

MITIGASI CEKAMAN KADMIUM (Cd) PADA TANAMAN PADI (*Oryza sativa* L.): PENDEKATAN FISILOGI DAN MOLEKULER

[*Mitigation of Cadmium (Cd) Stress on Paddy (Oryza sativa L.): Physiological and Molecular Approaches*]

Selis Meriem^{1*}✉

¹Jurusan Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

*Email: selis.meriem@uin-alauddin.ac.id

ABSTRACT

Contamination of cadmium (Cd) in fields and paddy cultivation seriously threatens the quality of the yield and human health. The accumulation of Cd in paddy tissues increases reactive oxygen species (ROS), which harm metabolic activities and inhibit the plant growth. If the high bioavailability of Cd could not be reduced during the growth phases of paddy, its absorption and translocation to the aerial parts would lead to the accumulation of high Cd in the grain. This review aimed to describe the comprehensive discussions about the physiological responses of rice plants from distinct cultivars to Cd stress, the various practice of mitigation to alleviate the toxicity of Cd, and the tolerance mechanisms through upregulated gene expression. Furthermore, strategies to reduce the uptake of Cd and cope with oxidative stress have also been emphasized. Applying amendments from chemical elements, biochar, microbe-assisted remediation, phytohormones, and organic acid could be the strategy to remediate Cd. Through those, Cd may be reduced by chelation forms to be immobilized, stabilized, extracted in the root surface, or sequestered in the root cells. Moreover, this study also discusses the overexpression of Cd-responsive genes in the cultivar of tolerant paddy. Efforts to improve the resistance of paddy with inadequate Cd uptake and reduced accumulation in grain are crucially highlighted to maintain food safety and human health.

Keywords: cadmium, mitigation, paddy, physiological stress

ABSTRAK

Kontaminasi kadmium (Cd) pada lahan pertanian dan budidaya padi sangatlah mempengaruhi produksi tanaman dan juga kesehatan manusia. Akumulasi Cd dalam jaringan padi menimbulkan peningkatan spesies oksigen reaktif yang menyebabkan kerusakan aktivitas metabolisme sehingga menghambat pertumbuhan tanaman. Jika keberadaan Cd yang tinggi tidak dapat direduksi selama fase pertumbuhan padi, penyerapan dan translokasi Cd ke bagian tajuk akan menyebabkan akumulasi Cd yang tinggi dalam bulir padi. Review ini bertujuan untuk mendeskripsikan pembahasan komprehensif mengenai respon fisiologis tanaman padi dari kultivar yang berbeda terhadap cekaman Cd, variasi praktik mitigasi untuk mengurangi toksisitas Cd, dan mekanisme toleransi melalui ekspresi gen yang ter-upregulasi. Lebih lanjut, strategi untuk mengurangi penyerapan Cd dan mengatasi stres oksidatif juga ditekankan dalam tulisan ini. Pemberian bahan amandemen dalam bentuk unsur kimia, biochar dan remediasi berbantu mikroba, fitohormon, maupun asam organik dapat diaplikasikan sebagai bentuk dari strategi remediasi Cd. Melalui hal tersebut, Cd dapat direduksi dalam bentuk kelat untuk dapat diimobilisasi, distabilkan, diekstraksi di permukaan akar, atau disimpan dalam sel akar. Selain itu, studi ini juga membahas beberapa overekspresi gen yang responsif terhadap Cd pada kultivar padi yang toleran. Upaya dalam meningkatkan ketahanan tanaman padi yang mampu membatasi serapan Cd dan mengurangi akumulasi Cd dalam bulir padi sangat penting mendapat perhatian serius demi menjaga keamanan pangan dan kesehatan manusia.

Kata Kunci: cekaman fisiologis, kadmium, mitigasi, padi

PENDAHULUAN

Budidaya padi saat ini menghadapi ancaman lingkungan yang semakin berbahaya akibat tingginya angka pencemaran kadmium (Cd) dan logam berat lainnya. Lahan pertanian merupakan daerah yang cukup besar peluangnya tercemar Cd karena intensitas penggunaan bahan agrokimia yang tinggi. Selain aplikasi pupuk fosfat dan pestisida yang berulang, akumulasi Cd di tanah diakibatkan dari hasil pembuangan limbah industri, gas hasil pembakaran kendaraan, residu industri logam berat dan endapan logam berat di atmosfer (Tóth *et al.*, 2016; Feng *et al.*, 2019). Hal ini mengindikasikan bahwa perkembangan pertanian modern dan industrialisasi berkontribusi dalam mencemari daerah irigasi dan lahan pertanian tersebut. Persawahan yang tercemar Cd berdampak secara signifikan terhadap kerusakan lingkungan dan kesehatan manusia. Mengatasi hal tersebut,

mitigasi pencemaran logam berat perlu mendapat perhatian yang serius.

Kadmium merupakan logam non esensial yang tidak memberikan peran penting dalam pertumbuhan tanaman. Namun, akumulasi Cd pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan perubahan metabolisme dan fisiologi yang berdampak pada penurunan kualitas dan produktivitas tanaman. Pada tanaman padi, kadmium mudah diserap oleh akar padi dikarenakan sifat Cd yang sulit terdegradasi, persisten, mobile, mudah larut dan membentuk ikatan kompleks dengan koloid tanah dan terikat dengan unsur mineral lain pada pH rendah (Li *et al.*, 2021). Sifat toksik pada Cd berpotensi mengganggu ekosistem tanah termasuk kelimpahan komunitas mikroba tanah dan unsur hara di tanah sehingga berdampak terhadap penurunan kesuburan tanah. Ketersediaan Cd di tanah mampu menghambat kerja bakteri nitrifikasi

*Kontributor Utama

*Diterima: 1 Februari 2022 - Diperbaiki: 15 Desember 2022 - Disetujui: 15 Desember 2022

dalam mengoksidasi amonium menjadi nitrat dan bakteri denitrifikasi dalam mereduksi nitrogen oksida dalam bentuk gas (Afzal *et al.*, 2019). Transformasi nitrogen (N) yang dihambat oleh Cd tentunya mereduksi ketersediaan hara N di sekitar rizosfer sehingga menyebabkan defisiensi N pada tanaman padi.

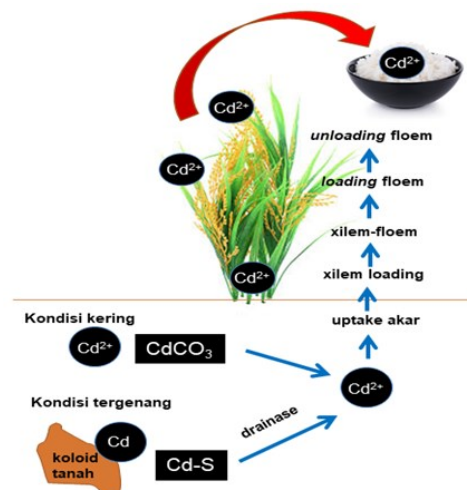
Penyerapan dan penyimpanan Cd pada konsentrasi tinggi menyebabkan akumulasi Cd pada seluruh jaringan tanaman padi termasuk bagian akar, batang, daun, rachis, dan bulir padi. Padi merupakan sumber pangan utama bagi manusia yang berujung pada pengendapan Cd dalam tubuh manusia jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Sebanyak 3% Cd yang terakumulasi dalam tubuh manusia didapatkan melalui konsumsi beras dimana kontaminan ini berasal dari 15% Cd yang ditransportasi dari tanah ke dalam bulir padi (Li *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2021). Di Indonesia, batas maksimum cemaran Cd dalam beras adalah 0,4 mg kg⁻¹ (Badan Standardisasi Nasional, 2009). Konsumsi beras yang tercemar Cd pada konsentrasi tinggi dalam jangka panjang akan membahayakan kesehatan manusia dan herbivora, berupa gangguan seperti nefrotoksik, osteoporosis, neurotoksik, karsinogenik, genotoksik, teratogenik, serta disfungsi sistem endokrin dan reproduksi (Åkesson dan Chaney, 2019; Qing *et al.*, 2020).

Di Indonesia, terdapat beberapa lahan pertanian padi yang telah terkontaminasi Cd diantaranya adalah lahan persawahan di Rancaengkek Bandung dengan konsentrasi Cd yang berkisar antara 0,86–9,69 mg kg⁻¹ (Sutono dan Kurnia, 2012) dan lahan persawahan di Kabupaten Sidoarjo dengan konsentrasi Cd antara 0,14–0,48 mg kg⁻¹ (Khasanah *et al.*, 2021). Ancaman toksisitas Cd pada lahan

pertanian perlu diantisipasi melalui studi bagaimana tanaman padi mampu mereduksi serapan Cd. Oleh karena itu, pemahaman ini membutuhkan informasi yang komprehensif mengenai bagaimana respon fisiologi tanaman dalam merespon dan mendetoksifikasi Cd dalam jaringan, bagaimana tanaman mengaktifkan ekspresi gen-gen responsif Cd serta bagaimana pemilihan strategi penanganan yang tepat terhadap cemaran Cd pada tanaman padi. Output dari review ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap penelitian berkelanjutan dalam menghasilkan pertumbuhan padi yang sehat dan aman untuk dikonsumsi.

Penyerapan dan translokasi Cd dalam jaringan padi

Mekanisme uptake dan translokasi Cd pada tanaman padi ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tanah kering masam Cd tersedia dalam bentuk ion Cd²⁺ sedangkan pada pH alkalin Cd lebih banyak ditemukan dalam bentuk CdCO₃ (Khaokaew *et al.*, 2011). Spesiasi Cd juga ditemukan dalam bentuk asosiasi kompleks dengan koloid tanah (kaolinit, ferrihidrit dan humus) dan dengan sulfur membentuk CdS pada kondisi genangan (Hashimoto dan Yamaguchi, 2013). Drainase atau pengairan pada lahan pertanian meningkatkan ketersediaan Cd bagi tanaman padi ketika ikatan CdS dikonversi dalam bentuk ion Cd²⁺. Di dalam air, Cd mudah berikatan dengan ligan klorin membentuk garam-garam CdCl₂ yang ketika mengendap akan membentuk kompleks dengan partikel tanah yang mengandung sulfur (CdS), fosfat dan asam humik (Harteman *et al.*, 2008).



Gambar 1. Proses uptake dan translokasi Cd pada tanaman padi (*Oryza sativa* L.). Bentuk ketersediaan Cd di tanah dan mekanisme transportasi dari perakaran menuju bulir padi didapatkan dari (Khaokaew *et al.*, 2011; Yoneyama *et al.*, 2015; Tian *et al.*, 2019). (*The process of Cd uptake and translocation in paddy plants (Oryza sativa* L.). *The availability of Cd in soil and mechanism of Cd transportation from roots to the grain paddy were collected from other studies*).

Jika Cd tersedia bagi tanaman, maka logam berat ini harus melalui jalur transportasi yang dimulai dari membran sel secara simplas, aliran xilem melalui perisikel akar, transpor xilem menuju floem pada nodus vegetatif, aliran *loading* floem menuju tajuk dan *unloading* floem menuju organ reproduksi pada fase pembungaan, pengisian dan pematangan bulir padi (Yoneyama *et al.*, 2015). Lebih lanjut, Cd berada dalam bentuk ion bebas dalam getah xilem dengan pH 6 dan ditranslokasi dalam bentuk kompleks Cd-protein spesifik dan senyawa thiol dalam getah floem dengan pH 8. Transfer Cd melalui xilem-floem yang terletak pada bagian internodus padi berperan penting dalam regulasi transportasi ion Cd^{2+} . Pada fase vegetatif, Cd^{2+} akan tersimpan dalam jaringan vaskular floem daun. Selanjutnya, Cd^{2+} dimobilisasi dan didistribusi pada bagian nodus pertama yang menghubungkan floem panikel sampai pada biji (Tian *et al.*, 2019). Secara keseluruhan, 60% dari deposisi Cd pada bulir padi berasal dari proses remobilisasi dari jaringan lain pada fase pra pembungaan dan 40% sisanya berasal dari proses uptake pada fase pematangan biji (Rodda *et al.*, 2011). Sebagian besar Cd terlokalisasi dalam lapisan endosperma, khususnya pada protein penyimpanan.

Cekaman fisiologis padi terhadap cekaman kadmium (Cd)

Tanaman menghasilkan ROS dalam batas normal sebagai hasil samping dari proses metabolisme aerobik. Ketika terpapar oleh lingkungan ekstrem, tanaman akan meningkatkan ekspresi gen produksi ROS. Overakumulasi Cd dalam jaringan tanaman padi memicu respon terbentuknya ROS. Senyawa ini ditemukan dalam bentuk radikal bebas seperti hidroksyl, superoksida, alkoxy, perhydroxy, dan non radikal seperti singlet oksigen dan hidrogen peroksida (Roychowdhury *et al.*, 2018). Ketidakseimbangan antara konsentrasi ROS yang tinggi dan *scavenging-compound* yang rendah dapat menyebabkan stres oksidatif seperti peroksidasi lipid, oksidasi protein, inhibisi enzim dan kerusakan materi genetik. Senyawa ini paling banyak dihasilkan oleh organel kloroplas dan mitokondria dengan menghambat dan mendegradasi senyawa aktif metabolik (Das dan Roychowdhury, 2014). Tingginya konsentrasi ROS dan malonilaldehid (MDA) mengindikasikan adanya kebocoran elektrolit dan disintegrasi protein fotosintetik bahkan mampu mengganggu transduksi sinyal dan down regulasi ekspresi gen penting dalam pertumbuhan dan perkembangan (Dutta *et al.*, 2018; Hassan *et al.*, 2020).

Gejala utama toksik dari akumulasi logam berat pada tanaman padi dapat diamati berdasarkan terbentuknya warna gelap pada tulang daun muda

hingga menyebabkan kelayuan dan klorosis daun pada kondisi ekstrem (Fahad *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019). Akumulasi Cd nyata menyebabkan penurunan produktivitas pada fase anakan vegetatif, fase reproduktif pembungaan, dan fase pematangan (pengisian gabah matang penuh). Penurunan yang sangat signifikan ditunjukkan dengan rendahnya bobot bulir padi, tinggi, panjang akar, biomasa tajuk dan akar, panjang anakan produktif, dan hasil panen (Liu *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2022). Meskipun Cd nyata mereduksi pemanjangan akar dan tajuk, respon tanaman padi terhadap cekaman Cd bergantung terhadap varietas, konsentrasi dan durasi paparan Cd. Chiao *et al.* (2019) melaporkan bahwa kultivar padi indica (TCS10, TCS17, dan TNGS22) lebih sensitif terhadap Cd dibandingkan dengan kultivar padi japonica (TY3, TK9, TNG71, KH145, dan TKW3) ditandai dengan konsentrasi Cd yang lebih banyak tersimpan pada bulir padi. Oleh sebab itu, skrining ketahanan padi terhadap cekaman Cd dari berbagai varietas perlu mendapat perhatian yang serius.

Mekanisme fisiologi padi toleran terhadap cekaman kadmium (Cd)

Tanaman padi adalah salah satu tanaman pertanian yang mudah menyerap Cd melalui protein kanal pada membran yang sama dilewati oleh unsur hara kation (Hussain *et al.*, 2021). Cd merupakan logam berat toksik non esensial yang tidak memberikan dampak positif dalam pertumbuhan, tetapi malah bersifat toksik bagi tanaman. Aplikasi Cd pada media pertumbuhan padi menyebabkan stres oksidatif akibat penumpukan senyawa *hydrogen peroxide* (H_2O_2) dan *malonaldehyde* (MDA). Senyawa ini menurunkan senyawa osmolitikum berupa total protein dan gula terlarut yang menyebabkan kebocoran elektrolit dari membran sel dan kematian sel (Bari *et al.*, 2019). Tingginya konsentrasi radikal H_2O_2 , singlet oksigen (1O_2), dan MDA baik di akar maupun tajuk padi menyebabkan peningkatan asam amino bebas sebagai indikator stress yang umumnya tinggi pada berbagai kondisi cekaman lingkungan seperti prolin (Meriem *et al.*, 2021), arginin, dan γ -aminobutyric acid (GABA) (Jiang *et al.*, 2020). Akumulasi senyawa ROS yang berlebih menyebabkan peroksidasi lipid pada membran organel sel dan degradasi oksidatif pada kompartemen seluler seperti pigmen kloroplas dan asam nukleat (Sigel *et al.*, 2013). Lebih lanjut, stres oksidatif menyebabkan penurunan drastis aktivitas enzim antioksidan *catalase* (CAT), *peroxidase* (POD), dan *glutathione S-transferase* (GST) di akar dan tajuk padi sehingga memicu peroksidasi lipid (Jiang *et al.*, 2020). Toksisitas Cd yang mengganggu aktivitas antioksidan dan memicu akumulasi senyawa ROS memberikan dampak

serius terhadap penurunan panjang tajuk, panjang akar, biomasa dan luas daun atau *leaf area* serta mereduksi pigmen fotosintesis seperti klorofil a, klorofil b, karotenoid dan total klorofil (Kaleem *et al.*, 2022). Pada akhirnya, stres Cd menekan pertumbuhan padi sehingga menurunkan produktivitas padi berupa penurunan pada panjang malai, jumlah gabah per malai, persentase jumlah gabah terisi penuh dan bobot 100 butir gabah (Punjee *et al.*, 2018).

Detoksifikasi ROS pada tanaman toleran terhadap Cd mampu mengembalikan keseimbangan redoks seluler. Respon tanaman yang toleran terhadap Cd cenderung menunjukkan konsentrasi *ROS-scavenging enzymes* sebagai bentuk mekanisme antioksidan dari golongan enzimatis seperti katalase, CAT; superoksida dismutase, SOD; askorbat peroksidase, APX; glutathion peroksidase, GPX; peroksidase, POX; tioredoksin peroksidase, TPX; guaiacol peroksidase (POD); dan alternatif oksidase, AOX; dan non enzimatis (askorbat, glutathion, tokoferol, alkaloid, dan karotenoid) (Gill dan Tuteja, 2010). Antioksidan tersebut bekerja dengan cara mengurangi dampak kerusakan akibat cekaman oksidatif serta menurunkan konsentrasi Cd dalam jaringan tanaman.

Eksresi beberapa protein penting dalam kondisi stres Cd telah diidentifikasi melalui pendekatan proteomik pada daun dan akar padi varietas toleran Cd yaitu Shanyou 63 (Ge *et al.*, 2009). Protein yang terekspresi dikategorikan berdasarkan fungsinya yaitu sebagai enzim detoksifikasi (aldo/ keto reduktase, peroksidase, karboksilesterase); protein terkait patogenesis (kitinase, β -glukosidase), dan enzim terkait metabolisme (ubiquitin, UDP-glukosa protein transglukosilase, alanin aminotransferase). Protein tersebut terlibat dalam proses kelat dan kompartemensi Cd dalam bentuk konjugat, eliminasi dan detoksifikasi senyawa radikal ROS, degradasi protein atau inaktivasi enzim yang berperan dalam transpor dan translokasi Cd. Protein yang diinduksi oleh Cd yaitu protein β -glukosidase, protein terkait patogenesis, dan protein UDP-glucose transglucosylase mampu memulihkan metabolisme dan fisiologi tanaman padi varietas Shanyou 63 dan Aizaizhan.

Kontrol gen padi toleran terhadap cekaman kadmium (Cd)

Mekanisme transduksi sinyal pada tanaman padi yang diinduksi oleh Cd melibatkan beberapa molekul sinyal melalui (i) jalur Ca^{2+} signalling (Ren *et al.*, 2022), (ii) jalur MAPK (*mitogen-activated protein kinase*) (Jalmi *et al.*, 2018), (iii) jalur *hormone signalling*, dan (iv) jalur akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS)

(Chmielowska-Bak *et al.*, 2014). Hal yang sama juga dilaporkan oleh Ogawa *et al.* (2009) bahwa respon tanaman padi terhadap sinyal Cd yang ditransduksi melibatkan *calcium-dependent protein kinases* (CDPKs), MAPK, dan faktor transkripsi (protein DREB, WRKY, NAC MYB dan AP2).

Pada jalur transduksi sinyal tanaman padi yang melibatkan ion Ca^{2+} , Cd memicu akumulasi Ca^{2+} intraseluler dalam sitoplasma yang kemudian Ca^{2+} berikatan dengan protein sensor *calmodulins* (CaMs), *CaMs like proteins* (CMLs), *calcineurin B-like proteins* (CBLs), dan *Ca²⁺-dependent protein kinases* (CDPKs) (Dodd *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2023). Selanjutnya terdapat jalur MAPK yang memediasi transmisi sinyal terkait stres Cd. Proses transduksi sinyal ini diaktivasi oleh persepsi ligan spesifik Cd dan molekul ROS yang diproduksi dalam konsentrasi tinggi selama cekaman (Jalmi dan Sinha, 2015). Protein reseptor yang teridentifikasi terlibat dalam jalur sinyal MAPK pada padi adalah protein kinase (*serin/ threonine protein kinase*, *leucine-rich receptor-like kinase*, *membrane-associated kinase*, *receptor cytoplasmic kinase*, dan *wall-associated kinase*) dan *calcineurin B protein* (Zhao *et al.*, 2023). Pembentukan ROS terjadi segera setelah tanaman merespon Cd. ROS juga merupakan indikator sinyal Cd melalui reaksi non-enzimatis maupun enzimatis seperti NADPH-oksidase yang mengoksidasi O_2 menjadi O_2^- . Produksi ROS yang diinduksi Cd juga dipicu oleh ion Ca^{2+} dan protein sensor seperti *calmodulin*, *protein kinase*, *phospholipase C* dan *phospholipase D* (Chmielowska-Bak *et al.*, 2014). Selain ROS, hormon pertumbuhan cekaman seperti asam absisat, brassinosteroid, sitokinin, etilen, giberelin dan gen terkait auksin juga terlibat dalam proses transduksi sinyal Cd (Zhao *et al.*, 2023). Berbagai jalur transduksi sinyal tersebut mengaktifkan faktor transkripsi yang responsif terhadap Cd. Faktor transkripsi ini meregulasi ekspresi gen-gen yang terkait responsif Cd yang berfungsi sebagai gen pertahanan seperti transporter Cd, *phytochelatin*, *metallothionine*, antioksidan dan gen miRNA (Jalmi *et al.*, 2018).

Protein transporter ion Cd terekspresi pada tanaman padi toleran Cd (Tabel 1). Transporter tersebut merupakan protein penting yang meregulasi transportasi, translokasi, dan sekuestrasi Cd. Varietas padi yang berbeda mengekspresikan gen terkait transporter yang berbeda pula. Protein transporter yang bertanggungjawab dalam menghambat serapan Cd diantaranya adalah transporter *OsCDT1*, *OsNRAMP5*, *OsABCG36*, *OsIRT1* dan *OsSMPI* yang terdapat pada membran sel akar padi (Gambar 1). Protein ini juga bekerja melalui proses ekstraksi dan eksklusi Cd. Transporter *OsHMA3* dan *OsPCS2* mengatur sekuestrasi Cd dalam vakuola sel akar dalam

bentuk konjugat Cd dengan asam organik atau dengan fitokelatin. Protein ini berperan dalam meningkatkan penyimpanan Cd dalam kloroplas akar sehingga menurunkan transpor Cd menuju tajuk dan bulir padi (Das *et al.*, 2017; Sebastian dan Prasad, 2018). Gen *OsSOD* mengaktifkan senyawa antioksidan untuk mengurangi dampak cekaman oksidatif Cd (Sebastian dan Prasad, 2018).

Selain itu terdapat transporter membran *OsHMA2*, *OsZIP3* dan *OsLCT1* bertugas dalam menghambat proses *xilem loading* menuju getah floem pada nodus pertama dan dari aliran floem menuju jaringan lainnya. Dalam getah xilem, Cd ditranslokasikan dalam bentuk ion bebas, dan diremobilisasi melalui aliran floem melalui konjugat Cd dengan protein spesifik. Seluruh gen yang mengkode aktivasi protein transporter mampu

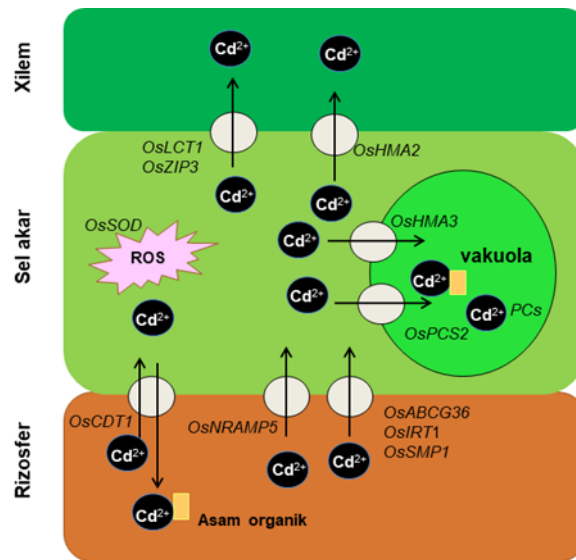
mereduksi translokasi Cd dari akar-tajuk selama fase pertumbuhan padi, terutama saat proses pengisian biji. Upregulasi gen tersebut tidak hanya menghambat akumulasi Cd pada bulir padi tetapi juga mereduksi akumulasi ROS, memperbaiki kerusakan oksidatif akibat Cd dan menunjukkan parameter pertumbuhan akar dan tajuk yang lebih baik (Tian *et al.*, 2019). Gen-gen yang terekspresikan pada Tabel 1 ditemukan pada tanaman padi (*Oryza sativa* L.) varietas Nipponbare (Fu *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2019), Huanghuazhan (Huang *et al.*, 2019), MTU 7029 (Sebastian and Prasad, 2018), Zhonghua 11 (Chang *et al.*, 2019) dan IR64 (Das *et al.*, 2017). Varietas yang telah diuji tersebut dapat membuktikan adanya aspek ketahanan, kualitas, dan keamanan konsumsi beras dari Cd.

Tabel 1. Upregulasi ekspresi *Cd-responsive genes* pada tanaman padi (*Oryza sativa* L.). (*The expression of upregulated Cd-responsive genes in paddy plant (Oryza sativa L.)*).

Konsentrasi Cd (Concentrations of Cd)	Varietas (Varieties)	Gen responsif Cd (<i>Cd-responsive genes</i>)	Mekanisme regulasi gen <i>Cd-responsive</i> (<i>Regulation mechanisms of Cd-responsive genes</i>)	Referensi (References)
1.5 mg kg ⁻¹	Nipponbare (<i>wild type</i>)	Transporter LHZ (<i>OsHMA2</i> , <i>OsLCT1</i> dan <i>OsZIP3</i>)	Ekspresi gen transporter LHZ menekan translokasi dan akumulasi Cd pada biji padi, mengurangi stres oksidatif (indikator MDA, H ₂ O ₂ , dan prolin), dan meningkatkan kandungan klorofil.	(Tian <i>et al.</i> , 2019)
50 µM (CdCl ₂)	Huanghuazhan	Gen kontrol redoks (<i>Os06g0216000</i> , <i>Os07g0638300</i> , <i>Os01g0294500</i>), gen metabolisme glutation (<i>Os01g0530900</i>), gen biogenesis dinding sel (<i>Os05g0247800</i> , <i>Os11g0592000</i> , <i>Os03g0416200</i>), gen regulasi ekspresi (<i>Os07g0597200</i> , <i>Os02g0168200</i>), dan gen transport membran (<i>Os04g0524500</i>)	Gen terkait kontrol redoks diupregulasi untuk menetralkan senyawa ROS intrasel, gen terkait metabolisme glutation diupregulasi untuk mendetoksifikasi H ₂ O ₂ , gen terkait biogenesis dinding sel diupregulasi untuk sintesis enzim dan protein terkait formasi pertahanan struktur dinding sel, gen terkait regulasi ekspresi diupregulasi untuk sintesis enzim (protein kinase, faktor transkripsi, chaperon dan reseptor), dan gen terkait transport membran diupregulasi untuk aktivasi transporter (ABC, anion S, sulfate, fosfat dan gula).	(Huang <i>et al.</i> , 2019)

Tabel 1. Upregulasi ekspresi *Cd-responsive genes* pada tanaman padi (*Oryza sativa* L.). (*The expression of upregulated Cd-responsive genes in paddy plant (Oryza sativa L.)*).

Konsentrasi Cd (Concentrations of Cd)	Varietas (Varieties)	Gen responsif Cd (<i>Cd-responsive genes</i>)	Mekanisme regulasi gen <i>Cd-responsive</i> (<i>Regulation mechanisms of Cd-responsive genes</i>)	Referensi (References)
25 μ M (CdCl ₂)	MTU 7029	Gen ATPase (<i>OsHMA3</i>), transporter Cd (<i>OsCDT1</i>), transporter regulasi Fe (<i>OsIRT1</i>), dan superoksida dismutase (<i>OsSOD</i>)	<i>Upregulasi OsHMA3</i> berperan untuk memicu penyerapan Cd di dalam vakuola akar melalui ATP-ase tonoplas, upregulasi <i>OsCDT1</i> berfungsi untuk eksklusi Cd dalam bentuk kompleks Cd-asam organik, upregulasi <i>OsIRT1</i> bertanggung jawab terhadap peningkatan aktivitas kelat Cd oleh <i>ferric reductase</i> dan efektivitas transportasi Fe ³⁺ -asam organik, upregulasi <i>OsSOD</i> berperan dalam detoksifikasi radikal superoksida selama proses transpor elektron dalam fotosintesis dan peningkatan eksklusi Cd dalam bentuk kompleks Cd-asam malat.	(Sebastian dan Prasad, 2018)
0–20 μ M	Nipponbare (<i>wild type</i>)	Gen <i>OsABCG36</i>	Sensitivitas upregulasi gen terkait terhadap Cd terlokalisir pada protein membran plasma daerah zona ujung akar dan pematangan. Gen <i>OsABCG36</i> berfungsi dalam mengupregulasi sintesis transporter ABC yang berperan dalam detoksifikasi Cd dalam bentuk konjugat atau ekskresi ekstraseluler Cd dari sel akar.	(Fu <i>et al.</i> , 2019)
0.1, 0.5, 1.0 dan 2.0 μ M (CdCl ₂)	Zhonghua 11	Gen <i>OsNRAMP5</i>	Overekspresi <i>OsNRAMP5</i> terlokalisir pada membran sel ujung akar dan primordia akar lateral, mengurangi akumulasi Cd di bulir padi sebanyak 49–94%. Gen <i>OsNRAMP5</i> menghambat transpor radial Cd menuju stele sehingga menekan translokasi Cd dari akar ke tajuk.	(Chang <i>et al.</i> , 2019)
100 μ M (CdCl ₂)	IR64	Gen <i>OsPCS2a</i> dan <i>OsPCS2b</i> (1509 bp, 502 asam amino, 6 ekson, 5 intron)	<i>OsPCS2</i> berperan dalam sintesis enzim phytochelatin synthase (PCS). Upregulasi tertinggi gen ini tampak dijumpai di bagian akar. PCS menghasilkan fitokelatin yang mengkelat Cd dalam bentuk konjugat dalam vakuola sel untuk mengurangi toksisitas.	(Das <i>et al.</i> , 2017)
50, 100 and 200 mM (CdCl ₂)	<i>Oryza sativa</i> L.	Gen <i>OsSMP1</i>	Overekspresi <i>OsSMP1</i> di membran sel akar meningkatkan aktivitas peredam ROS, mereduksi kerusakan oksidatif (MDA rendah), dan meningkatkan tinggi tanaman.	(Zheng <i>et al.</i> , 2021)



Gambar 1. Model ekspresi gen *Cd-tolerant* pada padi (data gen didapatkan dari Das *et al.*, 2017; Sebastian dan Prasad, 2018; Chang *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2021). (*The expression model of Cd-tolerant genes in paddy (gene data were collected from other studies).*)

Metode mitigasi cemaran kadmium (Cd)

Dampak toksisitas Cd pada lingkungan yang tercemar terutama pada tanah, mikroba tanah, dan tanaman dapat diminimalisasi melalui strategi mitigasi dengan berbagai teknik yang ramah lingkungan. Bentuk upaya mitigasi pada tanaman padi dapat dilakukan melalui penggunaan bahan amandemen dari unsur mineral dan biochar, melalui teknik fitoremediasi dengan mikroba resisten Cd, serta aplikasi penggunaan hormon eksogen dan asam organik (Tabel 2). Upaya tersebut mampu mengurangi uptake dan mereduksi absorpsi Cd ke dalam jaringan tanaman padi.

Penambahan unsur mineral dengan dosis yang tepat pada tanah yang tercekam Cd mampu menginduksi aktivitas detoksifikasi ROS, serta peningkatan aktivitas protein enzimatis dan antioksidan yang dapat mengurangi dampak stress dari Cd. Aplikasi pupuk kimia majemuk maupun tunggal yang mengandung unsur tersebut menyebabkan perubahan dalam hal struktur fisika tanah, kimia tanah, dan kelimpahan relatif komunitas mikroba tanah yang mempengaruhi proses migrasi dan transformasi logam berat (Tang *et al.*, 2020; Zhai *et al.*, 2020). Selenium diketahui menghambat penyerapan Cd pada sel akar padi dengan cara (1) menebalkan lapisan plak besi pada permukaan akar dan hambatan apoplastik pada endodermis, dan (2) menurunkan aktivitas protein transporter (Wang *et al.*, 2014). Sulfur dan fosfat merupakan unsur kation yang berkompetisi dengan Cd dalam hal penyerapan dan translokasi serta

mengganggu stabilitas ikatan Cd dengan gugus sulfhidril sehingga menurunkan transportasi Cd ke dalam jaringan padi. Silikon juga bekerja menghalangi translokasi Cd dari akar menuju tajuk melalui mekanisme deposisi Cd pada lapisan endodermis akar.

Pada prinsip yang sama, penambahan unsur boron menyebabkan Cd terikat pada senyawa immobilisator seperti glutation sehingga hal ini tentunya mereduksi ketersediaan dan uptake Cd. Gypsum titanium merupakan produk samping industri titanium dioksida yang mengandung nutrisi penting berupa S, Fe dan Ca yang cukup untuk pertumbuhan tanaman. Sulfur dan besi dalam titanium memicu pembentukan plak besi pada permukaan akar, meningkatkan kelat Cd dan sekuestrasi vakuola di akar (Cao *et al.*, 2018). Namun demikian perlu kehati-hatian dan evaluasi dalam menggunakan amandemen dari unsur kimia tersebut. Kalsium meningkatkan pH tanah sehingga meminimalisasi ketersediaan Cd, tetapi pada konsentrasi yang berlebih menyebabkan pengasaman tanah sehingga meningkatkan kelarutan Cd (Du *et al.*, 2018). Penggunaan pupuk kimia dengan konsentrasi tinggi akan bersifat racun dan mengganggu pertumbuhan padi.

Selain pupuk kimia, biochar dapat digunakan sebagai bahan amandemen karena kemampuannya dalam immobilisasi Cd. Biochar adalah karbon organik yang memiliki porositas tinggi yang dihasilkan dari proses pirolisis bahan organik. Biochar bersifat alkalin dengan nilai KTK yang

tinggi dan mampu meningkatkan aktivitas biologi dan kesuburan tanah. Hal ini dapat dijelaskan melalui aktivitas kapasitas tukar kation Cd dengan K^+ , Na^+ , S , Ca^{+2} dan Mg^{+2} pada permukaan biochar (Paz-Ferreiro *et al.*, 2014) sehingga kemampuan biochar yang tinggi dalam mengkelat logam berat tersebut menyebabkan Cd tidak tersedia lagi bagi akar. Mobilitas Cd cenderung tinggi pada beberapa kondisi tanah seperti tanah dengan pH asam, mempunyai bahan organik yang rendah, dan memiliki kapasitas tukar kation yang tinggi (Zheng *et al.*, 2020). Kondisi tersebut berperan dalam meningkatkan faktor biokonsentrasi (BCF) Cd yang tinggi di tanah. Jika nilai BCF tinggi maka bioavailabilitas Cd di tanah menjadi tersedia dan mudah diabsorpsi oleh akar tanaman. Kombinasi penambahan biochar dan asam organik juga sangat konduktif dalam meningkatkan pH tanah sehingga mampu menurunkan ketersediaan Cd tanah. Selain itu kombinasi biochar dengan komposit mikroba mengubah fraksi Cd tanah dalam bentuk kurang labil sehingga sangat efisien dalam mengurangi serapan Cd baik di jaringan akar maupun bulir padi (Liu *et al.*, 2020).

Bioremediasi logam berat Cd dengan memanfaatkan mikroba merupakan remediasi alternatif yang efisien dalam mengatasi cemaran Cd di lingkungan. Mikroba yang diaplikasikan adalah mikroorganisme tanah yang toleran terhadap logam berat. Beberapa strain bakteri resisten-logam berat telah dilaporkan mampu menurunkan ketersediaan Cd dalam tanah dan juga akumulasinya dalam jaringan tanaman padi. Mikroba ini mampu menstabilkan Cd baik secara biosorpsi, biomineralisasi, bioakumulasi dan biotransformasi. Inokulasi mikroba pada biji, bagian perakaran dan atau media tanam tidak menghambat pertumbuhan tanaman bahkan menghasilkan metabolit penting yang menstimulasi pembelahan dan pemanjangan sel tumbuhan padi pada kondisi stres logam berat (Ayangbenro dan Babalola, 2017)

Asam jasmonat dan asam salisilat merupakan hormon stres yang bekerja dalam memperbaiki kerusakan sel dan jaringan akibat perubahan

lingkungan yang ekstrem. Penambahan fitohormon eksogen tersebut dilaporkan meningkatkan ketahanan padi terhadap cekaman Cd (Singh dan Shah, 2014; Wang *et al.*, 2021). Kedua fitohormon ini bertindak sebagai molekul sinyal yang mengaktifkan metabolisme dan aktivitas enzim antioksidan yang meredam stres oksidatif, serta memodulasi gen transporter penting dalam menghambat transportasi aliran Cd menuju tajuk. Proses fisiologi tersebut mendukung remediasi logam berat padi dengan prinsip menurunkan uptake Cd^{2+} dan memperbaiki integritas membran akibat kerusakan oksidatif (Singh dan Shah, 2014; Wang *et al.*, 2021)..

Golongan asam organik merupakan jenis kelator lainnya yang digunakan untuk mengikat logam berat dari tanah yang terkontaminasi. Mekanisme interaksi asam organik dan Cd dapat dijelaskan melalui pengikatan kation dengan sisi karboksil. Beberapa jenis asam organik yang diketahui mempunyai kemampuan mengkelat Cd adalah asam sitrat dan asam malat. Asam sitrat mempunyai kemampuan untuk berikatan dengan Cd melalui tiga gugus karboksil yang dapat berikatan dengan tiga ion Cd^{2+} , sementara asam malat dapat mengikat dua ion Cd^{2+} melalui gugus karboksilnya. Sistem interaksi asam organik-Cd ini dapat berlangsung pada tanah maupun pada tingkat seluler padi terutama di bagian vakuola akar padi. Asam malat diketahui mampu meningkatkan aktivitas akar dalam memblokir migrasi Cd menuju tajuk dan menurunkan efek toksik dari Cd sehingga banyak digunakan sebagai bentuk mitigasi pada lahan tercemar logam berat (Hawrylak-Nowak *et al.*, 2015). Studi terkait pemberian asam organik selain malat dan sitrat yaitu asam fumarat, asam suksinat dan golongan asam organik lainnya pada padi yang tercemar logam berat masih belum banyak diobservasi. Oleh sebab itu, penelitian terkait hal ini perlu dikembangkan lebih lanjut khususnya pada padi varietas lokal yang perlu ditingkatkan kemampuannya dalam merespon cemaran logam berat.

Tabel 2. Respon fisiologi tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dalam proses mitigasi dan remediasi logam berat kadmium. (*The physiological response of paddy plants (Oryza sativa* L.) in the mitigation and remediation processes of Cadmium heavy metal).

Konsentrasi Cd (Concentrations of Cd)	Varietas (Varieties)	Teknik mitigasi (Mitigation techniques)	Mekanisme respon fisiologi tanaman (Mechanisms of plant physiological response)	Referensi (References)
Stabilisasi unsur kimia				
1,32 mg kg ⁻¹	Chuanxiang 8	Penambahan 1 mg Se (Na ₂ SeO ₃) kg ⁻¹ tanah dalam kondisi tergenang selama 35 hari.	Mereduksi kadar MDA dan H ₂ O ₂ , meningkatkan antioksidan (APX, GR, SOD, CAT, GSH-PX), mengurangi level Cd pada akar, dan menginisiasi pembentukan plak besi di permukaan akar.	(Qingqing <i>et al.</i> , 2019)
0,44 ± 0,04 mg kg ⁻¹	Yuzhenxiang	Penyemprotan daun dengan sulfur (Na ₂ S) dan fosfat (NaH ₂ PO ₄) 0.5 – 1.5 g L ⁻¹ pada fase vegetatif (<i>tillering</i>) dan reproduktif dalam kondisi tergenang.	Menghambat absorpsi Cd (di akar, batang, daun dan biji) melalui remobilisasi uptake and translokasi Cd, meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan generatif padi, mereduksi konsentrasi MDA, meningkatkan aktivitas antioksidan (SOD, CAT dan POD) di daun, dan bloking Cd melalui gugus sulfhidril protein.	(Liu <i>et al.</i> , 2019)
0,5 mg kg ⁻¹	Xiushui 03	Penambahan 0.15% gipsum titanium (150 mg S kg ⁻¹ , 32 mg Fe kg ⁻¹ , 200 mg Ca kg ⁻¹) dan 0.3% (300 mg S kg ⁻¹ , 64mg Fe kg ⁻¹ , 400 mg Ca kg ⁻¹) sampai masa panen dalam kondisi tergenang.	Meningkatkan parameter pertumbuhan (total biomassa tanaman, biomassa bulir, dan tinggi tanaman), membatasi akumulasi Cd pada bulir, meningkatkan kelat Mn pada plak besi di permukaan akar sehingga mengeliminasi Cd, meningkatkan kelat Cd terhadap S.	(Zhai <i>et al.</i> , 2020)
1,00 μmol L ⁻¹ (CdCl ₂)	Huanghuazhan	Penyemprotan 25 mL SiO ₂ 5 mmol L ⁻¹ (silika hidrosol) pada fase vegetatif (<i>seedling</i> dan <i>tilling</i>) dan fase pemasakan (<i>maturity</i>). Padi ditumbuhkan dalam larutan hidroponik Kimura B.	Meningkatkan biomasa batang dan bulir padi pada fase anakan dan pengisian biji, mereduksi konsentrasi Cd (di batang, daun, dan bulir padi) pada fase pengisian biji, mereduksi translokasi Cd dari akar ke tajuk, meningkatkan aktivitas biologi (transporter hara, biosintesis karbohidrat dan metabolit sekunder, dan sitokrom oksidase).	(Sun <i>et al.</i> , 2022)
2 mg Cd L ⁻¹ (CdCl ₂)	Huanghuazhan	Penambahan 2 mg B L ⁻¹ (H ₃ BO ₃) pada media tanam hidroponik ½ Hoagland selama 5 hari.	Menghambat uptake dan translokasi Cd, mereduksi akumulasi Cd pada akar dan tajuk kecambah padi, memperbaiki biomasa tajuk dan akar, mengkelat Cd di dinding sel akar dengan meningkatkan kompartemensi Cd melalui senyawa immobilisator (lignin, enzim pektin, sulfur, dan glutation).	(Huang <i>et al.</i> , 2021)
Biochar-mikroba				
1,25 mg kg ⁻¹	Zhongzao 39	Penambahan 4x10 ¹⁰ biochar batang jagung-komposit bakteri (BMCs) <i>Delftia</i> sp. B9 pada tanah dengan perbandingan 0,5% w/w dalam kondisi tergenang selama masa panen	Mereduksi akumulasi Cd di akar, menstabilkan residu Cd di tanah, dan meningkatkan massa bulir padi	(Liu <i>et al.</i> , 2020)

Tabel 2. Respon fisiologi tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dalam proses mitigasi dan remediasi logam berat kadmium. (*The physiological response of paddy plants (Oryza sativa L.) in the mitigation and remediation processes of Cadmium heavy metal*).

Konsentrasi Cd (Concentrations of Cd)	Varietas (Varieties)	Teknik mitigasi (Mitigation techniques)	Mekanisme respon fisiologi tanaman (Mechanisms of plant physiological response)	Referensi (References)
1,0 mg kg ⁻¹	T705	Inokulasi <i>Bacillus cereus</i> M4 selama 24 jam pada bibit padi berumur 28 hari dan aplikasi <i>fermentation broth B. cereus</i> M4 pada tanah saat fase vegetatif (<i>tillering</i>) dan fase pemasakan (<i>filling</i>)	Menghambat migrasi Cd dari tanah ke akar, mereduksi akumulasi Cd (di akar, daun bendera, rachis, dan bulir padi), meningkatkan biomasa akar dan tajuk, menginisiasi pengisian biji, mencerahkan warna daun, dan memproduksi variasi metabolit bioaktif seperti IAA.	(Wang <i>et al.</i> , 2019)
200 mg L ⁻¹ (CdCl ₂)	Xiangzaoxian 24 (X24) dan Tyou 705 (T705)	Inokulasi bakteri <i>Burkholderia</i> sp. Y4 (10 ⁷ cfu mL ⁻¹) pada akar bibit padi yang ditumbuhkan dalam media vermikulit selama 24 jam dan aplikasi 10 ¹⁰ sel <i>fermentation broth B. sp Y4</i> sebagai pupuk pada tanah saat fase vegetatif (<i>tillering</i>) dan reproduktif (<i>heading</i>).	Mereduksi akumulasi Cd (di akar, rachis dan bulir padi), membentuk biosorpsi Cd dengan ikatan amino dan protein di permukaan akar, meningkatkan elemen esensial Fe dan Mn di rachis dan biji padi, memodulasi siklus nitrogen dan besi sehingga meningkatkan stok nutrisi di rhizosfer tanah.	(Wang <i>et al.</i> , 2020)
5 dan 10 mg kg ⁻¹	PI312777	Inokulasi bakteri <i>Pseudomonas</i> TCD-1 (3.11 × 10 ⁹ sel mL ⁻¹) pada tanah dengan perbandingan 2% (v/w) saat padi berumur 7 hari setelah semai. Pengamatan dilakukan pada tahap vegetatif (<i>tillering</i>), tahap reproduktif (<i>heading</i>), dan tahap pemasakan (<i>ripening</i>).	Menginduksi pertumbuhan biomasa total dan biomasa bulir padi, mereduksi uptake dan akumulasi Cd (di akar, batang, daun, sekam dan bulir padi) serta mereduksi kapasitas absorpsi Cd dengan cara meningkatkan pH tanah, aktivitas enzim (CAT, SUC, urease dan ACP) di rizosfer tanah, konversi ketersediaan Cd di tanah melalui fraksinasi OX-Cd dan EX-Cd.	(Wang <i>et al.</i> , 2021)
0–400 µg mL ⁻¹	Prateeksha (IET15191)	Inokulasi bakteri <i>Enterobacter aerogenes</i> MCC 3092 (isolat K6) pada biji padi yang ditumbuhkan di media <i>in vitro</i> dalam <i>growth</i>	Mereduksi ketersediaan Cd di rizosfer dan mobilisasi di jaringan, meredam toksik Cd, memicu pertumbuhan (tajuk dan akar), meningkatkan kandungan klorofil, mempertahankan homeostatis redoks, mereduksi MDA dan stressor etilen, serta meningkatkan kelarutan fosfat dan fiksasi N ₂ .	(Pramanik <i>et al.</i> , 2018)

Tabel 2. Respon fisiologi tanaman padi (*Oryza sativa* L.) dalam proses mitigasi dan remediasi logam berat kadmium. (*The physiological response of paddy plants (Oryza sativa* L.) in the mitigation and remediation processes of Cadmium heavy metal).

Konsentrasi Cd (Concentrations of Cd)	Varietas (Varieties)	Teknik mitigasi (Mitigation techniques)	Mekanisme respon fisiologi tanaman (Mechanisms of plant physiological response)	Referensi (References)
Fitohormon				
50 µM Cd(NO ₃) ₂	HUR3022	Penambahan 5 µM metil jasmonat (MeJA) pada bibit padi berumur 10 hari yang ditumbuhkan dalam Hoagland di <i>growth chamber</i> selama 10 hari.	Meningkatkan respon sistem antioksidan (CAT, SOD, POD, dan GR), menurunkan uptake Cd, dan memperbaiki kerusakan integritas membran.	(Singh dan Shah, 2014)
1 mg kg ⁻¹	Xiushui 110	Penyemprotan daun dengan asam salisilat/ SA (0.1 mM) pada fase vegetatif (<i>tillering stage</i>) dan reproduktif (<i>heading dan flowering stage</i>)	Mengaktifasi SA sebagai sinyal molekuler yang meningkatkan aktivitas enzim antioksidan (reduksi H ₂ O ₂), meredam toksisitas Cd, mereduksi translokasi dan akumulasi Cd di bulir padi, serta meningkatkan tinggi dan biomasa tajuk.	(Wang <i>et al.</i> , 2021)
Asam organik				
25 µM (CdCl ₂)	MTU 7029	Penambahan sitrat dan malat (50 µM) pada padi yang berumur 5 hari yang ditumbuhkan dalam media ½ Hoagland selama 14 hari pengamatan.	Lokalisasi kompleks Cd-asam karboksilat di vakuola akar sehingga mereduksi translokasi Cd, meningkatkan akumulasi Fe di daun, meningkatkan antioksidan glutation yang berfungsi dalam sintesis fitokelatin dan kelasi Cd dalam vakuola, meningkatkan pigmen fotosintetik (antosianin, klorofil, dan karotenoid).	(Sebastian dan Prasad, 2018)

KESIMPULAN

Upaya yang dapat dilakukan untuk mempertahankan ketahanan padi dan mendukung pangan yang aman dan sehat dari Cd adalah melalui terapan mitigasi baik dengan cara menambahkan bahan amandemen dari unsur kimia (selenium, sulfur, fosfat, titanium gipsum, silikon, dan boron), biochar, komposit bakteri toleran Cd (*Bacillus cereus* M4, *Delftia sp.* B9, *Burkholderia sp.* Y4, *Pseudomonas* TCd-1, dan *Enterobacter aerogenes* MCC 3092), fitohormon eksogen (metil jasmonat dan asam salisilat), dan asam organik (sitrat dan malat). Hal ini akan sangat membantu dalam meningkatkan eksklusi Cd, mengurangi endapan Cd dalam bulir padi, dan memicu aktivitas sistem antioksidan. Upregulasi gen penting, seperti

OsHMA2, *OsLCT1*, *OsZIP3*, *OsHMA3*, *OsCDT1*, *OsIRT1*, *OsSOD*, *OsABCG36*, *OsNRAMP5*, *OsPCS* dan *OsSMP1* pada varietas padi toleran Cd akan sangat menguntungkan jika dilakukan pemuliaan non konvensional tanaman melalui teknik rekayasa genetika pada tanaman padi lokal Indonesia. Untuk mewujudkan upaya mitigasi cemaran Cd pada tanaman padi, beberapa langkah perencanaan dapat dilakukan dalam hal (i) skrining lahan pertanian di Indonesia terutama yang berpotensi tercemar Cd, (ii) penelitian eksperimental yang memanfaatkan aplikasi bioamandemen dan insersi gen responsif Cd untuk menghasilkan tanaman transgenik tahan Cd secara berkelanjutan, serta (iii) produksi dan diseminasi bioproduk komersial untuk bioremediasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, M., Yu, M., Tang, C., Zhang, L., Muhammad, N., Zhao, H., Feng, J., Yu, L and Xu, J., 2019. The negative impact of cadmium on nitrogen transformation processes in a paddy soil is greater under non-flooding than flooding conditions. *Environment International*, 129, pp. 451–460.
- Ai, H., Wu, D., Li, C and Hou, M., 2022. Advances in molecular mechanisms underlying cadmium uptake and translocation in rice. *Frontiers in Plant Science*, 13, pp. 1003953.
- Åkesson, A and Chaney, R.L., 2019. Cadmium exposure in the environment: Dietary exposure, bioavailability and renal effects. *Encyclopedia of Environmental Health*, 1, pp. 475–484.
- Ayangbenro, A.S and Babalola, O.O., 2017. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(1), pp. 1–16.
- Badan Standardisasi Nasional., 2009. *Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan*. BSN. Jakarta. pp. 1–25.
- Bari, M.A., Akther, M.S., Reza, M.A and Kabir, A.H., 2019. Cadmium tolerance is associated with the root-driven coordination of cadmium sequestration, iron regulation and ROS scavenging in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 136, pp. 22–33.
- Cao, Z.Z., Qin, M.L., Lin, X.Y., Zhu, Z.W and Chen, M.X., 2018. Sulfur supply reduces cadmium uptake and translocation in rice grains (*Oryza sativa* L.) by enhancing iron plaque formation, cadmium chelation and vacuolar sequestration. *Environmental Pollution*, 238, pp. 76–84.
- Chang, J.-D., Huang, S., Konishi, N., Wang, P., Chen, J., Huang, X., Ma, J.F and Zhao, F.-J., 2019. Overexpression of the manganese/cadmium transporter OsNRAMP5 reduces cadmium accumulation in rice grain. *Journal of Experimental Botany*, 71(18), pp. 5705–5715.
- Chiao, W., Syu, C., Chen, B and Juang, K., 2019. Cadmium in rice grains from a field trial in relation to model parameters of Cd-toxicity and -absorption in rice seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, pp. 837–847.
- Chmielowska-Bąk, J., Gzyl, J., Rucińska-Sobkowiak, R., Arasimowicz-Jelonek, M and Deckert, J., 2014. The new insights into cadmium sensing. *Frontiers in Plant Science*, 5, pp. 1–13.
- Das, K and Roychoudhury, A., 2014. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2, pp. 1–13.
- Das, N., Bhattacharya, S., Bhattacharyya, S and Maiti, M.K., 2017. Identification of alternatively spliced transcripts of rice phytochelatin synthase 2 gene OsPCS2 involved in mitigation of cadmium and arsenic stresses. *Plant Molecular Biology*, 94 (1–2), pp. 167–183.
- Dodd, A.N., Kudla, J and Sanders, D., 2010. The language of calcium signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 61, pp. 593–620.
- Du, Y., Wang, X., Ji, X., Zhang, Z., Saha, U. K., Xie, W., Xie, Y., Wu, J., Peng, B and Tan, C., 2018. Effectiveness and potential risk of CaO application in Cd-contaminated paddy soil. *Chemosphere*, 204, pp. 130–139.
- Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U and Roy, S., 2018. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling and Behavior*, 13(8), pp. 1–17.
- Fahad, S., Rehman, A., Shahzad, B., Tanveer, M., Saud, S., Kamran, M., Ihtisham, M., Khan, S. U., Turan, V and ur Rahman, M.H., 2018. Rice responses and tolerance to metal/metalloid toxicity. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. pp. 299–312.
- Feng, W., Guo, Z., Xiao, X., Peng, C., Shi, L., Ran, H and Xu, W., 2019. Atmospheric deposition as a source of cadmium and lead to soil-rice system and associated risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, pp. 160–167.
- Fu, S., Lu, Y., Zhang, X., Yang, G., Chao, D., Wang, Z., Shi, M., Chen, J., Chao, D.-Y., Li, R., Ma, J.F and Xia, J., 2019. The ABC transporter OsABCG36 is required for Cd tolerance in rice. *Journal of Experimental Botany*, 70(20), pp. 5909–5918.
- Ge, C. lin, Wang, Z. gang, Wan, D. zhen, Ding, Y., Wang, Y. long, Shang, Q and Luo, S., 2009. Proteomic Study for Responses to Cadmium Stress in Rice Seedlings. *Rice Science*, 16(1), pp. 33–44.
- Gill, S.S and Tuteja, N., 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), pp. 909–930.
- Harteman, E., Soedharma, D., Winarto, A dan Sanusi, H.S., 2008. Deteksi logam berat pada perairan, sedimen dan sirip ikan badukang (*Arius caelatus* dan *A. maculatus*) di Muara

- Sungai Kahayan dan Sungai Katingan, Kalimantan Tengah. *Berita Biologi*, 9(3), pp. 275–283.
- Hashimoto, Y and Yamaguchi, N., 2013. Chemical speciation of cadmium and sulfur K-Edge XANES spectroscopy in flooded paddy soils amended with zerovalent iron. *Soil Chemistry*, 77, pp. 1189–1198.
- Hassan, M.J., Raza, M.A., Rehman, S.U., Ansar, M., Gitari, H.G., Khan, I., Wajid, M., Ahmed, M and Ghulam Abbas Shah 3, Y.P.1 and Z. L., 2020. Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants*, 9(11), pp. 1575.
- Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S and Matraszek, R., 2015. Exogenous malic and acetic acids reduce cadmium phytotoxicity and enhance cadmium accumulation in roots of sunflower plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 94, pp. 225–234.
- Huang, Y., Fei, G., Yu, S., Liu, Y., Fu, H., Liao, Q., Huang, B., Liu, X., Xin, J and Shen, C., 2021. Molecular and biochemical mechanisms underlying boron-induced alleviation of cadmium toxicity in rice seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225, pp. 112776.
- Huang, Y., Chen, H., Reinfelder, J. R., Liang, X., Sun, C., Liu, C., Li, F and Yi, J., 2019. A transcriptomic (RNA-seq) analysis of genes responsive to both cadmium and arsenic stress in rice root. *Science of the Total Environment*, 666, pp. 445–460.
- Hussain, B., Nadeem, M., Abbas, A., Li, J and Farooq, M., 2021. Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies. *Science of the Total Environment*, 754, pp. 142188.
- Jalmi, S.K., Bhagat, P.K., Verma, D., Noryang, S., Tayyeba, S., Singh, K., Sharma, D and Sinha, A.K., 2018. Traversing the links between heavy metal stress and plant signaling. *Frontiers in Plant Science*, 9, pp. 1–21.
- Jalmi, S.K and Sinha, A.K., 2015. ROS mediated MAPK signaling in abiotic and biotic stress-striking similarities and differences. *Frontiers in Plant Science*, 6, pp. 1–9.
- Jiang, M., Jiang, J., Li, S., Li, M., Tan, Y., Song, S., Shu, Q and Huang, J., 2020. Glutamate alleviates cadmium toxicity in rice via suppressing cadmium uptake and translocation. *Journal of Hazardous Materials*, 395, pp. 395–409.
- Kaleem, M., Shabir, F., Hussain, I., Hameed, M., Ahmad, M.S.A., Mehmood, A., Ashfaq, W., Riaz, S., Afzaal, Z., Maqsood, M.F., Iqbal, U., Shah, S.M.R and Irshad, M., 2022. Alleviation of cadmium toxicity in *Zea mays* L. through up-regulation of growth, antioxidant defense system and organic osmolytes under calcium supplementation. *PLoS ONE*, 17, pp. 1–23.
- Khaokaew, S., Chaney, R.L., Landrot, G., Ginder-vogel, M and Sparks, D.L., 2011. Speciation and release kinetics of cadmium in an alkaline paddy soil under various flooding periods and draining conditions. *Environmental Science and Technology*, 45, pp. 4249–4255.
- Khasanah, U., Mindari, W dan Suryaminarsih, P., 2021. Kajian pencemaran logam berat pada lahan sawah di kawasan industri Kabupaten Sidoarjo. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2). pp. 73–81.
- Li, H., Luo, N., Li, Y.W., Cai, Q.Y., Li, H.Y., Mo, C.H and Wong, M.H., 2017. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environmental Pollution*, 224, pp. 622–630.
- Li, Z., Liang, Y., Hu, H., Shaheen, S.M., Zhong, H., Tack, F.M.G., Wu, M., Li, Y.F., Gao, Y., Rinklebe, J and Zhao, J., 2021. Speciation, transportation and pathways of cadmium in soil-rice systems: A review on the environmental implications and remediation approaches for food safety. *Environment International*, 156, pp. 106749.
- Liu, J., Hou, H., Zhao, L., Sun, Z., Lu, Y and Li, H., 2019. Mitigation of Cd accumulation in rice from Cd-contaminated paddy soil by foliar dressing of S and P. *Science of the Total Environment*, 690, pp. 321–328.
- Liu, Y., Tie, B., Peng, O., Luo, H., Li, D., Liu, S., Lei, M., Wei, X., Liu, X and Du, H., 2020. Inoculation of Cd-contaminated paddy soil with biochar-supported microbial cell composite: A novel approach to reducing cadmium accumulation in rice grains. *Chemosphere*, 247, pp. 125850.
- Meriem, S., Mulyah, E., Angio, M.H and Triadiati, T., 2021. The Physiological responses of *Zea mays* L. and *Cucumis sativus* L. on drought stress and re-watering. *Jurnal Biodjati*, 6(2), pp. 190–202.
- Ogawa, I., Nakanishi, H., Mori, S and Nishizawa, N.K., 2009. Time course analysis of gene regulation under cadmium stress in rice. *Plant and Soil*, 325(1), pp. 97–108.
- Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A and Gascó, G., 2014. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review. *Solid Earth*, 5(1), pp. 65–75.
- Pramanik, K., Mitra, S., Sarkar, A and Maiti, T.K.,

2018. Alleviation of phytotoxic effects of cadmium on rice seedlings by cadmium resistant PGPR strain *Enterobacter aerogenes* MCC 3092. *Journal of Hazardous Materials*, 351, pp. 317–329.
- Punjee, P., Siripornadulsil, W and Siripornadulsil, S., 2018. Reduction of cadmium uptake in rice endophytically colonized with the cadmium-tolerant bacterium *Cupriavidus taiwanensis* KKU2500-3. *Canadian Journal of Microbiology*, 64(2), pp. 131–145.
- Qing, Y., Yang, J., Zhu, Y., Li, Y., Ma, W., Zhang, C., Li, X., Wu, M., Wang, H., Kauffman, A. E., Xiao, S., Zheng, W and He, G., 2020. Cancer risk and disease burden of dietary cadmium exposure changes in Shanghai residents from 1988 to 2018. *Science of the Total Environment*, 734(130), pp. 139411.
- Qingqing, H., Yiyun, L., Xu, Q., Lijie, Z., Xuefeng, L and Yingming, X., 2019. Selenite mitigates cadmium-induced oxidative stress and affects Cd uptake in rice seedlings under different water management systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, pp. 486–494.
- Ren, Q., Xu, Z., Xue, Y., Yang, R., Ma, X., Sun, J., Wang, J., Lin, S., Wang, W., Yang, L and Sun, Z., 2022. Mechanism of calcium signal response to cadmium stress in duckweed. *Plant Signaling and Behavior*, 17(1), pp. 1–11.
- Rodda, M. S., Li, G and Reid, R.J., 2011. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering. *Plant Soil*, 347, pp. 105–114.
- Roychowdhury, R., Khan, M.H and Choudhury, S., 2018. Physiological and molecular responses for metalloids stress in rice—a comprehensive overview. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. pp. 341–369.
- Sebastian, A and Prasad, M.N.V., 2018. Exogenous citrate and malate alleviate cadmium stress in *Oryza sativa* L.: Probing role of cadmium localization and iron nutrition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166, pp. 215–222.
- Sigel, A., Sigel, H and Sigel, R.K.O., 2013. Cadmium: From toxicity to essentiality. In *Metal Ions in Life Sciences* (Vol. 11).
- Singh, I and Shah, K., 2014. Exogenous application of methyl jasmonate lowers the effect of cadmium-induced oxidative injury in rice seedlings. *Phytochemistry*, 108, pp. 57–66.
- Sun, C., Liang, X., Gong, X., Chen, H., Liu, X., Zhang, S., Li, F., Zhao, J and Yi, J., 2022. Comparative transcriptomics provide new insights into the mechanisms by which foliar silicon alleviates the effects of cadmium exposure in rice. *Journal of Environmental Sciences*, 115, pp. 294–307.
- Sutono, S dan Kurnia, U., 2012. Identifikasi kerusakan lahan sawah di Rancaekek Kabupaten Bandung, Jawa Barat. *Prosiding Seminar Nasional Pertanian Ramah Lingkungan*, pp. 283–296.
- Tang, Z., Fan, F., Deng, S and Wang, D., 2020. Mercury in rice paddy fields and how does some agricultural activities affect the translocation and transformation of mercury - A critical review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 202, pp. 110950.
- Tian, S., Liang, S., Qiao, K., Wang, F., Zhang, Y and Chai, T., 2019. Co-expression of multiple heavy metal transporters changes the translocation, accumulation, and potential oxidative stress of Cd and Zn in rice (*Oryza sativa*). *Journal of Hazardous Materials*, 380, pp. 120853.
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M.R and Montanarella, L., 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, pp. 299–309.
- Wang, C., Huang, Y., Yang, X., Xue, W., Zhang, X., Zhang, Y., Pang, J., Liu, Y and Liu, Z., 2020. *Burkholderia* sp. Y4 inhibits cadmium accumulation in rice by increasing essential nutrient uptake and preferentially absorbing cadmium. *Chemosphere*, 252, pp. 126603.
- Wang, C., Liu, Z., Huang, Y., Zhang, Y., Wang, X and Hu, Z., 2019. Cadmium-resistant rhizobacterium *Bacillus cereus* M4 promotes the growth and reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72, pp. 103265.
- Wang, F., Tan, H., Zhang, Y., Huang, L., Bao, H., Ding, Y., Chen, Z and Zhu, C., 2021. Salicylic acid application alleviates cadmium accumulation in brown rice by modulating its shoot to grain translocation in rice. *Chemosphere*, 263, pp. 128034.
- Wang, X., Tam, N.F.Y., Fu, S., Ametkhan, A., Ouyang, Y and Ye, Z., 2014. Selenium addition alters mercury uptake, bioavailability in the rhizosphere and root anatomy of rice (*Oryza sativa*). *Annals of Botany*, 114(2), pp. 271–278.
- Wang, Y., Zheng, X., He, X., Lü, Q., Qian, X., Xiao, Q and Lin, R., 2021. Effects of *Pseudomonas* TCd-1 on rice (*Oryza sativa*) cadmium uptake, rhizosphere soils enzyme activities and cadmium bioavailability under cadmium contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 218, pp. 112249.
- Yoneyama, T., Ishikawa, S and Fujimaki, S., 2015.

- Route and regulation of zinc, cadmium, and iron transport in rice plants (*Oryza sativa* L.) during vegetative growth and grain filling: Metal transporters, metal speciation, grain Cd reduction and Zn and Fe biofortification. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(8), pp. 19111–19129.
- Zhai, W., Dai, Y., Zhao, W., Yuan, H., Qiu, D., Chen, J., Gustave, W., Charles, S., Chen, Z., Liu, X., Tang, X and Xu, J., 2020. Simultaneous immobilization of the cadmium, lead and arsenic in paddy soils amended with titanium gypsum. *Environmental Pollution*, 258, pp. 113790.
- Zhao, S., Zhang, Q., Xiao, W., Chen, D., Hu, J., Gao, N., Huang, M and Ye, X., 2023. Comparative transcriptomic analysis reveals the important process in two rice cultivars with differences in cadmium accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, pp. 114629.
- Zheng, S., Liu, S., Feng, J., Wang, W., Wang, Y., Yu, Q., Liao, Y., Mo, Y., Xu, Z., Li, L., Gao, X., Jia, X., Zhu, J and Chen, R., 2021. Overexpression of a stress response membrane protein gene OsSMP1 enhances rice tolerance to salt, cold and heavy metal stress. *Environmental and Experimental Botany*, 182, pp. 104327.
- Zheng, S., Wang, Q., Yu, H., Huang, X and Li, F., 2020. Interactive effects of multiple heavy metal(loid)s on their bioavailability in cocontaminated paddy soils in a large region. *Science of the Total Environment*, 708, pp. 135126.