensitivitas dan pengaruh radiasi sinar gamma terhadap pertumbuhan dan produksi tomat (*Solanum lycopersicum* L.). *Agroeco Science Journal*, 1(1): 11-19.
- Irianto, H., Riptanti, E. & Mujiyo. 2023. A sustainable Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume.) farming model to support export increase: Empirical study in Wonogiri regency, Indonesia. *Applied Ecology & Environmental Research*, 21(4).
- Iqbal, H.M.N., Kyazze, G., & Keshavarz, T. 2013. Advances in the valorization of Lignocellulosic materials by biotechnology: an overview. *Bio Resour*, 8:3157–3176.
- Isnaini, H., Kautsarani, I., & Fikri, S. 2023. Exploring the potential of porang (*Amorphophallus muelleri* B.) as horticultural plants in Bocok Hamlet, Pondokagung Village, Kasembon District, Malang Regency, East Java. *Genbinesia*, 3(1):1-5. DOI:10.55655/genbinesia.v3i1.29
- Jamil M., Nurcahyani E, & Zulkifli Z. 2015. Kandungan klorofil planlet vanili (*Vanilla planifolia* Andrews) hasil seleksi ketahanan terhadap cekaman kekeringan secara in vitro. *Pros.SemNas Pengembangan Teknologi Pertanian*, 68-72.
- Jiang, H., Li, M., Liang, N., Yan, H., Wei, Y., Xu, X., Liu, J., Xu, Z., Chen, F., & Wu, G. 2007. Molecular cloning and function analysis of the stay green gene in rice. *Plant J.*, 52(2):197-209. DOI: 10.1111/j.1365-3113X.2007.03221.x.
- Johannes, E., Magfira, M., & Tuwo, M. 2023. Analisis glukomanan umbi porang (*Amorphophallus Muelleri* Blume.) dari beberapa daerah di Sulawesi Selatan. *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*, 14(2): 1-10.
- Juairiah, L. 2014. Studi karakteristik stomata beberapa jenis tanaman revegetasi di

- lahan pasca penambangan timah di Bangka. *Widyariset*, 17(2):213- 218.
- Karubuy, C.N.S., Rahmadaniarti, A. & Wanggai, J. 2018. Karakteristik stomata dan Kandungan klorofil daun anakan kayu cina (*Sundacarpus amarus* (Blume) C.N.Page) pada beberapa intensitas naungan. *Jurnal Kehutanan Papuasiasia*, 4(1): 45–56.
- Kaur, G. & Asthir, B. 2017. Molecular Responses to Drought Stress in Plants. *Biologia Plantarum*, 61(2): 201–209. DOI: 10.1007/s10535-016-0700-9
- Kementerian Agama. 2012. *Tafsir Ilmi Tumbuhan dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sains*. Jakarta: Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an.
- Kementerian Pertanian. 2021. *Petunjuk Teknis Budidaya Porang*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan dan Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 6.
- Khoiroh, Y., Harijati, N., & Mastuti, M. 2014. Pertumbuhan serta hubungan kerapatan stomata dan berat umbi pada *Amorphophallus muelleri* Blume dan *Amorphophallus variabilis* Blume. *Jurnal Biotropika*, 2(5):249-253.
- Kooyers, N. J. 2015. The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. *Plant Sci.*, 234: 155–162. DOI: 10.1016/j.plantsci.2015. 02.012
- Kou, J., Yan, D., Qin, B., Zhou, Q., Liu, C., & Zhang, L. 2023. Physiological response mechanism of European birch (*Betula pendula* Roth) to PEG-induced drought stress and hydration. *Front. Plant Sci.* 14:1226456. DOI: 10.3389/fpls.2023.1226456
- Kumar RR, KarajoiK, Naik GR. 2011. Effect of polyethylene glycol induced water stress on physiological and biochemical responses in pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millsp.). *Recent Res Sci Technol*, 3(1):148-152.
- Kurniawan, A., Romeida, A., Herawati, R., & Hairani, P.M. 2023. Seleksi in vitro 4 varietas kedelai terhadap toleransi kekeringan menggunakan PEG 6000. *Seminar Nasional Pertanian Pesisir*, 2(1): 130-137.
- Kuromori, T., Mizoi, J., Umezawa, T., Yamaguchi-Shinozaki, K. & Shinozaki, K., 2014. Drought Stress Signaling Network. In: Howell S. (eds) *Molecular Biology. The Plant Sciences*, 2. Springer, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4614-7570-5_7
- Kusmiyati, F., Sutarno, Sas.M.G.A., & Herwibawa, B. 2018. Mutagenic effects of gamma rays on soybean (*Glycine max* L.) germination and seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 102 (1):012059. DOI:10.1088/1755-1315/102/1/012059
- Kusumi, K., Sakata, C., Nakamura, T., Kawasaki, S., & Iba, K. 2021. Stomatal density is a key regulator of photosynthetic capacity and water use efficiency in rice. *Plant Direct*, 5(4), e00315. DOI:10.1002/pld3.315
- Lata, C., Muthamilarasan, M. & Prasad, M. 2015. *Drought stress responses and signal transduction in plants, in Elucidation of Abiotic Stress Signaling in Plants*, ed G. K. Pandey (New York, NY: Springer): 195–225.
- Lawson, T., & Blatt, M.R. 2014. Stomatal size, speed, and responsiveness impact on photosynthesis and water use efficiency. *Plant Physiol.*, 164(4):1556-70. DOI: 10.1104/pp.114.237107

- Lelang, M. A., A. Setiadi, dan Fitria. 2015. Pengaruh iradiasi sinar gamma pada benih terhadap keragaman tanaman jenger ayam (*Celosia cristata* L.). *Jurnal Pertanian Konservasi Lahan Kering*. 1(1):47–50.
- Lestari, E.G. 2006. Mekanisme toleransi dan metode seleksi tumbuhan yang tahan terhadap cekaman kekeringan (Review). *Berita Biologi*, 8(3): 215-222.
- Lestari, N.K.D., Astarini, I.A., & Nurjaya, I.G.M.O. 2012. Pengaruh anatomi stomata daun lili trumpet (*Lilium longiflorum*) setelah pemaparan radiasi sinar X. *Jurnal Metamorfosa*, 1(1):1– 5.
- Lestari. E. G. 2016. *Pemuliaan Tanaman Melalui Induksi Mutasi dan Kultur In Vitro*. Jakarta: IAARD Press.
- Liese, A. and Romeis, T., 2013. Biochemical regulation of in vivo function of plant calcium-dependent protein kinases (CDPK). *Biochimica et Biophysica Acta*, 1833:1582–1589.
- Li, Y., Zhong, G., Meng, F., Yu, H., Liu, D., & Peng, L. 2018. Konjac glucomannan octenyl succinate (KGOS) as an emulsifier for lipophilic bioactive nutrient encapsulation. *J. Sci. Food and Agric*. 98(15):5742-5749.
- Lisdyayanti, N.D., Anwar, S., & Darmawati, A. 2019. Pengaruh iradiasi sinar gamma terhadap induksi kalus dan seleksi tingkat toleransi oadi (*Oryza sativa* L.) terhadap cekaman salinitas secara in-vitro. *Berkala Bioteknologi*, 2(2):67-72.
- López-Galiano, M.J., García-Robles, I., González-Hernández, A.I., Camañes, G., Vicedo, B., Real, M.D., & Rausell, C. 2019. Expression of miR159 is altered in tomato plants undergoing drought stress. *Plants*, 8: 201.
- Lourkisti, R., Oustric, J., Quilichini, Y., Froelicher, Y., Herbette, S., Morillon, R., Berti, L., & Santini, J. 2021. Improved response of triploid citrus varieties to water deficit is related to anatomical and cytological properties. *Plant Physiol. Biochem.*, 162: 762–775. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.03.041
- Luo, C., Luo, S., Chen, Z., Yang, R., He, X., Chu, H., Li, Z., Li, W., & Shi, Y. 2024. Genome-wide analysis of the *Amorphophallus konjac* AkCSLA gene family and its functional characterization in drought tolerance of transgenic arabidopsis. *BMC Plant Biol*. 24:1033. DOI: 10.1186/s12870-024-05747-5
- Luo, L.J. 2010. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. *J. Exp. Bot.*, 61: 3509–3517.
- Mahmood, T., Khalid, S., Abdullah, M., Ahmed, Z., Shah, M. K. N., Ghafoor, A., & Du, X. 2020. Insights into drought stress signaling in plants and the molecular genetic basis of cotton drought tolerance. *Cells*, 9(1): 105. DOI:10.3390/cells9010105
- Martin, P.A., Michelazzo, C., Torres-Ruiz, J.M., Flexas, J., Fernández, J.E., Sebastiani, L., & Diaz-Espejo, A. 2014. Regulation of photosynthesis and stomatal and mesophyll conductance under water stress and recovery in olive trees: correlation with gene expression of carbonic anhydrase and aquaporins. *J Exp Bot*, 65:3143–3156.
- Meher, Shivakrishna, P., Ashok Reddy, K., & Manohar Rao, D. 2018. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2):285–289. DOI:10.1016/j.sjbs.2017.04.008
- Miazeck K. & Ledakowicz S. 2013. Chlorophyll extraction from leaves, needles and

- microalgae: a kinetic approach. *Int. J. Agric. and Biol. Eng.*, 6 (2): 107-115.
- Michel, B.E. & Kaufmann, M.R. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.*, 51(5): 914-6. DOI: 10.1104/pp.51.5.914.
- Mishra, A.K., Wada, Y., & Mann, M.E. 2020. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nat. Commun.*, 11: 1–10.
- Mohite, A.V., & Gurav, R.V. 2019. Induced mutation using gamma rays in okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *Journal of Applied Horticulture*, 21(3):205-208. DOI: 10.37855/jah.2019.v21i03.35
- Mostofa, M.G., Ghosh, A., Li, Z.G., Siddiqui, M.N., Fujita, M., & Tran, L.S.P. 2018. Methylglyoxal—a signaling molecule in plant abiotic stress responses. *Free Radic. Biol. Med.*, 122: 96–109.
- Mukhopadhyay, T. & Bhattacharjee, S. 2016. *Genetic diversity: Importance and measurements*. In: Mir AH, Bhat NA (eds). *Conserving biological diversity: A multiscaled approach*. New Delhi: Research India Publications, 251-295.
- Mutmaidah, S., & Rozi, F. 2015. Peluang peningkatan pendapat masyarakat tepi hutan melalui usahatani porang. *Seminar Hasil Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi UNILA*. Lampung: 709- 716.
- Nadarajah, K. K. 2020. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants. *Int. J. Mol. Sci.* 21 (15), 5208. DOI: 10.3390/ijms21155208
- Nanda, S.S., Surwandono, Nchankou, A.N., Sahide, A., Silatsa, F.B.T., & Temgoua, L.F. 2023. Islam and environmental sustainability: Perspectives and challenges. *Dauliyah: Journal of Islamic and International Affairs*, 8(2): 112-130. DOI:10.21111/dauliyah.v8i2.10524
- Nenko, N.I., Kisleva, G.K., Ulyanovskaya, E.V., Yablonskaya, E.K., & Karavayeva, A.V. 2019. Physio-biochemical criteria for apple tree tolerance to summer abiotic stress. *Agricultural Biology*, 54(1): 158-168.
- Novita & Suwarno, F.C. 2014. Viabilitas benih melon (*Cucumis melo* L.) pada kondisi optimum dan sub-optimum setelah diberi perlakuan invigorasi. *Jurnal Buletin Agrohorti*, 2(1), 59–65.
- Nugrahaeni, N., Hapsari, R.T., Trustinah, Indriani, F.C., Sutrisno, Amanah, A., Yusnawan, E., Mutmaidah, S., Baliadi, Y., & Utomo, J.S. 2021. Morphological characteristics of Madiun 1, the First Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) released cultivar in Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 911. DOI:10.1088/1755-1315/911/1/012011
- Nurcahya, S.B., Mantri, Y.M., & Hatimatunnisan, H. 2022. Analisis potensi porang sebagai pengganti beras untuk ketahanan pangan di kabupaten Pangandaran. *Jurnal Jagaddhita*, 1(1):23.
- Nurcahyani, E., Qudus, H.I., Melta, A.A., Amini, N.A., Irawan, B., Wahyuningsih, S., & Hidayat, D. 2024. Characterization of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) resistant to drought stress as a result of selection using PEG 6000. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 27(2): 111–119. DOI: 10.30574/gscbps.2024.27.2.0160
- Nurlela, Ariesta, N., Laksono, D. S., Santosa, E., & Muhandri, T. 2021. Characterization of glucomannan extracted from fresh porang tubers using

- ethanol technical grade. *Molekul*, 16(1): 1–8. DOI:10.20884/1.jm.2021.16.1.632
- Nurrachmamila, P.L. & Saputro, T.B. 2017. Analisis daya perkecambahan padi (*Oryza sativa* L.) varietas Bahbutong hasil iradiasi. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 6(2):2337–2342. DOI: 10.12962/j23373520.v6i2.23952
- Pasaribu, R, B., Hadi, S., & Hutabarat, S. 2021. Prospek pengembangan agribisnis porang di kota Pekanbaru. *Indonesian Jurnal of Agricultural Economics (IJAE)*, 12(2):210- 219.
- Perlikowski, D. & Kosmala, A. 2020. Mechanisms of drought resistance in introgression forms of *Lolium multiflorum*/*Festuca arundinacea*. *Biol. Plant*, 64: 497–503. DOI:10.32615/bp.2020.076
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Porang Indonesia. 2019. *Budidaya dan Pengembangan Porang (Amorphophallus muelleri Blume) Sebagai Salah Satu Potensi Bahan Baku Lokal: Modul Penyebaran*. Malang: Universitas Brawijaya, 1–19.
- Puspita, D., Christin, E. I., & Palimbong, S. 2022. *Uji Hedonik Formulasi Beras Analog dari Porang (Amorphophallus muelleri) yang Berpotensi sebagai Diet Penderita Diabetes Melitus*. Konser Karya Ilmiah Tingkat Nasional (KKIN) Tahun 2022.
- Oguz, M.C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., & Yildiz, M. 2022. Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical, and physiological responses in important development stages. *Physiologia*, 2:180–197. DOI:10.3390/physiologia2040015
- Osakabe Y, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K, Tran L- SP. 2014. ABA control of plant macroelement membrane transport systems in response to water deficit and high salinity. *New Phytol*, 202:35-49. DOI: 10.1111/nph.12613
- Panda, R.K., Pandit, E., Swain, A., Mohanty, D., Baig, M.J., Kar, M., & Pradhan, S.K. 2016. Response of physiological and biochemical parameters in deeper rooting rice genotypes under irrigated and water stress conditions. *ORYZA: Int. J. Rice*, 53: 422–427
- Piwowarczyk, B., Kamińska, I., & Rybiński, W. 2014. Influence of PEG generated osmotic stress on shoot regeneration and some biochemical parameters in *Lathyrus* culture. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 50(2): 77-83.
- Purwito, A., Ravenska, N., & Maharijaya, A. 2016. Plantr of gamma Ray Irradiated callus of sugarcane on the medium with PEG 6000. *J. Agron. Indonesia*, 44(3): 322-328.
- Ridwan, Handayani, T., & Witjaksono. 2016. Uji toleransi tanaman kentang hitam (*Plectranthus rotundifolius* (Poir.) Spreng.) hasil radiasi sinar gamma terhadap cekaman kekeringan. *Jurnal Biologi Indonesia*, 12(1): 41-48.
- Rini, D., Budiarjo, B. Gunawan, I., Agung, R., & Munazar, R. 2020. Mekanisme respon tanaman terhadap cekaman kekeringan. *Berita Biologi*, 19. DOI:10.14203/beritabiologi.v19i3B.4025.
- Rosawanti, P., Ghulamahdi, M., & Khumaida, N. 2016. Respon anatomi dan fisiologi akar kedelai terhadap cekaman kekeringan. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 43(3): 186-192. DOI:10.24831/jai.v43i3.11243
- Rutger, J.N. & Mackill, D.J. 2001. Application of mendelian genetics in rice

- breeding. In: GS Khush, DS Brarand Hardy (Eds.). *Rice Genetic*, 27-38. IRRI, Manila.
- Sabatini, A.P., Nurcahyani, E., Yulianty, & Agustrina, R. 2022. Respon planlet anggrek *Cattleya* sp. hasil seleksi *in vitro* terhadap cekaman kekeringan dengan polietilen glikol (PEG) 6000. *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 6(2):61-67.
- Sahputra, R. 2023. Analisis kandungan natrium (Na) pada tanaman porang (*Amorphophallus oncophyllus*). *Jurnal Pembelajaran IPA dan Aplikasinya (QUANTUM)*. 3(1): 1-8.
- Saleh, N. Rahayuningsih, A, Radjit, B.S., Harnowo, D. 2015. *Tanaman Porang: Pengenalan, Budidaya, dan pemanfaatannya*. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan Badan Penelitian dan pengembangan Pertanian.
- Salehi-Lizar, S.Y. & Bakhshayeshan-Agdam, H. 2016. *Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance*. Hossain MA, Wani SH, Bhattacharjee S, Burritt DJ, Tran LP (eds) Drought stress tolerance in plants vol 1. Springer, Switzerland:1-16.
- Santosa, E., Lontoh, A., Kurniawati, A., Sari, M., & N. Sugiyama. 2016. Flower development and its implication for seed production on *Amorphophallus muelleri* Blume (Araceae). *J. Hort. Indonesia*, 7(2):65-74.
- Santosa, E., Sugiyama, N., Kurniawati, A., Lontoh, A, Sari, M., & Krisantini, K. 2018. Variation in floral morphology of agamosporous (*Amorphophallus muelleri* Blume) of natural and gibberellin flowerings. *Journal of Applied Horticulture*, 20:15-29.
- Sari, R. & Suhartati. 2015. Tumbuhan porang: Prospek budidaya sebagai salah satu sistem agroforestry. *Info Teknis Eboni*, 12(2): 97-110.
- Sari, Ni-M.P., Sutapa, G.N., & Gunawan, A.A.N. 2020. Pemanfaatan radiasi gamma Co-60 untuk pemuliaan tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.) dengan metode mutagen fisik. *Buletin Fisika*, 21(2): 48.
- Savitri, E.S. 2010. Pengujian *in vitro* beberapa varietas kedelai (*Glycine max* L. Merr) toleran kekeringan menggunakan *Polyethylene glycol* (PEG) 6000 pada media padat dan cair. *El-Hayah*, 1(2): 9-13.
- Semerci, A., Çiçek, N., Karahan, F.A., Özyürek, E., Ka,sko Arici, Y. & Ekmekçi, Y. 2017. Some growth and chlorophyll fluorescence parameters of black and hybrid poplar clones under water stress. *Turk. J. Agric. For.*, 41, 348–356.
- Serrano-Fuentes, María Karen, Fernando Carlos Gómez-Merino, Serafin Cruz-Izquierdo, José Luis Spinoso-Castillo, & Jericó Jabín Bello-Bello. 2022. Gamma radiation (^{60}Co) induces mutation during *in vitro* multiplication of vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews). *Horticulturae*, 8(6):503.DOI:10.3390/horticulturae8060503.
- Shekafandeh, A. & Hojati, S. 2012. *In vitro* drought effects on morphological and physiological indices of two fig (*Ficus carica* L.) cultivars. *Adv. Hort. Sci.*, 26(3-4): 131-137.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Membumikan Al-Qur'an, Fungsi dan Peran Wahyu dalam Kehidupan Manusia*. Bandung: Mizan.
- Shavrukov, Y., Kurishbayev, A., Jatayev, S., Shvidchenko, V., Zotova, L., Koekemoer, F., de Groot, S., Soole, K. & Langridge, P. 2017. Early

- flowering as a drought escape mechanism in plants: How can it aid wheat production? *Frontiers in Plant Science*, 8: 1950. doi: 10.3389/fpls.2017.01950
- Sinaga, E., Rahayu, M.S., & Maharijaya, A. 2015. Seleksi toleransi kekeringan in vitro terhadap enam belas aksesori tanaman terung (*Solanum melongena* L.) dengan polietilen glikol (PEG). *J. Hort. Indonesia*, 6(1): 20-28.
- Singh, A., Kumar, A., Yadav, S., & Singh, I.K. 2019. Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. *Plant Gene*, 18: 100-173. DOI: 10.1016/j.plgene.2019.100173
- Siswanto, B. & Karamina, H. 2016. Persyaratan lahan tanaman porang (*Amorphophallus ancophillus*). *Buana Sains*, 16(1):57-70.
- Soemarwoto. 2005. Iles-iles (*Amorphophallus muelleri* Blume), Description and other properties. *Journal of Biodiversity*, 6(3):180-190.
- Sofia, W.N. 2021. Interpretasi Imam Al-Maraghi dan Ibnu Katsir terhadap QS. Ali Imran ayat 190-191. *Tafkir: Interdisciplinary Journal of Islamic Education*, 2(1,): 41-57. DOI:10.31538/tijie.v2i1.16
- Srivastava, D., Gayatri, M.C., & Sarangi, S.K. 2018. In vitro mutagenesis and characterization of mutants through morphological and genetic analysis in orchid *Aerides crispa* Lindl. *Indian J. Exp. Biol.*, 56(6):385–394.
- Sujinah A & Jamil. 2016. Mekanisme respon tanaman padi terhadap cekaman kekeringan dan varietas toleran. *Iptek Tanaman Pangan*, 11(1):1-8.
- Sultan, B., Defrance, D., & Iizumi, T. 2019. Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Sci. Rep.*, 9: 1–15.
- Suprasanna, P., & Nakagawa H. 2013. *Mutation breeding of vegetatively propagated crops*. In: Shu, Forster BP, Nakagawa H. editor. *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2012; Rome, Italy, Austria (AT): FAO/IAEA:347-358
- Supriyati, Yati. 2016. Keanekaragaman iles-iles (*Amorphophallus* spp.) dan potensinya untuk industri pangan fungsional, kosmetik, dan bioetanol. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 35(69). 10.21082/jp3.v35n2.2016.p69-80.
- Susanto E. 2020. *Pengembangan Talas dan Iles-Iles: Komoditas Lokal Mendukung Ekspor*. In: Webinar Departemen Agronomi dan Hortikultura Fakultas Pertanian. Institut Pertanian Bogor Seri-02 Bogor, 11 Juni 2020.
- Susilawati, Made. 2015. *Perancangan Percobaan*. Jurusan Matematika Fakultas MIPA Universitas Udayana. Bali.
- Suskha, A., Rusydi, A.M., Wusqa, U. 2020. Manfaat air bagi tumbuhan: Perspektif Al-Qur'an dan sains. *Al-Quds: Jurnal Studi Al-Qur'an dan Hadis*, 4(2):2580-3190 (e). DOI: 10.29240/alquds.v4i2.1638
- Syauqi, A.H., & Amzeri, A. 2023. Seleksi tanaman jagung toleran pada cekaman kekeringan. *REKAYASA: Journal of Science and Technology*, 16(1):113-124.
- Tabatskaya, T. M., Mashkina, O. S., & Korchagin, O. M. 2020. In vitro modelling of salinity stress for the selection of stress-tolerant birch lines. *E3S Web of Conferences: EDP Sci.* 224, 04013. DOI: 10.1051/e3sconf/202022404013
- Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki,

- K. 2020. Drought Stress Responses and Resistance in Plants: From Cellular Responses to Long Distance Intercellular Communication. *Front. Plant Sci.*, 11:556972. DOI: 10.3389/fpls.2020.556972
- Tapia, G., Mendez, J., & Inostroza, L. 2015. Different combinations of morpho-physiological traits are responsible for tolerance to drought in wild tomatoes *Solanum chilense* and *Solanum peruvianum*. *Plant Biology*, 18: 406-416. DOI:10.1111/plb.12409
- Touchette, B.W., Iannaccone, L.R., Turner, G.E., *et al.* 2007. Drought tolerance versus drought avoidance: A comparison of plant-water relations in herbaceous wetland plants subjected to water withdrawal and repletion. *Wetlands*, 27: 656–667. DOI: 10.1672/0277-5212(2007)27[656:DTVDAA]2.0.CO;2
- Tuberosa, R. 2012. Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Front. Physiol.* 3:347. DOI: 10.3389/fphys.2012.00347
- Udarno, L., 2020. Porang (*Amorphophallus muelleri*) dan cara budidaya. *War. Balittri*, 26:1–6.
- Ullah, A., Mushtaq, H., Fahad, S., Shah, A., & Chaudhary, H.J. 2017. Plant growth promoting potential of bacterial endophytes in novel association with *Olea ferruginea* and *Withania coagulans*. *Microbiology*, 86:119–127.
- Urban, J., Ingwers, M., McGuire, M.A., & Teskey, R.O. 2017. Stomatal conductance increases with rising temperature. *Plant Signal Behav.* 12:e1356534.
- Wang, X., Liu, H., Yu, F., Hu, B., Jia, Y., Sha, H., *et al.* 2019. Differential activity of the antioxidant defence system and alterations in the accumulation of osmolyte and reactive oxygen species under drought stress and recovery in rice (*Oryza sativa* L.) tillering. *Sci. Rep.* 9(1): 8543. DOI: 10.1038/s41598-019-44958-x
- Wang, Z., Li, G., Sun, H., Ma, Li, Guo, Y., Zhao, Z., Gao, H., & Mei, L. 2018. Effects of drought stress on photosynthesis and photosynthetic electron transport chain in young apple tree leaves. *Biology Open*. 7. bio.035279. DOI: 10.1242/bio.035279.
- Wardani, R.K. & Handrianto, P. 2019. *Reduksi Kalsium Oksalat pada Umbi Porang Dengan Larutan asam*. Gresik: Graniti.
- Wenande, E. & Garvey, L.H. 2016. Immediate-type hypersensitivity to polyethylene glycols: a review. *Clinical & Experimental Allergy*, 46: 907–922.
- Wening, R.H., & Untung, S. 2014. Skrining plasma nutfah padi terhadap cekaman kekeringan. *Widyariset*, 17(2): 193-204.
- Widari, N. S., & Rasmito, A. 2018. Penurunan kadar kalsium oksalat pada umbi porang (*Amorphopallus oncophillus*) dengan proses pemanasan di dalam larutan NaCl. *Jurnal Teknik Kimia*, 13(1), 1–4. DOI: 10.33005/tekkim.v13i1.1144
- Widyasari, R. 2021. Pelatihan teknologi pengolahan es krim dengan penstabil porang di desa Gumantar kecamatan Kayangan kabupaten Lombok Utara. *Jurnal Abdi Mas TPB*, 3(1):49-54.
- Widyastuti, Y., Purwoko, B. S., & Yunus, D. M. 2016. Identifikasi toleransi kekeringan tetua padi hibrida pada fase perkecambahan menggunakan polietilen glikol (PEG) 6000. *Indonesian Journal of Agronomy*, 44(3), 235.

DOI:10.24831/jai.v44i3.13784

- Wigoeno, Y.A., Azrianingsih, R., & Roosdiana, A. 2013. Analisis kadar glukomanan pada umbi porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) menggunakan refluks kondensor. *J. Biotropika*, 1:231–235.
- Yang, H., Huntingford, C., Wiltshire, A., Sitch, S., & Mercado, L. 2019. Compensatory climate effects link trends in global runoff to rising atmospheric CO₂ concentration. *Environ. Res. Lett.*, 14, 124075.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. 2021. Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3): 50. DOI: 10.3390/horticulturae7030050
- Yin, J., Gentine, P., Zhou, S., Sullivan, S.C., Wang, R., Zhang, Y., & Guo, S. 2018. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nat. Commun.*, 9: 1–10.
- Yunita, R., Dewi, I.S., Lestari, E.G., Purnamaningsih, R., Rahayu, S., & Mastur, M. 2020. Formation of upland rice drought-tolerant mutants by mutation induction and in vitro selection. *Biodiversitas*, 21(4): 1476-1482. DOI: 10.13057/biodiv/d210427
- Yusnita, Y. 2015. *Kultur Jaringan Tanaman Sebagai Teknik Penting Bioteknologi Untuk Menunjang Pembangunan Pertanian*. Lampung: Aura Publishing.
- Yuzammi. 2014. Conservation status of *Amorphophallus discophorus* Backer & Alderw. (Araceae) in Java, Indonesia. *Reinwardtia*, 14(1): 27–33.
- Yuzammi, Kurniawan, A., Asih, N.P.S., Erlinawati, I., & Hetterscheid, W. 2017. *The Amorphophallus of Indonesia*. Bogor: Center for Conservation Botanic Gardens Indonesia Institute of Sciences, 120-124.
- Zaini, Nurul Saadah Mohammad. 2022. Kajian tematik konsep makanan berasaskan tumbuhan dalam ayat 99 surah Al-An'am berdasarkan kitab Tafsir Mafatihul Ghayb. *Journal of Ma'alim al-Quran wa al-Sunnah*, 18(2):176-190. DOI: 10.33102/jmq.v18i2.384
- Zaka, R., Chenal, C., & Misset, M. T. 2004. Effects of low doses of short-term gamma irradiation on growth and development through two generations of *Pisum sativum*. *Sci. Total Environ.*, 320(2–3):121–129. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2003.08.010.
- Zanzibar, M., Megawati, Pujiastuti, E., & Sudrajat, D.J. 2015. Iradiasi sinar gamma (⁶⁰Co) untuk meningkatkan perkecambahan dan pertumbuhan bibit tembesu (*Fragrea fragrans* Roxb.). *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 12(3):165-174.
- Zhao, J., Zhang, D., Jianping, Z., Srzednicki, G., Borompichaichartkul, C., & Kanlayanarat, S. 2010. Morphological and growth characteristics of *Amorphophallus muelleri* Blume – a commercially important *Konjac* series. *Acta Hort.*, 875: 501-508.
- Zhao, X.Y., Qi, C.H., Jiang, H., You, C.X., Guan, Q.M., Ma, F.W., Li, Y.Y. & Hao, Y.J. 2019. The MdWRKY31 transcription factor binds to the MdRAV1 promoter to mediate ABA sensitivity. *Horticulture Research*, 6(66). DOI: 10.1038/s41438-019-0147-1
- Zheng, C., Bochmann, H., Liu, Z., Kant, J., Schrey, S.D., Wojciechowski, T., & Postma, J.A. 2023. Plant root plasticity during drought and recovery: What do we know and where to go? *Front. Plant Sci.* 14:1084355. DOI: 10.3389/fpls.2023.1084355

Zhou, Y., He, R., Guo, Y., Liu, K., Huang, G., Peng, C., Liu, Y., Zhang, M., Li, Z., & Duan, L.A. 2019. A novel ABA functional analogue B2 enhances drought tolerance in wheat. *Scientific Reports*, 9:2887
DOI:10.1038/s41598-019-39013-8

LAMPIRAN

1. Konversi Konsentrasi PEG 6000 ke Potensial Osmotik (ψ_s)

Rumus menurut Michel & Kaufmann (1973):

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot C - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot C^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot C \cdot T + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot C^2 \cdot T$$

Keterangan:

ψ_s = Potensial osmotik (MPa)

C = Konsentrasi PEG 6000 (%)

T = Suhu ($^{\circ}\text{C}$), dalam penelitian ini **T = 20 $^{\circ}\text{C}$**

Nilai potensial osmotik pada masing – masing perlakuan konsentrasi PEG 6000 adalah sebagai berikut:

A. Media Kontrol (PEG 0%)

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot 0 - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot 0^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot 0 \cdot 20 + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot 0^2 \cdot 20$$

$$\psi_s = 0 \text{ bar} = 0 \text{ MPa}$$

B. Media PEG 2,5%

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot 2,5 - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot 2,5^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot 2,5 \cdot 20 + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot 2,5^2 \cdot 20$$

$$\psi_s = -0,24 \text{ bar} = -0,024 \text{ MPa}$$

C. Media PEG 5%

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot 5 - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot 5^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot 5 \cdot 20 + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot 5^2 \cdot 20$$

$$\psi_s = -0,50 \text{ bar} = -0,050 \text{ MPa}$$

D. Media PEG 7,5%

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot 7,5 - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot 7,5^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot 7,5 \cdot 20 + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot 7,5^2 \cdot 20$$

$$\psi_s = -0,89 \text{ bar} = -0,089 \text{ MPa}$$

E. Media PEG 10%

$$\psi_s = -(1,18 \times 10^{-2}) \cdot 10 - (1,18 \times 10^{-4}) \cdot 10^2 + (2,67 \times 10^{-4}) \cdot 10 \cdot 20 + (8,39 \times 10^{-7}) \cdot 10^2 \cdot 20$$

$$\psi_s = -1,40 \text{ bar} = -0,140 \text{ MPa}$$

2. Pengenceran Larutan Stok PEG Untuk Pembuatan Media Seleksi

Media agar 1L untuk 5 konsentrasi perlakuan (0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%)



$$V_2 = 1000\text{ml}/5 = 200\text{ml}$$

Rumus pengenceran: $C_1V_1 = C_2V_2$

Keterangan: C_1 = Konsentrasi larutan stok PEG (%)

V_1 = Volume larutan stok yang harus ditambahkan (ml)

C_2 = Konsentrasi akhir PEG dalam media *Murashige and Skoog* (%)

V_2 = Volume total pada media akhir (ml)

Volume larutan stok PEG yang harus ditambahkan pada masing – masing perlakuan adalah sebagai berikut:

A. Media kontrol (PEG 0%)

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$100\% \cdot V_1 = 0\% \cdot 200\text{ml}$$

$$V_1 = 0 \text{ ml}$$

D. Media PEG 7,5%

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$100\% \cdot V_1 = 7,5\% \cdot 200\text{ml}$$

$$V_1 = 15 \text{ ml}$$

B. Media PEG 2,5%

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$100\% \cdot V_1 = 2,5\% \cdot 200\text{ml}$$

$$V_1 = 5 \text{ ml}$$

E. Media PEG 10%

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$100\% \cdot V_1 = 10\% \cdot 200\text{ml}$$

$$V_1 = 20 \text{ ml}$$

C. Media PEG 5%

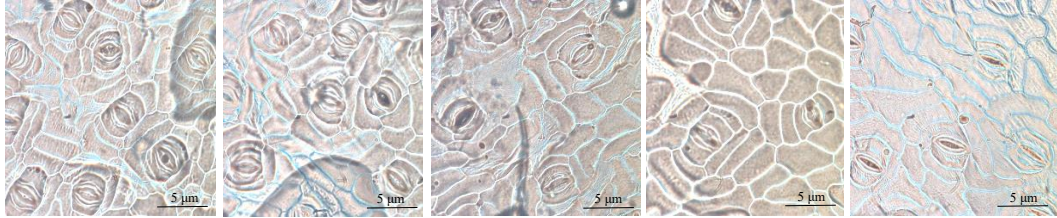
$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$100\% \cdot V_1 = 5\% \cdot 200\text{ml}$$

$$V_1 = 10 \text{ ml}$$

3. Anatomi Stomata Mutan Porang Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan Menggunakan PEG 6000 Secara *In Vitro*

A. Genotip Kontrol (0 Gy)



M0P0

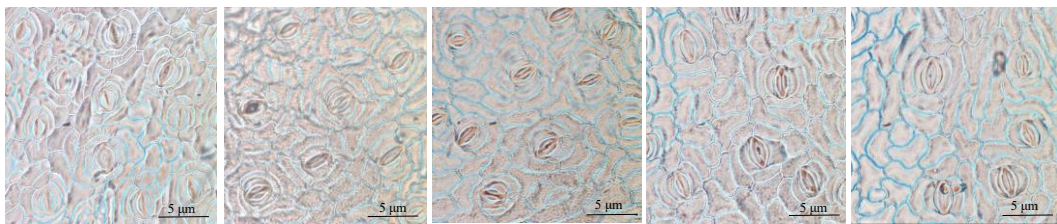
M0P1

M0P2

M0P3

M0P4

B. Genotip Mutan 2 Gy



M1P0

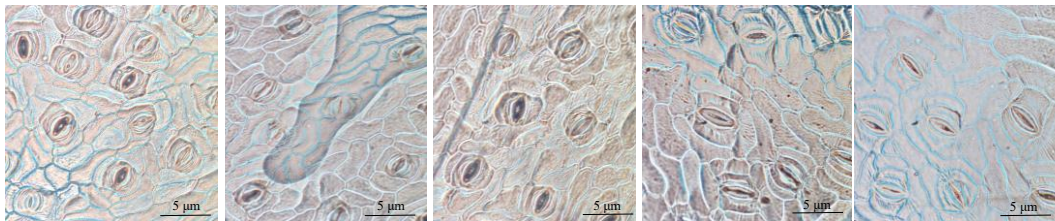
M1P1

M1P2

M1P3

M1P4

C. Genotip Mutan 4 Gy



M2P0

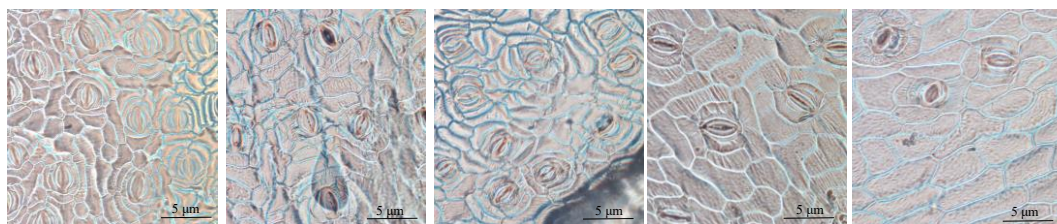
M2P1

M2P2

M2P3

M2P4

D. Genotip Mutan 6 Gy



M3P0

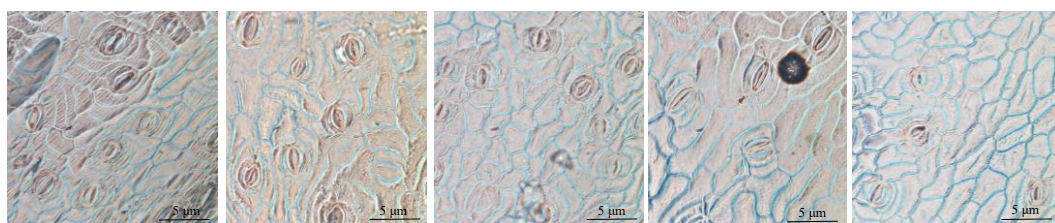
M3P1

M3P2

M3P3

M3P4

E. Genotip Mutan 8 Gy



M4P0

M4P1

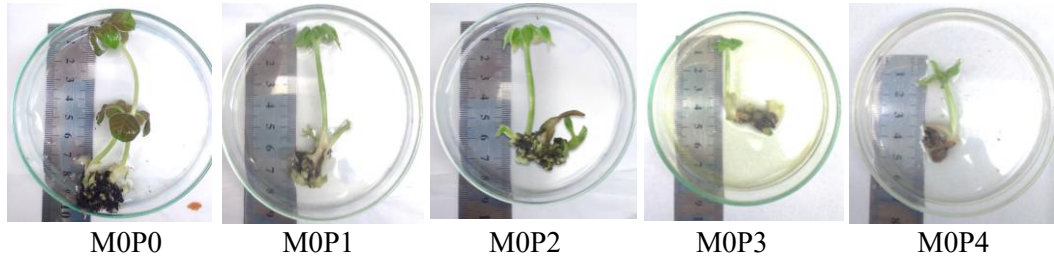
M4P2

M4P3

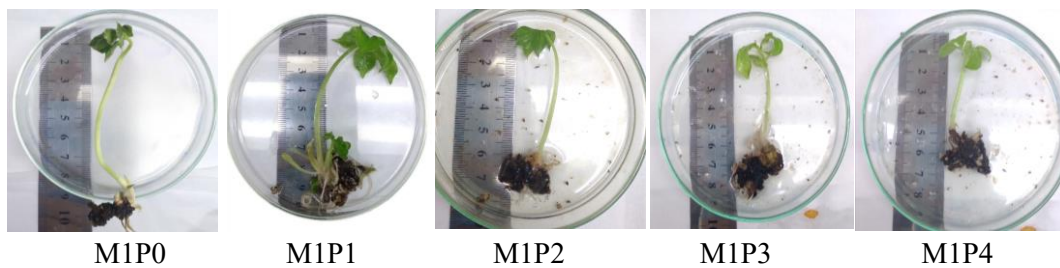
M4P4

4. Pertumbuhan Vegetatif Mutan Porang Hasil Seleksi Toleransi Kekeringan Secara *In Vitro* Menggunakan PEG 6000 pada 50 Hari Setelah Tanam (HST)

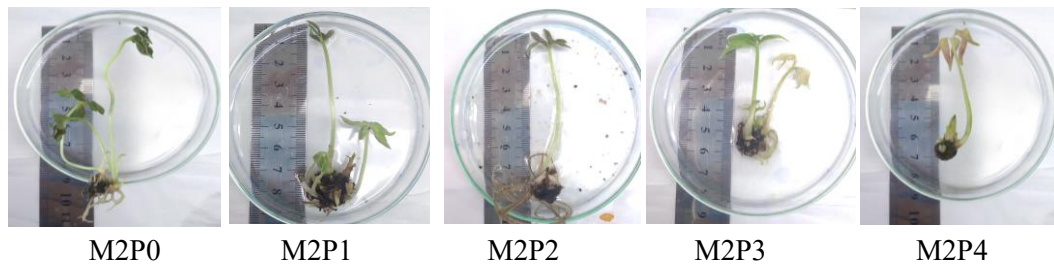
A. Genotip Kontrol (0 Gy)



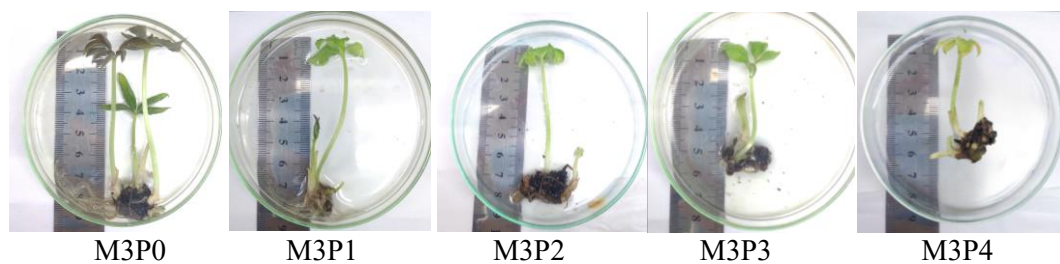
B. Genotip Mutan 2 Gy



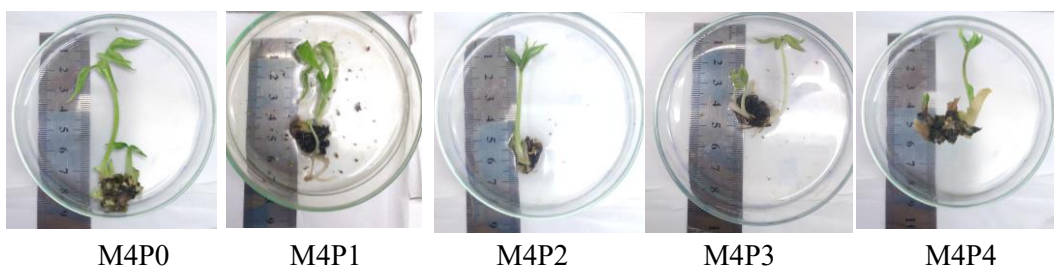
C. Genotip Mutan 4 Gy



D. Genotip Mutan 6 Gy



E. Genotip Mutan 8 Gy



5. Hasil Analisis SPSS

A. Uji Normalitas

Tests of Normality ^{b,c}							
	Kelompok	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Tinggi_Planlet	1	.253	3	.	.964	3	.637
	2	.292	3	.	.923	3	.463
	3	.204	3	.	.993	3	.843
	4	.175	3	.	1.000	3	1.000
	5	.276	3	.	.942	3	.537
	6	.175	3	.	1.000	3	1.000
	7	.204	3	.	.993	3	.843
	8	.219	3	.	.987	3	.780
	9	.219	3	.	.987	3	.780
	10	.314	3	.	.893	3	.363
	11	.219	3	.	.987	3	.780
	12	.276	3	.	.942	3	.537
	13	.175	3	.	1.000	3	1.000
	14	.253	3	.	.964	3	.637
	15	.292	3	.	.923	3	.463
	16	.196	3	.	.996	3	.878
	17	.276	3	.	.942	3	.537
	18	.175	3	.	1.000	3	1.000
	19	.204	3	.	.993	3	.843
	20	.253	3	.	.964	3	.637
	21	.219	3	.	.987	3	.780
	22	.219	3	.	.987	3	.780
	23	.253	3	.	.964	3	.637
	24	.314	3	.	.893	3	.363
	25	.219	3	.	.987	3	.780
Jumlah_Akar	1	.260	3	.	.959	3	.609
	2	.289	3	.	.928	3	.480
	3	.194	3	.	.997	3	.888
	4	.177	3	.	1.000	3	.970
	5	.263	3	.	.956	3	.594
	6	.177	3	.	1.000	3	.965
	7	.213	3	.	.990	3	.808
	8	.213	3	.	.990	3	.806
	9	.212	3	.	.990	3	.811

	10	.318	3	.	.886	3	.342
	11	.270	3	.	.948	3	.562
	12	.282	3	.	.936	3	.511
	13	.178	3	.	1.000	3	.958
	14	.260	3	.	.958	3	.607
	15	.296	3	.	.918	3	.445
	16	.187	3	.	.998	3	.916
	17	.214	3	.	.989	3	.802
	18	.178	3	.	1.000	3	.958
	19	.215	3	.	.989	3	.799
	20	.239	3	.	.975	3	.696
	21	.213	3	.	.990	3	.809
	22	.227	3	.	.983	3	.750
	23	.257	3	.	.960	3	.618
	24	.319	3	.	.885	3	.339
	25	.208	3	.	.992	3	.828
Jumlah_Daun	1	.189	3	.	.998	3	.906
	2	.367	3	.	.794	3	.099
	3	.198	3	.	.995	3	.871
	4	.296	3	.	.919	3	.448
	5	.177	3	.	1.000	3	.966
	6	.337	3	.	.855	3	.254
	7	.243	3	.	.972	3	.680
	8	.333	3	.	.861	3	.270
	9	.222	3	.	.986	3	.771
	10	.362	3	.	.804	3	.123
	11	.314	3	.	.893	3	.363
	12	.219	3	.	.987	3	.780
	13	.252	3	.	.965	3	.643
	14	.235	3	.	.977	3	.712
	15	.309	3	.	.900	3	.386
	16	.212	3	.	.990	3	.813
	17	.308	3	.	.902	3	.392
	18	.293	3	.	.922	3	.459
	19	.220	3	.	.986	3	.777
	20	.177	3	.	1.000	3	.967
	21	.268	3	.	.950	3	.571
	22	.177	3	.	1.000	3	.966
	23	.340	3	.	.849	3	.237
	24	.325	3	.	.876	3	.312

	25	.195	3	.	.996	3	.884
Klorofil	1	.212	3	.	.990	3	.810
	2	.272	3	.	.946	3	.553
	3	.175	3	.	1.000	3	1.000
	4	.212	3	.	.990	3	.813
	5	.272	3	.	.946	3	.553
	6	.326	3	.	.873	3	.305
	7	.212	3	.	.990	3	.813
	8	.212	3	.	.990	3	.813
	9	.272	3	.	.946	3	.553
	10	.175	3	.	1.000	3	1.000
	11	.212	3	.	.990	3	.813
	12	.212	3	.	.990	3	.811
	13	.219	3	.	.987	3	.783
	14	.292	3	.	.924	3	.465
	15	.272	3	.	.946	3	.553
	16	.212	3	.	.990	3	.813
	17	.175	3	.	1.000	3	1.000
	18	.272	3	.	.946	3	.553
	19	.212	3	.	.990	3	.813
	20	.272	3	.	.946	3	.553
	21	.272	3	.	.946	3	.553
	22	.212	3	.	.990	3	.813
	23	.212	3	.	.990	3	.813
	24	.175	3	.	1.000	3	1.000
	25	.212	3	.	.990	3	.813
Lebar_Stomata	1	.186	3	.	.998	3	.919
	2	.367	3	.	.793	3	.098
	3	.201	3	.	.995	3	.859
	4	.294	3	.	.921	3	.455
	5	.176	3	.	1.000	3	.975
	6	.336	3	.	.857	3	.258
	7	.241	3	.	.974	3	.688
	8	.333	3	.	.862	3	.273
	9	.219	3	.	.987	3	.783
	10	.362	3	.	.803	3	.122
	11	.326	3	.	.874	3	.308
	12	.192	3	.	.997	3	.894
	13	.254	3	.	.963	3	.632
	14	.233	3	.	.979	3	.721

	15	.307	3	.	.903	3	.394
	16	.209	3	.	.991	3	.824
	17	.307	3	.	.904	3	.397
	18	.292	3	.	.924	3	.465
	19	.219	3	.	.987	3	.783
	20	.178	3	.	1.000	3	.958
	21	.271	3	.	.947	3	.558
	22	.178	3	.	.999	3	.957
	23	.341	3	.	.848	3	.234
	24	.274	3	.	.945	3	.547
	25	.258	3	.	.960	3	.614
Kerapatan_Stomata	1	.219	3	.	.987	3	.780
	2	.175	3	.	1.000	3	1.000
	3	.253	3	.	.964	3	.637
	4	.314	3	.	.893	3	.363
	5	.175	3	.	1.000	3	1.000
	6	.292	3	.	.923	3	.463
	7	.269	3	.	.949	3	.567
	8	.175	3	.	1.000	3	1.000
	9	.175	3	.	1.000	3	1.000
	10	.175	3	.	1.000	3	1.000
	11	.253	3	.	.964	3	.637
	12	.253	3	.	.964	3	.637
	13	.219	3	.	.987	3	.780
	14	.253	3	.	.964	3	.637
	15	.292	3	.	.923	3	.463
	16	.292	3	.	.923	3	.464
	17	.253	3	.	.964	3	.637
	18	.253	3	.	.964	3	.637
	19	.175	3	.	1.000	3	1.000
	20	.175	3	.	1.000	3	1.000
	21	.314	3	.	.893	3	.363
	22	.175	3	.	1.000	3	1.000
	23	.175	3	.	1.000	3	1.000
	24	.314	3	.	.893	3	.363
	25	.175	3	.	1.000	3	1.000

a. Lilliefors Significance Correction

B. Uji Homogenitas

Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Lebar_Stomata	.880	24	50	.625
Kerapatan_Stomata	1.086	24	50	.391
Klorofil	.507	24	50	.963
Tinggi_Planlet	.685	24	50	.842
Jumlah_Akar	1.127	24	50	.352
Jumlah_Daun	2.125	24	50	.059

C. ANOVA

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Lebar_Stomata	Between Groups	891.658	24	37.152	1418.296	.000
	Within Groups	1.310	50	.026		
	Total	892.967	74			
Kerapatan_Stomata	Between Groups	1556232.846	24	64843.035	5332.417	.000
	Within Groups	608.008	50	12.160		
	Total	1556840.854	74			
Klorofil	Between Groups	1223.706	24	58.685	484963.871	.000
	Within Groups	.006	50	.000		
	Total	1223.712	74			
Tinggi_Planlet	Between Groups	161.960	24	6.748	106.553	.000
	Within Groups	3.167	50	.063		
	Total	165.127	74			
Jumlah_Akar	Between Groups	954.587	24	20.361	17.757	.000
	Within Groups	56.000	50	1.120		
	Total	1010.587	74			
Jumlah_Daun	Between Groups	1036.000	24	43.167	24.527	.000
	Within Groups	88.000	50	1.760		
	Total	1124.000	74			

D. Duncan (DMRT)

Lebar_Stomata

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05																
Kelompok	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
25	3	10.74767																
5	3	10.88533																
10	3		12.20900															
20	3		12.43867															
24	3			12.73100														
15	3				13.61067													
4	3				13.73000													
23	3					14.66500												
9	3						15.22933											
3	3						15.27833											
22	3						15.37333											
19	3							15.82900										
18	3								17.22367									
8	3								17.33333									
2	3									17.33333								
14	3										17.59800							
21	3										17.59800							
13	3											18.05300						
7	3												18.45600					
1	3												18.49533					
17	3													19.60767				
12	3														20.60267			
6	3															21.32567		
11	3															21.36267		
16	3																21.90633	
Sig.		.303	.088	1.000	.371	1.000	.311	1.000	.411	.051	.231	1.000	.767	1.000	1.000	.781	1.000	23.03900

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Kerapakan_Stomata

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05																				
Kelompok	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
25	3	372.00467																				
24	3		416.90167																			
23	3			452.39200																		
5	3				474.62667																	
4	3					513.96533																
10	3						520.80667															
3	3							528.50333														
22	3								568.26933													
9	3									577.24667												
21	3										615.73200											
2	3											647.80133										
15	3												674.31200									
8	3													677.30533								
20	3														686.28467							
1	3															696.54667						
7	3																732.03700					
19	3																	733.74733				
14	3																		733.74733			
6	3																			739.30600		
13	3																				776.93400	
18	3																					785.46600
17	3																					789.33400
16	3																					809.00333
12	3																					842.56933
11	3																					884.25967
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.551	1.000	.057	1.000	1.000	.057
																						889.81833
																						899.81833
																						.057

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.
a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Klorofil

Duncan ^a		Subset for alpha = 0.05																								
Kelompok	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
25	3	11.22798																								
5	3		11.64617																							
24	3			12.38076																						
4	3				13.01460																					
23	3					13.17456																				
22	3						13.86458																			
3	3							13.98078																		
21	3								14.22013																	
2	3									15.20487																
1	3										16.08572															
10	3											16.54423														
9	3												17.28570													
8	3													17.98116												
20	3														18.00519											
7	3															18.49600										
6	3																18.59448									
19	3																	18.94956								
18	3																		19.40271							
17	3																			21.71367						
16	3																				21.87528					
15	3																					22.15367				
14	3																						23.77800			
13	3																							25.06200		
12	3																								25.38333	
11	3																									25.44400
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Tinggi_Planlet

Duncan^a

Kelompok	N	Subset for alpha = 0.05												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	3	5.300												
25	3	5.533												
24	3		6.400											
23	3		6.667											
22	3			6.667										
4	3			7.000										
21	3				7.000									
20	3				7.300	7.300								
15	3				7.333	7.333	7.333							
3	3				7.400	7.400	7.400							
10	3					7.533	7.533							
19	3					7.733	7.733							
2	3						7.767							
18	3							8.200						
1	3							8.333	8.333					
14	3							8.500	8.500					
17	3								8.667	8.667				
9	3								8.733	8.733				
16	3									8.967				
13	3										8.967			
8	3											9.200		
12	3											9.233		
11	3												9.700	
7	3												9.933	
6	3													9.933
Sig.		.262	.200	.111	.080	.064	.064	.175	.080	.175	.227	.262	.050	.058

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.

Jumlah_Akar

Duncan^a

Kelompok	N	Subset for alpha = 0.05											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	3	3.33											
5	3	4.33											
24	3	4.33	4.33										
23	3	4.67	4.67	4.67									
4	3		5.33	5.33	5.33								
20	3		5.67	5.67	5.67	5.67							
10	3		6.00	6.00	6.00	6.00							
22	3		6.00	6.00	6.00	6.00							
15	3			6.67	6.67	6.67	6.67						
19	3			6.67	6.67	6.67	6.67						
3	3				7.33	7.33	7.33	7.33					
18	3				7.33	7.33	7.33	7.33					
21	3				7.33	7.33	7.33	7.33					
9	3					7.67	7.67	7.67	7.67				
17	3						8.33	8.33	8.33				
2	3						8.67	8.67	8.67				
14	3						8.67	8.67	8.67				
8	3							9.00	9.00				
13	3							9.33	9.33	9.33			
7	3								9.67	9.67	9.67		
1	3									11.00	11.00	11.00	
16	3										11.33	11.33	11.33
6	3											11.67	11.67
12	3											11.67	11.67
11	3												13.00
Sig.		.171	.105	.051	.056	.056	.056	.056	.051	.077	.077	.495	.087

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3,000.

Jumlah_Daun

Duncan^a

Kelompok	N	Subset for alpha = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	3	4.67									
4	3	5.67									
25	3	5.67									
24	3	7.00	7.00								
20	3		9.00	9.00							
3	3		9.33	9.33	9.33						
2	3		9.67	9.67	9.67	9.67					
10	3		9.67	9.67	9.67	9.67					
15	3		9.67	9.67	9.67	9.67					
19	3		9.67	9.67	9.67	9.67					
23	3		9.67	9.67	9.67	9.67					
9	3			10.33	10.33	10.33					
14	3			10.33	10.33	10.33					
22	3			10.67	10.67	10.67					
8	3				12.00	12.00	12.00				
18	3					12.33	12.33	12.33			
13	3						13.33	13.33			
1	3						13.67	13.67	13.67		
17	3							14.67	14.67	14.67	
21	3							14.67	14.67	14.67	
7	3								16.00	16.00	16.00
12	3									16.67	16.67
16	3									16.67	16.67
6	3										17.33
11	3										18.00
Sig.		.069	.051	.230	.055	.055	.194	.075	.069	.128	.128

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6. Dokumentasi Penelitian

A. Pembuatan media agar



D. Mutan generasi pertama



B. Sterilisasi media dan alat menggunakan autoklaf



E. Subkultur mutan generasi pertama pada media selektif PEG



C. Sterilisasi ruangan menggunakan Laminar Air Flow (LAF)



F. Pengamatan pertumbuhan vegetatif pada 50 Hari Setelah Tanam (HST)



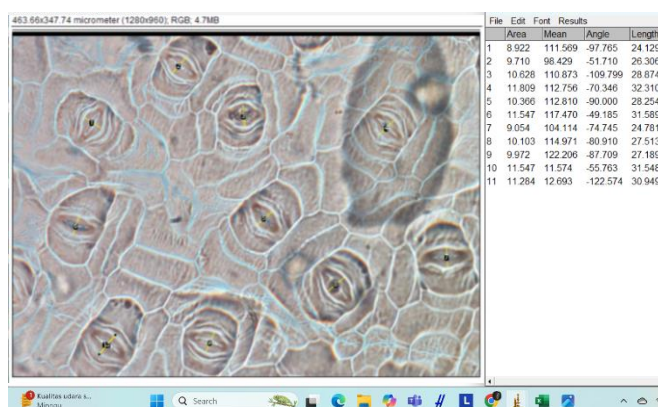
G. Pengamatan anatomi stomata menggunakan mikroskop



H. Analisis kadar klorofil menggunakan Spektrofotometer Uv-Vis



I. Penghitungan anatomi stomata menggunakan ImageJ software





KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341)551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN TESIS

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 230602210008
Nama : HANIK ISNAINI
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : MAGISTER BIOLOGI
Dosen Pembimbing 1 : Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P
Dosen Pembimbing 2 : Dr. SULISETIJONO, M.Si
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : SELEKSI TOLERANSI KEKERINGAN MENGGUNAKAN PEG 6000 TERHADAP KARAKTER ANATOMI-BIOKIMIA DAUN DAN PERTUMBUHAN VEGETATIF PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume) HASIL MUTASI GAMMA COBALT-60 SECARA IN VITRO

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1.	27 September 2024	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	Konsultasi judul tesis & kerangka konsep penelitian	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
2.	29 Oktober 2024	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	Konsultasi BAB I - III	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
3.	22 November 2024	Dr. SULISETIJONO, M.Si	Konsultasi BAB I & BAB III	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
4.	18 Desember 2024	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	Revisi BAB I-III	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
5.	3 Januari 2025	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	ACC Proposal (BAB I-III)	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
6.	10 Januari 2025	Dr. SULISETIJONO, M.Si	ACC Proposal (BAB I-III)	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
7.	21 April 2025	Dr. SULISETIJONO, M.Si	Konsultasi analisis data	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
8.	22 Mei 2025	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	Konsultasi BAB IV-V	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9.	22 Mei 2025	Dr. SULISETIJONO, M.Si	Konsultasi BAB IV-V	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
10.	2 Juni 2025	Prof.Dr. EVIKA SANDI SAVITRI, M.P	Revisi BAB IV & ACC Tesis	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
11.	2 Juni 2025	Dr. SULISETIJONO, M.Si	Revisi BAB IV & ACC Tesis	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Seminar-Proposal/Skripsi/Tesis/Desertasi

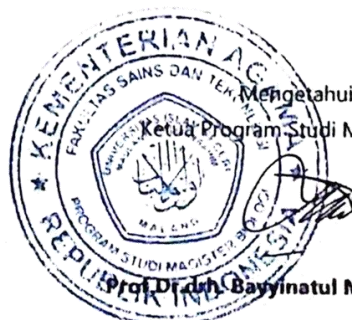
Dosen Pembimbing 2

Dr. Sulisetijono, M.Si

Malang, 10 Juni 2025

Dosen Pembimbing 1

Prof. Dr. Erika Sandi Savitri, M.P



Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Biologi

Prof. Dr. H. Bayyinatul Muchtarromah, M.Si