

PENCEMARAN KADMIUM DAN PROSPEK PEMULIAAN TANAMAN KEDELAI BERKANDUNGAN KADMIUM RENDAH

Ayda Krisnawati ¹⁾

ABSTRAK

Pencemaran kadmium dan prospek pemuliaan tanaman kedelai berkadungan Kadmium rendah. Kadmium (Cd) merupakan logam berat pencemar lingkungan yang bersifat toksik. Kadmium dapat terakumulasi dalam kadar yang tinggi pada bagian tanaman kedelai (*Glycine max* L. Merr.) yang bila dikonsumsi akan berisiko pada kesehatan manusia, sehingga diperlukan usaha-usaha untuk membatasi akumulasi kadmium dalam tanaman. Penggunaan varietas unggul yang memiliki kemampuan mengakumulasi kadmium dalam konsentrasi yang rendah merupakan salah satu solusi yang cukup rasional. Varietas unggul merupakan komponen teknologi yang efisien dan ramah lingkungan dibandingkan dengan upaya perbaikan kondisi lingkungan. Di Indonesia, penelitian pemuliaan belum mengarah pada pencemaran kadmium pada tanaman kedelai. Namun dengan adanya ekstensifikasi pertanian dan sumber pangan sehat yang menyangkut, maka penelitian tentang kadmium pada tanaman kedelai akan menjadi informasi yang dapat bermanfaat dalam perakitan varietas kedelai berkadungan kadmium rendah. Variabilitas genetik, pemilihan teknik skrining dengan kriteria seleksi yang tepat, pemahaman mekanisme ketahanan disertai dukungan pengetahuan level molekuler merupakan elemen penting dalam meraih keberhasilan perakitan kedelai berkadungan kadmium rendah.

Kata kunci: kadmium, *Glycine max*, kedelai, pemuliaan.

ABSTRACT

Cadmium pollution and soybean breeding for low-Cadmium. Cadmium (Cd) is a heavy-metal pollutant that is toxic to the environment. Cadmium can accumulate in high levels in the soybean plant, and consumption of cadmium contaminated foods poses a risk to human health, so it is need an effort to limit the accumulation of cadmium in crop plants. The use of high-yielding varieties which have the ability to accumulate cadmium in low concentra-

tions is one solution, which is quite reasonable. An improved variety is a component of an efficient technology and environmentally friendly compared to the effort to repair the environmental conditions. In Indonesia, breeding research has not led to pollution of cadmium on soybean (*Glycine max* L. Merr.) plants. However, with the extensification of agriculture for food source, then the study of cadmium on soybean crop will be a beneficial information for developing soybean variety with low cadmium. Genetic variability, selection of screening techniques with appropriate selection criteria, understanding of resistance mechanisms, as well as knowledge of the molecular level is important elements in the successfulness of soybean breeding for low-cadmium.

Key words: cadmium, *Glycine max*, soybean, breeding.

PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) merupakan logam berat pencemar tanah yang bersifat toksin bagi tumbuhan, hewan, dan manusia. Penyebaran kadmium di alam maupun di lingkungan pertanian merupakan akibat kegiatan manusia. Pencemaran kadmium pada lahan pertanian mulai mendapat perhatian yang serius di beberapa negara dikarenakan kadmium dapat terserap dalam tanaman yang dikonsumsi oleh masyarakat. Penyerapan kadmium oleh tanaman bervariasi tidak hanya antar spesies tanaman tetapi juga di antara kultivar (Arao *et al.* 2003).

Serapan logam dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk iklim dan faktor genetik tanaman, serta beberapa parameter tanah. Kondisi tanah, antara lain pH, konsentrasi Cd, rasio Cd:Zn, konsentrasi klorida, serta tingkat penyerapan logam dan bahan organik, secara signifikan mempengaruhi serapan kadmium. Pengaruh pH tanah terhadap serapan Cd oleh tanaman berdasarkan beberapa penelitian terlihat kurang konsisten. Percobaan di rumah kaca menggunakan tanah yang diperkaya Cd menunjukkan peningkatan ketersediaan kadmium pada tanah dengan pH yang lebih rendah. Namun, konsentrasi kadmium di percobaan lapang berkorelasi negatif dengan pH tanah, atau memiliki efek yang kurang signifikan (Chaney *et al.* 2001 dalam Synkowski 2004). Umumnya, tanaman mengambil Cd dan Zn

¹⁾ Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi
Jl. Raya Kendalpayak km 7, Kotak Pos 66 Malang
65101 Indonesia Telp. 0341-801468, Faks. 0341-
801496, email: my_ayda@yahoo.com

Naskah diterima tanggal 15-10-2012, disetujui
untuk diterbitkan tanggal 27-9-2013.

Diterbitkan di Buletin Palawija No. 26-2013: 61-71.

dalam rasio yang sama dengan rasio logam umumnya ditemukan di tanah (1 Cd : 100 Zn). Oleh karena itu, ketika konsentrasi Zn yang menyebabkan kerusakan pada tanaman pada 500 ppm, biomassa akan hanya memiliki konsentrasi Cd sebesar 5 ppm, kecuali untuk padi dan tembakau yang rasio Cd dan Zn secara signifikan menyimpang dari yang diharapkan. Jadi, untuk lahan tercemar yang memiliki rasio Cd:Zn mendekati 1:50, atau setidaknya dua kali lipat Cd yang tersedia dibandingkan dengan yang tersedia di alam, padi (atau tembakau) yang ditanam di tanah yang terkontaminasi memiliki potensi terbesar menjadi penyumbang kontaminan dalam tubuh manusia (Chaney *et al.* 2001, Chaney *et al.* 2001 dalam Synkowski 2004).

Kadmium dapat terakumulasi dalam tubuh manusia dari waktu ke waktu melalui konsumsi makanan yang mengandung kadmium dan mengarah ke risiko toksisitas kronis apabila terjadi asupan yang berlebihan. Efek merugikan terhadap kesehatan yang terkait dengan kadmium dalam tanah tergantung pada ketersediaan dan serapan logam oleh berbagai spesies tanaman. Di Jepang, kadmium diakui sebagai penyebab penyakit 'itai-itai' yang mewabah pada tahun 1968, sehingga The Codex Committee on Food Additives and Contaminants telah mengusulkan batas atas 0,2 mg kg⁻¹ untuk konsentrasi kadmium pada biji kedelai (Laporan Sidang ke-33 The Codex Committee on Food Additives and Contaminants 2001 dalam Kobori *et al.* 2010). Kadmium merupakan elemen non-esensial atau mikro elemen, sehingga menurut Environmental Protection Agency (EPA) dan Occupational Safety and Health Administration (OSHA), batas aman kadar kadmium dalam air minum adalah <5 ppb dan di lingkungan kerja adalah <100 µg/m³ sebagai Cd asap dan 200 µg/m³ sebagai Cd debu (Synkowski 2004). Sedangkan menurut badan dunia FAO/WHO, konsumsi per minggu yang ditoleransikan bagi manusia adalah 400–500 µg per orang atau 7 µg kg⁻¹ berat badan.

Di Indonesia, penelitian tentang pencemaran kadmium terhadap tanaman komoditas pertanian belum banyak dilakukan. Padahal terdapat indikasi bahwa di banyak lokasi pertanian, terutama di lahan sawah, perairan, dan kolam ikan, senyawa kimia limbah mulai mencemari lahan dan air irigasi, bahkan juga produk pertanian seperti padi dan ikan. Sebagai contoh, hasil penelitian Kurnia *et al.* (2004) menunjukkan bahwa kandungan berbagai jenis logam

berat (Hg, Pb, dan Cd) dalam tanah pada lahan yang terpolusi limbah pabrik di beberapa lokasi di Jawa Barat meningkat sekitar 18–98% dibanding lahan yang belum terkena polusi. Polusi logam berat tersebut, selain menyebabkan kontaminasi pada produk (terutama gabah/beras) juga menurunkan produktivitas tanaman (Las *et al.* 2006). Meskipun kadmium tidak penting untuk nutrisi tanaman, namun dapat dengan mudah diambil oleh akar dan terakumulasi dalam organ tanaman vegetatif dan reproduktif (Wagner 1993; Tamas *et al.* 2006). Oleh karena itu, konsumsi baik secara langsung maupun tidak langsung dari bagian tanaman yang dapat dimakan dengan tingkat konsentrasi kadmium yang tinggi dapat berpengaruh terhadap kesehatan manusia.

Tanaman kedelai sebagai salah satu sumber pangan pokok fungsional disebutkan mampu menyerap kadmium dalam konsentrasi yang tinggi (Wang *et al.* 2013), sehingga diperlukan usaha-usaha untuk membatasi akumulasi kadmium dalam tanaman. Beberapa metode untuk mengatasi pencemaran kadmium telah dilakukan di beberapa negara. Di Jepang, teknik ameliorasi tanah, manajemen air, dan penambahan alkali pada pertanaman padi yang tercemar kadmium telah diterapkan sejak tahun 1971. Selain itu, penggunaan bahan kimia pencuci (*washing chemicals*), logam kelat, garam netral dan asam kuat yang secara efisien dapat menghilangkan Cd dari tanah telah banyak dikaji dalam berbagai penelitian. Kelemahannya adalah pada mahalannya bahan kimia tersebut, di samping itu juga adanya beberapa bahan kimia tertentu disinyalir tidak ramah terhadap lingkungan (Makino *et al.* 2008; Makino *et al.* 2010). Teknik-teknik yang dikemukakan di atas memakan biaya mahal, sehingga kini mulai beralih pada pengembangan teknik fitoremediasi. Teknik ini memanfaatkan tumbuhan hiperakumulator (*Thlaspi caerulescens* dan *Brassica juncea*) untuk menghilangkan, menstabilkan atau menghancurkan kontaminan kadmium. Namun penerapan teknologi ini masih dalam tahap penelitian, dan masih dipertanyakan apakah dapat diterapkan pada lahan pertanaman padi maupun kedelai karena metode ini masih memerlukan penelitian mendalam tentang teknik budidaya tanaman hiperakumulator yang tepat (Ishikawa 2005).

Salah satu alternatif teknologi yang mudah dan efektif untuk mengatasi pencemaran kadmium apabila dibandingkan dengan metode perbaikan lahan adalah dengan merakit varie-

tas kedelai yang hanya mengakumulasi kadmium dalam konsentrasi yang rendah. Program ini dapat diawali dengan penelusuran variasi genetik yang terdapat dalam koleksi plasma nutfah. Selain itu, pengetahuan tentang pewarisan, heritabilitas, teknik skrining yang murah dan efektif, serta strategi pemuliaan lain yang efektif dan efisien diperlukan dalam menunjang keberhasilan perakitan varietas kedelai ber kandungan kadmium rendah.

Di Indonesia, penelitian pemuliaan belum mengarah pada pencemaran kadmium pada tanaman kedelai. Namun dengan adanya ekstensifikasi pertanian yang mengarah pada pemanfaatan lahan marjinal, dan adanya trend pangan fungsional yang menyehatkan; maka penelitian tentang kadmium pada tanaman kedelai akan menjadi informasi awal yang dapat bermanfaat dalam memulai proses perakitan varietas kedelai ber kandungan kadmium rendah.

Makalah ini mengkaji tentang pencemaran kadmium pada tanaman kedelai, pemuliaan dan seleksi, serta peluang pemuliaannya di Indonesia.

PENCEMARAN KADMIUM DAN EFEK TERHADAP MANUSIA DAN TUMBUHAN

Kadmium (Cd) merupakan logam berat pencemar tanah paling luas kedua di dunia (Michael 2003), yang sumbernya berasal dari kegiatan pertambangan dan peleburan biji, aplikasi pupuk, limbah pabrik, dan deposisi atmosfer. Kadmium tidak mudah menimbulkan korosi, dan paling sering digunakan untuk baterai, pigmen, pelapis logam, dan stabilisator plastik. Di alam, kadmium jarang sekali ditemukan dalam bentuk bebas, biasanya berada dalam bentuk kadmium oksida (CdO), kadmium klorida (CdCl₂) dan kadmium sulfat (CdSO₄ atau CdS). Senyawa-senyawa tersebut terikat pada senyawa organik atau oksida, namun yang dominan adalah CdS. Kadmium juga terekstrak sebagai produk gabungan dengan logam lain seperti seng (Zn) dan tembaga (Cu). Oleh karena itu, terjadinya kontaminasi Cd seringkali disertai dengan tambahan polutan logam berat lain (USGS 2003 dalam Synkowski 2004).

Jumlah normal kadmium dalam tanah berada di bawah 1 ppm, tetapi angka tertinggi (1.700 ppm) dijumpai pada permukaan sampel tanah yang diambil di dekat pertambangan biji seng (Wikipedia 2011). Menurut Wagner (1993),

konsentrasi Cd dalam larutan tanah yang tidak tercemar berkisar 0,04–0,32 µM, sementara tanah yang tercemar dalam kategori medium/ sedang mengandung 0,32–1,00 µM. Pada tanah yang mengandung lebih dari 35 µM Cd dalam larutan tanah, spesies yang mampu bertahan adalah spesies yang toleran kadmium atau tanaman hiperakumulator, seperti *Thlaspi caerulescens* (Brown *et al.* 1994). Pais dan Jones (1997 dalam Institut Pertanian Bogor 2006) menerangkan bahwa walaupun tidak dibutuhkan oleh tanaman namun kandungan kadmium dalam tanaman dapat mencapai 0,1 sampai dengan 1,0 ppm.

Konsentrasi kadmium pada tanah pertanian yang masih bersih (non-polusi) berkisar antara 0,1–1 mg/kg, tetapi beberapa jenis tanah sangat mempengaruhi kandungan kadmium. Misalnya tanah yang mengandung bahan organik (histosol) biasanya mengandung kadmium yang paling tinggi, dan sebaliknya tanah jenis Ultisol dan Alfisol mengandung kadmium yang paling rendah. Kandungan kadmium dari kedua jenis tanah tersebut banyak terambil oleh tanaman pangan dan banyak juga yang merembes ke tanah yang lebih dalam (Darmono 2006).

Penggunaan pupuk Fosfat (P) dinyatakan juga dapat meningkatkan keberadaan kadmium dalam tanah. Konsentrasi Cd dalam pupuk P bervariasi tergantung pada konsentrasi awal Cd dalam batuan fosfat yang digunakan untuk memproduksi pupuk. Konsentrasi Cd dalam pupuk dan frekuensi aplikasi merupakan faktor penting yang mempengaruhi ketersediaan Cd dalam tanah. Namun, ketersediaan Cd juga dipengaruhi oleh efek induksi pupuk pada sifat kimia dan biologi tanah, seperti pH tanah, kandungan bahan organik, kekuatan ion dari larutan tanah, ketersediaan Zn, kimia rhizosfer, dan asosiasi mikoriza (Grant 2010). Penelitian tentang penyerapan kadmium oleh tanaman kedelai melalui aplikasi pupuk fosfat telah dilakukan oleh Jaidee *et al.* (2009). Hasil penelitian tersebut mengungkapkan bahwa akar dan tunas kedelai yang ditanam dengan pemupukan fosfor memiliki konsentrasi Cd yang lebih tinggi daripada tanpa pemupukan fosfor. Bobot kering akar dan tunas yang dipupuk fosfor lebih besar daripada yang tumbuh tanpa pupuk fosfor. Menurut Grant (2010), akumulasi jangka panjang Cd dalam tanah dapat dikurangi dengan menggunakan pupuk dengan konsentrasi Cd yang rendah, dan melalui pembatasan input pupuk melalui penerapan manajemen

budidaya yang mengoptimalkan efisiensi penggunaan pupuk.

Tingkat serapan kadmium pada tanaman ditentukan oleh konsentrasi kadmium tanah dan oleh ketersediaan biologisnya (bahan organik, eksudat akar, dan mikoriza, pH dan potensial redoks tanah, suhu, serta konsentrasi unsur lainnya). Penyerapan ion Cd berlangsung dalam kompetisi dengan elemen seperti K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, dan Ni. Kadmium diangkut secara simplastik melalui korteks akar ke stele, kemudian ke tunas melalui xilem, meskipun floem juga terlibat dalam transportasi. Tingkat akumulasi kadmium juga dilaporkan tergantung pada umur tanaman (Pal *et al.* 2006). Distribusi kadmium dalam tanaman dipengaruhi oleh transportasi dari akar ke tunas melalui xilem, transfer dari bagian xilem ke floem, dan transportasi melalui floem (dari source ke sink) (Riesen dan Feller 2005).

Akumulasi logam berat dalam tanah berbahaya bagi kebanyakan organisme hidup. Konsentrasi kadmium yang tinggi bersifat karsinogenik, mutagenik, dan berefek teratogenik pada berbagai spesies hewan. Pada tumbuhan, kadmium adalah salah satu logam berat yang paling mudah diserap dan tertranslokasi secara cepat; hal inilah yang menjelaskan mengapa efek racunnya sangat kuat walaupun pada konsentrasi yang relatif rendah. Gejala keracunan yang terjadi pada tanaman antara lain: penghambatan pertumbuhan (menghambat proses perkecambahan dan perkembangan bibit) dan fotosintesis, perubahan aktifitas enzim, menghambat fiksasi nitrogen, gangguan pada hubungan air-tanaman, dan metabolisme ion, dan pembentukan radikal bebas (Pal *et al.* 2006; Liu *et al.* 2011; Sheirdil *et al.* 2012).

Ditinjau dari perspektif kesehatan manusia, perhatian utama terhadap kadmium adalah dikarenakan kadmium dapat terakumulasi dalam tanaman pangan. Hal ini merupakan jalur utama masuknya kadmium ke dalam tubuh manusia, sehingga berisiko terhadap kesehatan. Pada manusia, kadmium dan senyawanya bersifat karsinogen dan bersifat racun kumulatif. Akumulasi kadmium melebihi 200 mg kg⁻¹ dalam ginjal dapat menyebabkan disfungsi ginjal, kerapuhan, dan deformasi tulang, serta kanker paru (Nawrot *et al.* 2006; Staessen *et al.* 1999). Di Jepang, penyakit 'itai-itai' disebabkan oleh konsumsi beras berkadar kadmium lebih dari 0,4 mg/kg (Chaney *et al.* 2001 dalam Synkowski 2004). Meskipun pada kedelai belum

ditemukan adanya kasus penyakit yang serius, namun dari beberapa penelitian telah ditemukan adanya kandungan kadmium yang tinggi pada tanaman kedelai. Selain itu, kedelai merupakan sumber gizi protein nabati utama di Indonesia, sehingga adanya cemaran kadmium merupakan hal yang memerlukan perhatian, terutama efek jangka panjangnya terhadap kesehatan.

KADMIUM DALAM TANAMAN KEDELAI

Kemampuan antarspesies tanaman dan kultivar berbeda dalam menyerap, menumpuk dan mentolerir kadmium (Grant *et al.* 2007). Li *et al.* (1997) melaporkan adanya variasi jumlah kadmium yang terkandung pada butir gandum durum dan flax. Sedangkan Morishita *et al.* (1987) menyebutkan bahwa tingkat kadmium dalam butir beras berkisar antara 2,1–27,0 ppm pada 28 varietas padi Japonica dan 4,1–55,5 ppm pada 23 varietas padi Indica yang ditanam pada lahan yang tidak terkena polusi.

Penyerapan, distribusi serta efek kadmium pada tanaman ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain faktor genetik tanaman, ketersediaan air dan nutrisi, fase pertumbuhan tanaman, dan lamanya terpapar kontaminan. Konsentrasi kadmium pada kedelai mendapat perhatian yang serius dikarenakan kedelai merupakan sumber protein nabati utama (Arao dan Ishikawa 2006). Menurut MAFFJ (2002), tanaman kedelai cenderung memiliki kandungan kadmium lebih tinggi dibandingkan tanaman pangan lainnya. Pendapat yang sama dikemukakan oleh Wolnik *et al.* (1983) berdasarkan survei terhadap enam tanaman yang dibudidayakan di distrik utama di Amerika, dan studi komparatif yang dilakukan oleh MacLean (1976) pada tanaman yang dibudidayakan pada kondisi tanah yang identik. Adanya laporan-laporan bahwa kedelai memiliki konsentrasi kadmium yang lebih tinggi dibanding tanaman lain tersebut menyebabkan Sugiyama *et al.* (2011) menyelidiki konsentrasi kadmium pada benih kedelai dan menemukan bahwa ada perbedaan antar-kultivar dalam mengakumulasi kadmium dalam biji. Perbedaan antara kultivar Enrei dan Suzuyutaka terkait erat, dan kecenderungan untuk mengakumulasi kadmium dalam biji adalah dikendalikan oleh faktor genetik.

Penelitian tentang kandungan kadmium pada tanaman kedelai sudah lama dilakukan. Cataldo *et al.* (1980) menggunakan kultivar kedelai Williams untuk mengetahui distribusi

kadmium pada jaringan tanaman kedelai. Pada kultivar William, bagian tanaman yang mengakumulasi kadmium paling banyak adalah akar, sedangkan sebanyak 2% kadmium yang terakumulasi diangkut ke bagian daun, dan 8% sisanya ke bagian biji selama fase pengisian biji. Menurut Oda *et al.* (2004), konsentrasi kadmium dalam benih kedelai yang tertinggi di fase R4 (polong berkembang penuh) dan fase R6 (polong penuh). Konsentrasi kadmium dalam biji dan polong sangat berkorelasi pada setiap tahap pertumbuhan. Jumlah serapan kadmium meningkat seiring dengan tahap pertumbuhan, namun rasio serapan kadmium dalam biji dengan yang ada di seluruh tanaman akan berkurang setelah R6.

Kajian tentang perbedaan genotipik pada penerapan dan penyebaran kadmium dalam 17 varietas kedelai dilakukan oleh Arao *et al.* pada tahun 2003, dan didapatkan adanya perbedaan kandungan kadmium yang signifikan antar genotipe kedelai (pada bagian daun, biji, dan batang) yang diuji saat tanaman berumur 66 hari. Konsentrasi kadmium pada daun tanaman kedelai yang ditanam pada tanah terpolusi berat berkisar 5,5–12,9 mg/kg, pada batang berkisar 4,3–20,3 mg/kg; dan pada biji berkisar 2,1–12,7 mg/kg. Penyerapan kadmium pada daun adalah berkisar 67,6–152,8 µg/tanaman, pada batang berkisar 48,0–130,1 µg/tanaman, dan pada biji berkisar 8,3–8,6 µg/tanaman.

Arao dan Ae (2001) yang melakukan skrining terhadap 18 varietas kedelai mendapatkan adanya adanya variasi genetik kandungan kadmium pada biji kedelai yang berkisar antara 0,46 mg/kg hingga 12,68 mg/kg. Adanya kandungan kadmium yang lebih rendah yang ditemukan pada varietas kedelai tertentu disinyalir merupakan hasil kombinasi antara serapan awal yang rendah dengan tingkat retensi kadmium yang lebih tinggi pada akar, sehingga membatasi translokasi ke bagian tajuk (Arao *et al.* 2003).

Arao dan Ishikawa (2006) menguji 17 kultivar kedelai menggunakan tiga jenis tanah yang berbeda (Tabel 1), dan menyimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antar kultivar yang ditanam pada tanah yang terpolusi kadmium. Kultivar yang memiliki kandungan kadmium terendah adalah Sakukei 4 (hasil persilangan antara En-b0-1 dan Tamahomare), dan yang tertinggi adalah kultivar Harosoy. Untuk ketiga jenis tanah yang mengandung kadmium 0,2–10 mg/kg yang diekstrak dari 0,1

mol/liter HCl tersebut, peringkat genotipe kedelai berdasarkan tingkat kadmium benih adalah serupa, menunjukkan bahwa ada faktor genetik yang terlibat dalam perbedaan konsentrasi kadmium tiap varietas. Kultivar Sakukei 4 berpeluang dijadikan sumber tetua persilangan, yang dapat digabungkan dengan kultivar yang berdaya hasil tinggi, memiliki resistensi penyakit dan sifat-sifat lainnya.

Tabel 1. Kandungan kadmium dalam biji pada berbagai kultivar kedelai.

Kultivar kedelai	Konsentrasi kadmium (mg/kg)		
	Tanah x	Tanah y	Tanah z
1. Sakukei 4	0,46	1,43	0,12
2. Tamahomare	0,70	2,52	0,13
3. En-b0-1	0,82	1,96	0,23
4. Goyokuromame	1,16	1,99	0,20
5. Hayagin	0,91	2,22	0,23
6. Enrei	0,89	2,09	0,19
7. En-b2-110	0,91	2,06	0,19
8. Dewamusume	1,05	5,24	0,24
9. Tachiyutaka	1,47	3,29	0,28
10. En-N0-2	1,91	4,94	0,18
11. Tachinagaha	1,17	2,88	0,23
12. Nattousyouryuu	0,59	2,90	0,18
13. Getenshirazu1	0,78	1,72	0,20
14. En1282	2,22	5,33	0,24
15. Hatayutaka	0,97	2,83	0,23
16. Suzuyutaka	1,50	7,46	0,33
17. Harosoy	2,68	12,68	0,34
Rerata	1,14	3,61	0,21

Keterangan: x = jenis tanah Fluvisol (Entisol dan Inceptisol menurut USDA) dengan kandungan kadmium dalam tanah 0,3–0,7 mg/kg tanah; y = jenis tanah Andisol dengan kandungan kadmium dalam tanah 3,8–10,4 mg/kg tanah; jenis-jenis tanah Andisol dengan kandungan kadmium dalam tanah 0,2 mg/kg tanah.

Sumber: Arao dan Ishikawa 2006.

Sugiyama dan Ae (2009) menyebutkan bahwa akumulasi kadmium dalam tajuk tanaman kedelai ditentukan oleh kapasitas akumulasi kadmium dalam akar, di mana kultivar yang mengakumulasi kadmium dalam jumlah yang rendah pada akar akan mengangkut dan menimbun kadmium pada tajuk. Meskipun demikian, akumulasi kadmium dalam benih dilaporkan berbeda untuk tiap kultivar. Lebih lanjut disebutkan bahwa kultivar kedelai Suzuyutaka yang berkandungan kadmium tinggi dalam biji, konsentrasi kadmium yang didistribusikan dari tunas ke daun adalah seba-

nyak 67% dan dari tunas ke biji sebesar 13%. Sedangkan pada kultivar kedelai Kantou 100 yang berkandungan kadmium rendah pada bijinya, konsentrasi kadmium yang didistribusikan dari tunas ke daun sebanyak 57% dan dari tunas ke biji sebesar 21%. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kultivar kedelai yang mengakumulasi kadmium yang rendah memiliki suatu mekanisme untuk mencegah kadmium terakumulasi dalam biji dengan cara meningkatkan akumulasi kadmium pada daun.

Oliviera *et al.* (1994) mengkaji tentang penyerapan dan distribusi kadmium pada dua kultivar kedelai (Bessier dan Doko) dengan mendasarkan pada umur tanaman, konsentrasi kadmium eksternal dan durasi terpapar kadmium. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium dalam tanaman kedelai meningkat seiring dengan pertambahan umur tanaman dan lamanya tanaman terpapar kadmium. Akumulasi kadmium dalam akar dilaporkan lebih banyak dibandingkan pada tajuk. Perbedaan jumlah kadmium yang terakumulasi dan terdistribusi dalam bagian-bagian tanaman dapat disebabkan oleh adanya modifikasi anatomi dan fisiologi pada xilem, dan kehadiran polipeptida bermassa molekul rendah yang terinduksi (*phytochelatin*). Selain itu, seiring perkembangan tanaman, faktor transpirasi diduga dapat mempengaruhi penyerapan dan pemindahan kadmium dalam berbagai bagian tanaman kedelai.

Penelitian oleh Kobori *et al.* (2010) tentang penyebaran dan akumulasi kadmium pada tiga varietas kedelai (Enrei, Tsurunoko, dan Tsukui) menyimpulkan bahwa serapan kadmium oleh biji kedelai secara ekstensif terjadi saat peralihan polong muda menjadi polong tua (masak), di mana rata-rata penyerapannya berbeda antar varietas. Varietas Tsukui memiliki serapan kadmium paling cepat dibanding varietas lain, yaitu pada tahap polong muda sebesar 0,10 µg/hari/tanaman. Setelah polong masak, varietas Tsurunoko menunjukkan serapan kadmium tercepat dengan 0,85 µg/hari/tanaman.

RESPONS TANAMAN TERHADAP CEKAMAN KADMIUM

Dalam teori cekaman secara umum, mekanisme ketahanan tanaman terhadap logam berat dapat berupa penghindaran (*avoidance*) dan toleran. Mekanisme penghindaran dilakukan tanaman dengan cara membatasi penyerapan logam berat, dan kemudian mengelu-

arkannya dari jaringan tanaman. Sedangkan tanaman dengan mekanisme toleransi akan mampu mengakumulasi, menyimpan dan kemudian mengimobilisasi logam berat melalui pengikatan bersama asam amino, protein atau peptida (Pal *et al.* 2006).

Respon tanaman terhadap cekaman kadmium dapat berupa (Pal *et al.* 2006):

1. Mekanisme eksklusi dan imobilisasi

Mekanisme eksklusi merupakan fungsi sistem pertahanan terhadap kadmium pada tingkat akar. Mekanisme ini mampu mencegah kadmium masuk ke dalam sitosol, yang mencakup: modifikasi pH rizosfer, eksudasi ikatan asam organik dengan logam, dan pengembangan lapisan lendir yang tebal pada ujung akar. Sedangkan mekanisme imobilisasi terjadi pada dinding sel atau dengan bantuan karbohidrat ekstraseluler. Kedua mekanisme ini tergantung pada konsentrasi kadmium dan spesies tanaman yang digunakan dalam penelitian.

2. Metabolisme sulfur dan sulfat, serta sintesis *phytochelatin*

Ketika terjadi cekaman kadmium, maka jalur lintas asimilasi sulfur dan sulfat teraktivasi yang meningkatkan produksi *phytochelatin*. Adanya cekaman kadmium dilaporkan meningkatkan akumulasi *phytochelatin* 3–10 kali lebih banyak. *Phytochelatin* disebutkan sebagai komponen utama dalam detoksifikasi logam berat, dan merupakan indikator awal terjadinya cekaman.

3. Akumulasi prolin

Peningkatan akumulasi prolin disebabkan oleh adanya cekaman. Prolin tidak hanya berperan dalam menanggulangi stress osmotik, namun juga sebagai sumber C dan N, menstabilkan sintesis protein, dan berfungsi sebagai antioksidan dan pengatur pH (Konotop *et al.* 2012).

4. Peningkatan jumlah asam salisilat

Asam salisilat dilaporkan dapat mengurangi efek kerusakan membran dan penghambatan perkecambahan dan pertumbuhan yang disebabkan oleh logam berat pada padi (Mishra dan Choudhuri 1999). Sedangkan Metwally *et al.* (2003) menemukan jumlah asam salisilat yang berlipat dua kali dalam akar barley akibat adanya perlakuan kadmium.

Respon tanaman kedelai terhadap cekaman kadmium ada beberapa cara, salah satunya disebutkan melalui peningkatan akumulasi pada daun, yang berfungsi untuk menghilangkan

kelebihan kadmium dari tanaman melalui daun yang gugur (Sugiyama dan Ae 2009). Namun, pada penelitian lain (Arao *et al.* 2003 dan Ishikawa *et al.* 2005) disebutkan bahwa untuk beberapa kultivar kedelai yang lain menyimpan kadmium di dalam akar, dan hanya dalam jumlah yang sedikit yang diangkut ke daun maupun biji. Penelitian oleh Konotop *et al.* (2012) menyebutkan bahwa akar kedelai yang tercekam oleh ion kadmium akan menunjukkan gejala pertumbuhan yang terhambat, namun di sisi lain adalah terjadinya peningkatan akumulasi prolin dan enzim katalase.

METODE SKRINING DAN PEMULIAAN

Identifikasi perbedaan genotipik kandungan kadmium pada berbagai tanaman sudah banyak diteliti, namun tidak dibarengi dengan usaha pemuliaan dan seleksi untuk mengurangi kandungan kadmium. Penggabungan sifat yang mengakumulasi kadmium dalam jumlah yang rendah pada varietas kedelai melalui pemuliaan konvensional sangat sulit karena tidak tersedianya metode yang mudah, ekonomis, dan efisien untuk mengukur kandungan kadmium dalam biji kedelai (Yu 2009). Saat ini, seiring dengan tuntutan pasar dan trend terkini tentang pangan fungsional yang menyehatkan, maka perakitan varietas tanaman berkandungan kadmium rendah mulai intensif dilakukan pada tanaman gandum durum, padi, bunga matahari, dan kedelai (Grant *et al.* 2007).

Adanya fakta bahwa terdapat variabilitas genetik pada tanaman kedelai dalam mengakumulasi kadmium memberikan peluang untuk memanfaatkan pemuliaan tanaman dalam memilih varietas kedelai yang secara genetik berkandungan kadmium rendah. Hal yang sama dikemukakan oleh Sugiyama dan Ae (2009), bahwa perbedaan kandungan kadmium yang signifikan pada tiap kultivar kedelai tersebut lebih ditentukan oleh faktor genetik daripada lingkungan.

Pengetahuan tentang daya pewarisan dan heritabilitas sangat penting dalam mengawali program pemuliaan. Menurut Clarke *et al.* (1997), konsentrasi kadmium dalam biji dikendalikan oleh gen tunggal, dengan gen dominan untuk kadmium rendah yang terletak pada kromosom 5B (Knox *et al.* 2003 dalam Grant *et al.* 2007). Penggunaan kultivar/varietas kedelai berkandungan kadmium rendah merupakan metode penting untuk membatasi serapan

kadmium dan akumulasinya dalam tanaman, yang dapat diawali dengan menemukan variasi genetik konsentrasi kadmium dalam koleksi plasma nutfah. Selanjutnya adalah mengetahui pewarisan genetik karakter kadmium rendah, mengembangkan strategi pemuliaan untuk menggabungkan sifat kadmium rendah dengan hasil tinggi, resistensi penyakit dan sifat-sifat lainnya, dan mengembangkan metode yang murah untuk menggabungkan karakter kadmium rendah dengan sifat yang diinginkan lainnya.

Kendala utama dalam perakitan varietas kedelai berkandungan kadmium rendah adalah pada analisis kimia kadmium yang memerlukan biaya yang cukup besar dan waktu yang lama dalam tahap pengujian konfirmasi keberadaan kadmium. Oleh karena itu, adanya metode skrining yang sederhana, efektif, dan efisien (baik waktu maupun biaya) adalah hal yang mutlak diperlukan.

Sugiyama *et al.* (2011) mengemukakan metode skrining yang sederhana dan cepat untuk mengetahui kedelai yang berkandungan kadmium rendah, yaitu melakukan skrining pada fase awal pertumbuhan (fase perkecambahan). Metode tersebut berdasarkan pada hasil penelitian yang menyatakan bahwa konsentrasi Cd dalam tajuk selama pertumbuhan vegetatif dikendalikan oleh kemampuan akar dalam mengakumulasi Cd selama fase vegetatif (Sugiyama *et al.* 2007). Berdasarkan hal tersebut, disimpulkan bahwa skrining tidak perlu menunggu hingga fase masak, namun dapat dilakukan pada fase kecambah karena perbedaan kandungan kadmium dapat diprediksi melalui kadmium yang terakumulasi pada bagian tajuk kecambah. Pendapat yang serupa sebelumnya dikemukakan oleh penelitian Arao dan Ishikawa (2006), bahwa ditemukannya konsentrasi kadmium yang rendah pada biji beberapa varietas kedelai merupakan kombinasi dari serapan awal yang rendah dan penyimpanan Cd pada akar, sehingga selanjutnya membatasi translokasi ke jaringan muda (tunas/kecambah).

Program pemuliaan berbasis molekuler pada tanaman gandum, padi, dan kedelai telah dikembangkan. Sebuah penanda RAPD telah dikembangkan untuk tanaman gandum durum, yang disebutkan meningkatkan efisiensi dalam skrining dan dapat menghemat biaya dibandingkan bila melakukan analisis kimia kandungan kadmium (Penner *et al.* 1995 dalam Grant *et*

al. 2007). Pada tanaman padi, sedang dikembangkan suatu penanda DNA yang terpaut secara repulsi dengan alel untuk kadmium rendah. Selain itu, juga dilakukan identifikasi QTL (*Quantitative Trait Loci*) yang mengendalikan konsentrasi kadmium dalam butir padi. Dari penggunaan QTL pada padi ini diharapkan akan memberikan peluang yang besar untuk dapat merakit varietas padi baru yang ber kandungan kadmium rendah di masa depan (Ishikawa 2005).

Pemuliaan berbasis penanda (*MAS/Marker Assisted Selection*) untuk kedelai ber kandungan kadmium rendah telah dikembangkan oleh Jegadeesan *et al.* (2010). Dari hasil studi pewarisan menunjukkan bahwa akumulasi kadmium yang rendah pada kedelai dikendalikan oleh gen mayor (*Cda1*) dengan alel yang dominan untuk akumulasi kadmium rendah. Populasi RIL (*Recombinant Inbreed Line*) yang berasal dari persilangan kedelai AC Hime (akumulasi kadmium tinggi) dengan Westag-97 (akumulasi kadmium rendah) digunakan untuk mengidentifikasi penanda DNA yang terpaut pada gen *Cda1* atau *QTLs* yang mengendalikan akumulasi kadmium yang rendah. Dari hasil tersebut telah ditemukan gen kandidat potensial (gen yang telah diketahui fungsinya atau yang masih diprediksi berpengaruh terhadap kandungan kadmium dalam biji), yaitu *protein kinase*, *putative Adagio-like protein*, dan *plasma membrane H(+)-ATPase*. Selain itu, dengan teridentifikasinya penanda SSR yang terpaut dekat dengan gen *Cda1* pada biji kedelai, berpeluang digunakan dalam MAS untuk mengembangkan varietas yang ber kandungan kadmium rendah pada program pemuliaan kedelai.

TANTANGAN PEMULIAAN KEDELAI BERKANDUNGAN KADMIUM RENDAH DI INDONESIA

Dalam beberapa dekade terakhir, bidang non pertanian semakin berkembang pesat menyebabkan semakin berkurangnya keberadaan lahan pertanian yang optimal, sehingga upaya peningkatan produksi kedelai yang dilakukan melalui perluasan areal tanam kini berpeluang mengarah pada pemanfaatan lahan marginal. Beberapa contoh lahan yang tergolong ke dalam lahan marginal yaitu: tanah gambut, lahan bekas tambang, lahan kering, lahan pasir, lahan dekat pantai, dan gurun. Luas lahan marginal di Indonesia dari tahun ke tahun terus bertambah. Di Indonesia, lahan marginal dijumpai baik pada lahan basah maupun lahan kering.

Lahan basah berupa lahan gambut, lahan sulfat masam dan rawa pasang surut seluas 24 juta ha, sementara lahan kering berupa tanah Ultisol 47,5 juta ha dan Oxisol 18 juta ha. Contohnya di Bangka Belitung sebagai daerah penambangan timah, angka lahan marginal sudah mencapai 400.000 ha (Badan Litbang Pertanian 2011). Budidaya kedelai pada lahan tersebut akan menghadapi kendala adanya polusi logam berat berbahaya, salah satunya adalah kadmium.

Identifikasi kandungan kadmium pada tanaman komoditas pertanian antara lain pada sawi putih (*Brassica chinensis*) dan beras coklat. Hasil pengujian di sentra produksi tanaman hortikultura Lembang (Jawa Barat) menunjukkan konsentrasi kadmium tanaman (*Cd_{tm}*) pada sawi putih berkisar 0,10–0,39 mg/g, padahal ambang batas untuk sayuran adalah sebesar 0,2 mg/g menurut Codex Alimentarius Commission (Andayasari 2009). Sedangkan kajian kandungan kadmium dalam beras coklat (beras pecah kulit) berkisar antara 0,04 mg/kg hingga 0,39 mg/kg, dengan batas maksimum cemaran kadmium dalam beras sebesar 0,4 mg/kg (SNI 2009).

Saat ini, program pemuliaan tanaman pangan di Indonesia (khususnya kedelai), utamanya masih mengarah pada peningkatan hasil. Pemuliaan kedelai ke arah cekaman logam berat belum dimulai. Namun, dengan adanya peluang budidaya kedelai ke arah lahan marginal (terutama lahan bekas tambang maupun industri), maka informasi tentang status dan respon kedelai terhadap cekaman logam berat (kadmium) akan berguna dalam perakitan varietas kedelai ber kandungan kadmium rendah. Selain itu, adanya varietas kedelai ber kandungan kadmium rendah akan mendukung trend kedelai sebagai pangan fungsional yang menyehatkan. Umumnya pangan fungsional dianggap sebagai bagian pangan yang memiliki fungsi diet dan memiliki komponen biologi aktif yang berguna untuk meningkatkan kesehatan atau mengurangi risiko penyakit. Pemuliaan tanaman dapat menjadi alat yang penting bagi peningkatan konsentrasi elemen yang diinginkan dan mengurangi elemen yang berpotensi berbahaya seperti kadmium. Tingkat kadmium dapat bervariasi dalam berbagai jenis bahan makanan. Produksi kultivar/varietas kedelai ber kandungan kadmium rendah bermanfaat bagi masyarakat yang mengkonsumsi kedelai dalam bentuk makanan olahan, yaitu digunakan sebagai alat untuk mengurangi risiko pergerakan kadmium dalam tubuh manusia.

Adanya fakta terdapatnya variabilitas genetik tanaman kedelai dalam mengakumulasi kadmium serta heritabilitas yang tinggi untuk akumulasi kadmium rendah akan memberikan peluang yang besar untuk dapat memanfaatkan pemuliaan tanaman dalam membentuk varietas kedelai yang berkandungan kadmium rendah. Langkah awal dalam pemuliaan kedelai berkandungan kadmium rendah adalah dengan menelusuri variabilitas genetik dalam koleksi plasma nutfah. Pengetahuan tentang metode skrining awal yang murah, sederhana dan efektif tentunya diperlukan dalam rangka menghemat waktu dan biaya. Selain itu, beberapa aspek yang harus diperhatikan adalah: (1) metode seleksi dan pengujian lapang, (2) pelaksanaan seleksi laboratorium ditambah studi genetik, (3) pengetahuan fisiologi interaksi genotipe-cekaman, dan (4) informasi level molekuler dan sel. Di samping hal-hal tersebut di atas, adanya kerjasama yang solid antara pemulia, peneliti tanah, dan ahli fisiologi sangat diperlukan dalam menunjang keberhasilan perakitan varietas kedelai berkandungan kadmium rendah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Kadmium (Cd) merupakan logam berat yang bersifat toksik. Pada manusia, akumulasi kadmium melebihi 200 mg/kg dalam ginjal dapat menyebabkan disfungsi ginjal, kerapuhan, dan deformasi tulang, serta kanker paru.
2. Hasil pengujian di sentra produksi tanaman hortikultura di Lembang (Jawa Barat) menunjukkan konsentrasi kadmium tanaman pada sawi putih berkisar 0,10–0,39 mg/g (ambang batas untuk sayuran adalah sebesar 0,2 mg/g). Sedangkan kajian kandungan kadmium dalam beras coklat (beras pecah kulit) berkisar antara 0,04 mg/kg hingga 0,39 mg/kg (batas maksimum dalam beras sebesar 0,4 mg/kg).
3. Metode skrining pada fase awal pertumbuhan (fase perkecambahan) kedelai merupakan metode yang sederhana dan cepat untuk mengetahui kedelai yang berkandungan kadmium rendah. Metode tersebut berdasarkan pada hasil penelitian yang menyatakan bahwa konsentrasi Cd dalam tajuk selama pertumbuhan vegetatif dikendalikan oleh kemampuan akar dalam mengakumulasi Cd selama fase vegetatif.

Saran

Perlunya penelitian tentang luas lahan kedelai di Indonesia yang tercemar oleh logam berat, terutama kadmium; dan selanjutnya pengujian kandungan kadmium dalam varietas-varietas kedelai di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Andayasari, F. 2009. Status Kecemaran Tanah oleh Kadmium pada Lahan Budidaya Sawi Putih (*Brassica chinensis* L.) di Sentra Produksi Hortikultura Lembang, Jawa Barat. Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Bogor. 25p.
- Arao and N. Ae. 2001. Screening of genotypes with low cadmium content in soybean seed and rice grains. W. J. Horst *et al.* (Eds.), Plant nutrition - Food security and sustainability of agro-ecosystems. 292–293.
- Arao T, Ae N, Sugiyama M, Takahashi. 2003. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans. *Plant Soil* 251:247-53.
- Arao, T and S. Ishikawa. 2006. Genotypic differences in cadmium concentration and distribution of soybeans and rice. *JARQ Jpn Agric. Res.* 40:21-30.
- Badan Litbang Pertanian. 2011. Inovasi Praktis Atasi Masalah Perkebunan Rakyat. Sinar Tani 3394. 5p.
- Brown, S. L., R.L. Chaney, J.S. Angle, A.J.M. Baker. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium-contaminated soils. *J. Environ. Qual.* 23, 1151–1157.
- Cataldo, D.A., T. Garland, and R.E. Wildung. 1980. Cadmium distribution and chemical fate in soybean plants. *Plant Physiol.* 68:835–839.
- Clarke, J.M., D. Leisle, G.L. Kopytko. 1997. Inheritance of cadmium concentration in five durum wheat crosses. *Crop Sci.* 37:1722–1726.
- Darmono. 2006. Lingkungan Hidup dan Pencemaran: Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam. UI Press. Jakarta.
- Grant, C.A., J.M. Clarke, S. Duguid, R.L. Chaney. 2007. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Sci. of the Total Env.* 390:301–310.
- Grant, C.A. 2010. Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops. *Pedologist*:143–155.
- Institut Pertanian Bogor. 2006. Bab 2 Tinjauan Pustaka. <http://iirc.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/40756/3/Bab%202%202006ssa.pdf> Diakses tanggal 1 Desember 2010.
- Ishikawa, S. 2005. Promising technologies for reducing cadmium contamination in rice. In *Rice is life: scientific perspective for the 21st century*, K. Toriyama, K.L. Heong and B. Hardy (eds.). Pro-

- ceedings of the World Rice Research, Tsukuba, Japan.
- Ishikawa, S., N. Sugiyama, M. Murakami, and T. Arao. 2005. Genotypic variation in shoot cadmium concentration in rice and soybean in soils with different levels of cadmium contamination. *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 51:101–108.
- Jaidee, R., M.B. Kirkham, K.A. Williams, and N.O. Nelson. 2009. Cadmium uptake by soybean from phosphorus fertilizer. Department of Agronomy, Throckmorton Plant Sciences Center, Kansas State University. Manhattan, Kansas, USA.
- Jegadeesan S, K. Yu, V. Poysa, E. Gawalko, M.J. Morrison, C. Shi, E. Cober. 2010. Mapping and validation of simple sequence repeat markers linked to a major gene controlling seed cadmium accumulation in soybean [*Glycine max* (L.) Merr]. *Theor. Appl. Genet.* 121 (2):283–294.
- Kobori, G., M. Okazaki, T. Motobayashi, and K. Matsukawa. 2010. Differences of cadmium uptake and accumulation among soybean (*Glycine max*) cultivars, pp. 57–60. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 - 6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Konotop, Y., P. Meszaros, N. Spieß, V. Mistr-kova, B. Pirslova, J. Libantova, J. Moravc-kova, N. Taran, P. Hauptvogel, and I. Matus?kova. 2012. Defense responses of soybean roots during exposure to cadmium, excess of nitrogen supply and combinations of these stressors. *Mol. Biol. Rep.* 39:10077-10087.
- Kurnia, U., H. Suganda, R. Saraswati, dan Nurjaya. 2004. Teknologi pengendalian pencemaran lahan sawah. hlm. 251–281. *Dalam Tanah Sawah dan Teknologi Pengelolaannya*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Las, I., K. Subagyono dan A.P. Setiyanto. 2006. Isu dan pengelolaan lingkungan dalam revitalisasi pertanian. *J. Litbang Pertanian* 25 (3):106–114.
- Li, Y.M., R.L. Chaney, A.A. Schneiter, J.F. Miller, E.M. Elias, J.J. Hammond. 1997. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax. *Euphytica* 94:23-30.
- Liu, T.T., P. Wu, L.H. Wang, and Q. Zhou. 2011. Response of soybean seed germination to cadmium and acid rain. *Biol. Trace Elem. Res.* 144:1186-1196.
- MacLean, A.J. 1987. Cadmium in different plant species and its availability in soils as influenced by organic matter and additions of lime, P, Cd and Zn. *Can J Soil Sci.* 56:129–138.
- MAFFJ (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan), 2002. Survey of the cadmium in agricultural products. Outline of result. Available at http://www.maff.go.jp/www/press/cont/20021202press_4.pdf. (akses 24 September 2011).
- Makino, T., H. Takano, T. Kamiya, T. Itou, N. Sekiya, M. Inahara, and Y. Sakurai. 2008. Restoration of cadmiumcontaminated paddy soils by washing with ferric chloride: Cd extraction mechanism and bench-scale verification. *Chemosphere* 70:1035–1043.
- Makino, T., T. Kamiya, N. Sekiya, Y. Maejima, I. Akahane, and H. Takano. 2010. Chemical remediation of cadmium-contaminated paddy soils by washing with ferric chloride: Cd extraction mechanism and on-site verification, pp. 35–38. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 - 6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Metwally, A., I. Finkemeier, M. Georgi, and K.J. Dietz. 2003. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiol.* 132:272-281.
- Michael, M. 2003. New Company Employs Plants for Soil Remediation. *Maryland. Research* 3(2):24.
- Mishra, A. and M.A. Choudhuri. 1999. Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. *Biol. Plant.* 42:409-415.
- Morishita T, Fumoto N, Yoshizawa T, Kagawa K. 1998. Varietal differences in cadmium levels of rice grains of Japonica, Indica, Javanica and hybrid varieties produced in the same plot of a field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 33:629-37.
- Nawrot, T., M. Plusquin, J. Hogervorst, H.A. Roels, H. Celis, L. Thijs, J. Vangronsveld, E.V. Hecke, and J.A. Staessen. 2006. Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: A prospective population-based study. *Lancet Oncology* 7:119–126.
- Oda, H., Y. Saeko, and K. Akira. Uptake and transport of Cd supplied at different growth stages in hydroponically cultured soybean plants. *Biomed Res Trace Elem.* 15 (3):289–291.
- Oliviera, J.A., M.A. Oliva, J. Cambraia and V.H.A. Venegas. 1994. Absorption, accumulation and distribution of cadmium by two soybean cvs. *R.Bras.Fisiol.Veg.* 6(2):91–95.
- Pál, M., E. Horváth, T. Janda, E. Páldi, and G. Szalai. 2006. Physiological changes and defense mechanisms induced by cadmium stress in maize. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169:239-246.
- Riesen, O and U. Feller. 2005. Redistribution of nickel, cobalt, manganese, zinc, and cadmium via the phloem in young and maturing wheat. *J. Plant Nutr.* 28:421-30.
- Sheirdil, R.A., K. Bashir, R. Hayat and M.S. Akhtar. 2012. Effect of cadmium on soybean (*Glycine max* L) growth and nitrogen fixation. *African J. of Biotech* 11 (8):1886–1891.
- SNI, 2009. Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan. Standar Nasional Indonesia 7387:2009.
- Staessen, J.A., H.A. Roels, D. Emelianov, T. Kuznetsova, L. Thijs, J. Vangronsveld, and R. Fagard. 1999. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures:

- A prospective population study. *Lancet* 353 (9159):1140–1144.
- Sugiyama, M., N. Ae, dan T. Arao. 2007. Role of roots in differences in seed cadmium concentration among soybean cultivars—proof by grafting experiment. *Plant Soil* 295:1–11.
- Sugiyama, M and N. Ae. 2009. Differences among soybean cultivars with regard to the cadmium-accumulation patterns in various organs. The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI, Department of Plant Sciences, UC Davis.
- Sugiyama, M., N. Ae and M. Hajika. 2011. Developing of a simple method for screening soybean seedling cadmium accumulation to select soybean genotypes with low seed cadmium. *Plant and Soil* 341 (1–2):413–422.
- Synkowski, E.C.C. 2004. Breeding consideration for improving cadmium and zinc hyperaccumulation in two *Thlaspi caerulescens* populations. Thesis. University of Maryland, USA. 121p.
- Tamás, L., B. Boèová, J. Huttová, L. Mistrík and M. Ollé. 2006. Cadmium-induced inhibition of apoplastic ascorbate oxidase in barley roots. *Plant Growth Regul.* 48:41–49.
- Wagner, G. J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.* 51, 173-212.
- Wang, Y., X. Xiao, H. Kang, J. Zeng, X. Fan, L. Sha, H. Zhang, K. Yu dan Y. Zho. 2013. Alteration of Water and Dry Matter Content in Soybean Exposed to Cadmium. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.* 13 (5):606–610.
- Wikipedia, 2011. Kadmium. <http://id.wikipedia.org/wiki/Kadmium> (akses tanggal 24 September 2011).
- Wolnik, K.A., F.L. Fricke, S.G. Capar, G.L. Braude, M.W. Meyer, R.D. Satzer and E. Bonnin, 1983. Elements in major raw agricultural crops in the United States. I. Cadmium and lead in lettuce, peanuts, potatoes, soybeans, sweet corn, and wheat. *J. Agr. Food Chem.* 31:1240-1244.
- Yu, K. 2009. Molecular mapping and characterization of genes underlying low cadmium uptake and protein composition. 2009 Research Project - Soybean, Grain Farmers of Ontario, Available at <http://www.gfo.ca/Research/ResearchProjects/Soybean-ResearchProjects/Cadmiumuptakeandproteincomposition.aspx> (akses 15 September 2013).
-