

PENGARUH MANGAN (Mn) TERHADAP OKSIDASI KROMIUM TRIVALEN DAN PERTUMBUHAN *Tagetes erecta* [The effect of Manganese (Mn) on Trivalent Chromium oxidation and the growth of *Tagetes erecta*]

Sri Kasmiyati ^{1✉*}, Margareta Prameswati ¹, dan Sucahyo ¹

¹Fakultas Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Jl. Diponegoro No. 52–60, Kota Salatiga, Jawa Tengah 50711

*Email: kas@uksw.edu

ABSTRACT

Chromium can be found in two oxidation states, trivalent (Cr^{3+}) and hexavalent (Cr^{6+}) in the environment. Trivalent chromium can be oxidized by manganese oxide to hexavalent (Cr^{6+}). The aim of this study was to determine the effect of Mn on the oxidation of Cr^{3+} and plant growth of *Tagetes erecta*. The study was conducted experimentally using a completely randomized design. The *T. erecta* plants grown in media with two treatment factors, namely Cr^{3+} (CrCl_3) with 3 concentrations of 0, 100, and 500 mg/l and Mn (MnSO_4) with 4 concentrations of 0, 1, 5 and 10 mg/l. The plant growth and Cr^{6+} content in roots and shoots were measured to determine the effect and to detect Cr^{3+} oxidation. Manganese addition in the media of *T. erecta* containing Cr^{3+} increased the Cr^{3+} oxidation, indicated by the content of Cr^{6+} in the roots and shoots of *T. erecta*. The highest Cr^{6+} was found in the roots and shoots of *T. erecta* treated with Cr^{3+} 500 mg/l and Mn 10 mg/l at 0.059 and 0.035 g/l, respectively. The interaction of Cr^{3+} and Mn treatments significantly affected the growth of *T. erecta* plants. Cr^{3+} and Mn at high concentrations increased plant height, root length, root and shoot dry weight. The interaction of Cr^{3+} and Mn at high concentrations inhibited the increase in the number of leaves of *T. erecta*.

Keywords: manganese, reduction-oxidation, *Tagetes*, trivalent chromium, toxicity

ABSTRAK

Kromium di lingkungan dapat dijumpai dalam dua tingkat oksidasi yaitu trivalen (Cr^{3+}) dan heksavalen (Cr^{6+}). Krom trivalen dapat dioksidasi oleh oksida mangan menjadi kromium heksavalen (Cr^{6+}). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh Mn terhadap oksidasi pada Cr^{3+} dan pertumbuhan tanaman *Tagetes erecta*. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan rancangan acak lengkap. Tanaman *Tagetes* sp. ditumbuhkan pada media tanam yang diberi perlakuan dua faktor yaitu Cr^{3+} (CrCl_3) dengan tiga konsentrasi yaitu 0, 100, dan 500 mg/l dan Mn (MnSO_4) 4 konsentrasi yaitu 0, 1, 5 dan 10 mg/l. Pertumbuhan tanaman dan kandungan Cr^{6+} dalam akar dan pucuk diukur untuk mengetahui pengaruh serta untuk mendeteksi terjadinya oksidasi Cr^{3+} . Penambahan Mn dalam media tanam *T. erecta* mengandung Cr^{3+} meningkatkan proses oksidasi Cr^{3+} , ditunjukkan dengan terdeteksinya Cr^{6+} dalam bagian akar dan pucuk tanaman *T. erecta*. Kadar Cr^{6+} tertinggi dijumpai dalam akar dan pucuk *T. erecta* dengan perlakuan Cr^{3+} 500 mg/l dan Mn 10 mg/l berturut-turut sebesar 0,059 dan 0,035 $\mu\text{g/l}$. Interaksi perlakuan Cr^{3+} dan Mn mempengaruhi secara nyata pertumbuhan tanaman *Tagetes erecta*. Cr^{3+} dan Mn pada konsentrasi tinggi meningkatkan tinggi tanaman, panjang akar, berat kering akar dan pucuk. Interaksi Cr^{3+} dan Mn pada konsentrasi tinggi menghambat penambahan jumlah daun *T. erecta*.

Kata kunci: mangan, kromium trivalen, reduksi-oksidasi, *Tagetes*, toksisitas

PENDAHULUAN

Kromium merupakan salah satu logam berat yang banyak mencemari lingkungan tanah, sedimen maupun air tanah. Berbagai industri yang menggunakan kromium dalam skala besar diantaranya metalurgi, pelapisan logam, produksi cat dan pigmen, penyamakan kulit, produksi kertas dan pulp, serta pengawetan kayu (Ramana *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2020). Kromium merupakan logam berat toksik yang mempunyai keunikan sifat dibandingkan lainnya. Di lingkungan kromium dapat dijumpai dalam berbagai tingkat oksidasi (Cr^0 , Cr^{1+} , Cr^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{4+} , Cr^{5+} , Cr^{6+}) dan yang paling stabil di lingkungan akuatik dan terrestrial adalah tingkat oksidasi Cr^{3+} (kromium trivalen) dan Cr^{6+} (kromium heksavalen) (Augustynowicz *et al.*, 2010; Kasmiyati *et al.*, 2015). Kromium trivalen (Cr^{3+}) dan heksavalen (Cr^{6+}) memiliki perbedaan sifat fisik, kimia serta pengaruhnya terhadap organisme, terutama terkait dengan mobilitas, bioavailabilitas, kelarutan, reaktivitas dan toksisitasnya (Gomes *et al.*, 2017; Srivastava *et al.*,

2021). Meskipun Cr^{3+} dilaporkan memiliki toksisitas lebih rendah (10–100 kali) dibandingkan Cr^{6+} dan merupakan unsur esensial yang dibutuhkan antara 50–200 $\mu\text{g/hari}$ untuk aktivitas metabolisme karbohidrat, protein dan asam lemak pada manusia, namun dalam konsentrasi tinggi akan bersifat toksik karena kisaran antara kebutuhan dan toksisitasnya sangat sempit (Gomes *et al.*, 2017; Sharma *et al.*, 2020).

Kromium dapat mengalami reaksi oksidasi-reduksi yang akan mengubah dari satu tingkat oksidasi ke tingkat oksidasi lainnya karena memiliki potensial redoks tinggi. Proses oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} terjadi sangat lambat pada pH di atas 5, namun kondisi basa mendukung oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} . Reduksi kromium terutama dipengaruhi oleh dekomposisi bahan organik, sulfat tereduksi terlarut dan limbah industri yang dapat mengubah parameter fisik-kimia lingkungan. Lingkungan yang tercemar umumnya mengandung oksigen pada konsentrasi rendah, sehingga menyebabkan proses reduksi Cr^{6+} menjadi Cr^{3+}

*Kontributor Utama

*Diterima: 17 Agustus 2021 - Diperbaiki: 10 November 2022- Disetujui: 5 Desember 2022

dapat berlangsung dengan baik (Gomes *et al.*, 2017). Reaksi oksidasi-reduksi kromium secara tidak langsung dapat mempengaruhi dan mengubah pH lingkungan menjadi alkalinitas atau keasaman ekstrem, dan dapat mengganggu bioavailabilitas hara dan penyerapannya oleh tanaman (Emamverdian *et al.*, 2015).

Reaksi oksidasi Cr di lingkungan tanah dan air tergantung pada adanya senyawa oksidan. Oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} mempunyai dampak yang tidak menguntungkan bagi lingkungan. Proses oksidasi akan mengubah krom dari bentuk tidak larut, tidak toksik dan tidak berbahaya (Cr^{3+}) menjadi bentuk krom yang terlarut, toksik dan berbahaya (Cr^{6+}). Senyawa oksidan utama yang terdapat di dalam tanah yang dapat mengoksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} adalah Mn oksida dan oksigen, dan prosesnya dipengaruhi oleh beberapa faktor fisik dan kimia dari tanah. Oksidasi Cr oleh Mn yang telah banyak dilaporkan pada umumnya menggunakan Mn oksida di antaranya bimesite, manganate, hausmanite, dan MnO_3 yang reaksinya berlangsung dengan cepat dan luas, banyaknya Cr^{3+} yang dioksidasi menjadi Cr^{6+} sebanding dengan banyaknya mangan yang tereduksi (Kim *et al.*, 2002; Coetzee *et al.*, 2020).

Meskipun Cr^{3+} bersifat kurang toksik dibanding Cr^{6+} , namun dengan adanya Mn oksida di dalam lingkungan dapat menyebabkan terjadinya reaksi oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} sehingga akan meningkatkan bioavailabilitas dan penyerapan Cr^{6+} oleh tanaman. Kasmiyati dan Suchahyo, (2014) melaporkan terdeteksinya Cr^{6+} dalam akar dan pucuk tanaman *Sonchus oleraceus* yang ditumbuhkan pada media pasir dengan perlakuan Cr^{3+} . Terdeteksi Cr^{6+} dalam akar dan pucuk tanaman *Sonchus* ini menunjukkan bahwa meskipun Cr^{3+} dianggap kurang toksik dibanding Cr^{6+} , namun di dalam media dapat mengalami transformasi menjadi Cr^{6+} yang bersifat toksik. Kasmiyati, (2016) juga melaporkan terdeteksinya transformasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} pada organ tanaman sorgum yang diberi perlakuan Cr^{3+} dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan. Shanker *et al.* (2005) menyatakan bahwa Cr^{3+} yang diserap oleh tumbuhan dapat mengalami proses oksidasi menjadi Cr^{6+} di dalam sel dan masih perlu dikaji lebih mendalam tentang prosesnya.

Penelitian tentang efek Cr^{3+} dalam bentuk $CrCl_3$ terhadap pertumbuhan berbagai tanaman telah dilakukan pada tanaman *Cucumis melo*, *Leersia hexandra*, *Salix matzudana*, *Sorghum bicolor* (Akinci dan Akinci, 2010; Liu *et al.*, 2011; Kasmiyati *et al.*, 2016). Efek toksik chromium trivalen (III) dan heksavalen (VI) pada pertumbuhan dan perkembangan tanaman dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain terjadinya pengurangan penyerapan air dan unsur

hara, penurunan pembelahan sel dan laju pembelahan sel, ketidakseimbangan dalam penyerapan dan translokasi unsur hara, peningkatan produksi radikal-radikal bebas yang memunculkan cekaman oksidatif dan menyebabkan kerusakan oksidatif pada jaringan sensitif seperti mitokondria, kandungan pigmen, DNA, RNA, lipid, protein dan lain-lain (Chen *et al.*, 2017; Magbool *et al.*, 2018; Saleem *et al.*, 2022). Akumulasi Cr dalam konsentrasi yang berlebihan di dalam jaringan menyebabkan terjadinya gangguan aktivitas enzim, asimilasi nitrogen, sistem pertahanan antioksidan, degradasi klorofil, serta kompetisi dengan nutrisi esensial yang dibutuhkan tanaman (Masciarelli *et al.*, 2017; Ugwu dan Agunwamba, 2020; Zaheer *et al.*, 2022). Tingkat toksisitas Cr yang sangat tinggi dapat memicu perubahan fisik, kimia dan molekuler pada tanaman dan keberadaan Cr dalam jangka panjang dalam tanah dapat menurunkan hasil panen dan kualitas biji-bijian (Shahid *et al.*, 2017). Efek interaksi Cr dan Mn terhadap pertumbuhan dan kandungan pigmen fotosintetik telah diteliti pada tanaman jagung (Shafique *et al.*, 2021), namun efeknya terhadap penyerapan Cr^{6+} belum dilaporkan.

Terdapat beberapa jenis tumbuhan yang dapat digunakan sebagai agen untuk meremediasi lingkungan tercemar polutan kromium dan telah diteliti kemampuannya dalam menyerap kromium baik dalam bentuk Cr^{3+} maupun Cr^{6+} . Salah satu jenis tumbuhan yang telah banyak diteliti adalah *T. erecta*. Coelho *et al.* (2017) menyatakan bahwa *T. erecta* memiliki pertumbuhan cepat dan sistem perakarannya berkembang dengan baik, serta mampu berperan sebagai perintis pada tanah buruk sehingga cocok untuk meremediasi area yang terdegradasi akibat polutan logam berat. Kemampuan *T. erecta* untuk dapat tumbuh dan menyerap kromium pada berbagai limbah mengandung kromium telah diteliti di antaranya limbah industri buatan (Hemalatha *et al.*, 2014), limbah tekstil (Parihar dan Malaviya, 2015), limbah pelapisan logam (Chitraprabha dan Sathyavathi, 2018), limbah batik (Maryani *et al.*, 2019), dan tanah laterit tercemar logam berat (Madanan *et al.*, 2021). Selain kromium, kemampuan *T. erecta* untuk tumbuh dan mentoleransi logam berat kromium lain juga telah dilaporkan, di antara terhadap Pb (Shah *et al.*, 2017) dan Cd (Shah *et al.*, 2017). Berdasarkan kemampuan tanaman *T. erecta* tersebut, maka pada penelitian ini tanaman *T. erecta* digunakan sebagai tanaman uji untuk mengkaji pengaruh Mn terhadap oksidasi Cr^{3+} dan pertumbuhan tanaman.

BAHAN DAN CARA KERJA

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bibit *T. erecta* berumur 3 minggu diperoleh dari daerah Kopeng, Kabupaten Semarang dan digunakan sebagai tanaman uji. Bahan kimia untuk perlakuan berupa Cr³⁺ dalam bentuk senyawa CrCl₃ dan Mn dalam bentuk senyawa MnSO₄. Bahan kimia untuk analisis berupa DMSO untuk analisis kandungan klorofil, campuran HNO₃, HCl dan H₂O₂ untuk destruksi basah sampel tanaman pada pengukuran kandungan Cr⁶⁺ menggunakan senyawa difenilkarbasid. Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi spektrofotometer UV-VIS, oven, blender, neraca digital dan alat-alat gelas (erlenmeyer, tabung reaksi, gelas ukur, pipet ukur). Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan rancangan acak lengkap dua faktor di Laboratorium Biologi Universitas Kristen Satya Wacana dan penanaman tanaman uji dilakukan pada rumah kaca.

Penyiapan Bibit *T. erecta* dan Pemberian Perlakuan Logam Cr³⁺ dan Mn

Bibit tanaman *T. erecta* umur sekitar 3 minggu dipindahkan pada polibag yang sudah diisi dengan media tanam (campuran tanah: kompos, dengan perbandingan 3:1) sebanyak 2 kg dan ditumbuhkan selama 1 minggu untuk proses adaptasi sebelum pemberian perlakuan logam Cr³⁺ dan Mn di rumah kaca, dan penyiraman setiap hari dengan air. Setelah tanaman *Tagetes* sp. berumur 1 bulan, perlakuan yaitu Cr³⁺ dalam bentuk CrCl₃ diberikan dengan tiga konsentrasi yaitu 0, 100 dan 500 mg/l, serta perlakuan Mn dalam bentuk MnSO₄ dengan empat konsentrasi 0, 1, 5 dan 10 mg/l. Masing-masing perlakuan Cr³⁺ dan Mn diberikan sebanyak enam kali penyiraman untuk tiap penyiraman masing-masing 100 ml. Penyiraman perlakuan Cr³⁺ dan Mn dilakukan satu minggu sekali, dan penyiraman tanaman dengan air dilakukan setiap hari dengan volume sesuai kebutuhan kecuali bersamaan dengan penyiraman perlakuan. Tanaman ditumbuhkan selama 1,5 bulan (umur 2,5 bulan) setelah pemberian perlakuan. Adapun rancangan perlakuan dapat dilihat pada (Tabel 1) dan setiap perlakuan dilakukan pengulangan sebanyak lima kali.

Tabel 1. Rancangan perlakuan kombinasi Mn dan Cr³⁺ pada penelitian. (The combination treatment design of Mn and Cr³⁺ in research).

Perlakuan Cr ³⁺ (mg/l)	Perlakuan Mn (mg/l)			
	0 (M0)	1 (M1)	5 (M2)	10 (M3)
0 (C0)	C0M0	C0M1	C0M2	C0M3
100 (C1)	C1M0	C1M1	C1M2	C1M3
500 (C2)	C2M0	C2M1	C2M2	C2M3

Pengukuran parameter

Parameter penelitian yang diukur meliputi pertumbuhan tanaman dan kadar Cr⁶⁺ di bagian akar dan pucuk. Pertumbuhan *T. erecta* ditentukan melalui pengukuran tinggi tanaman dan jumlah daun setiap minggu sekali serta panjang akar dan berat kering akar dan pucuk pada akhir penelitian. Penentuan berat kering tanaman dilakukan dengan cara dioven pada suhu 80°C selama dua hari (sampai berat mencapai konstan).

Pengukuran kadar Cr⁶⁺ secara spektrofotometris dengan metode difenilkarbasid yang digunakan Gheju *et al.* (2009) dengan modifikasi. Preparasi sampel akar dan pucuk tanaman *T. erecta* untuk analisis kadar Cr⁶⁺

menggunakan metode destruksi basah. Akar dan pucuk tanaman *T. erecta* setelah dicuci bersih dan dioven selama 2 hari pada suhu 80°C, ditimbang berat kering akar dan pucuk, selanjutnya sampel tumbuhan tersebut dihaluskan menggunakan blender. Sebanyak 0,2 g sampel yang telah diblender masing-masing bagian akar dan pucuk dimasukkan dalam erlenmeyer dan dipanaskan menggunakan *hotplate* dengan suhu 30°C. Sebelum dipanaskan ditambahkan larutan aqua regia (campuran 3 ml HNO₃ + 1 ml HCl + 0,5 ml H₂O₂). Setelah larutan dalam erlenmeyer menguap kemudian didinginkan, setelah sampel dingin kemudian disaring, selanjutnya filtrat siap digunakan untuk pengukuran kandungan Cr⁶⁺ menggunakan metode difenilkarbasid secara spektrofotometris dengan larutan standar Cr⁶⁺.

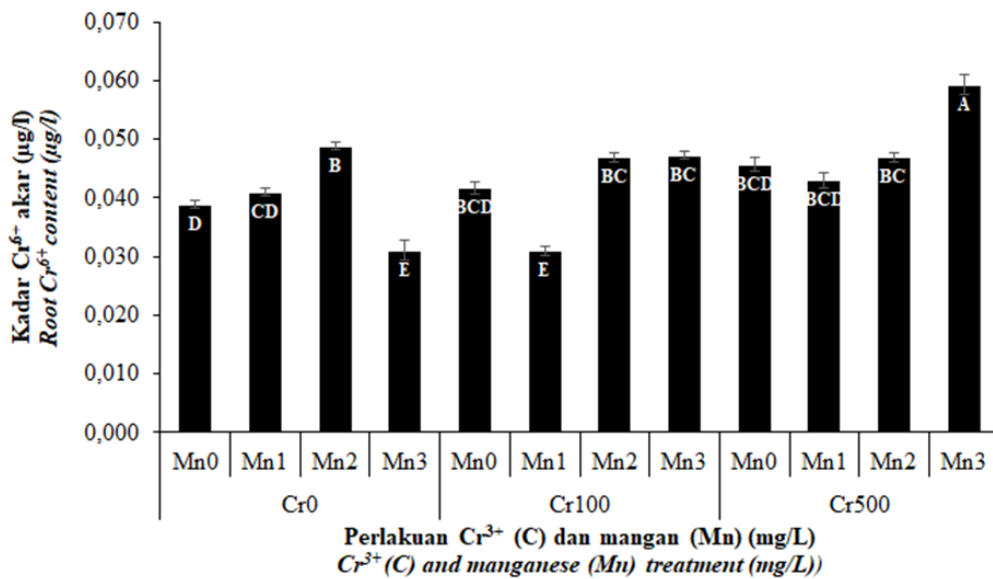
Analisis Data

Data hasil pengukuran parameter pertumbuhan dan kandungan Cr^{6+} dianalisis secara statistik menggunakan analisis sidik ragam dua arah (*two-way ANOVA*) menggunakan program SAS. Hasil analisis varian dari parameter yang berbeda nyata diuji lanjut menggunakan *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) taraf uji 5% untuk mengetahui beda nyata di antara rerata perlakuan atau kombinasi perlakuan.

HASIL

Kadar Cr^{6+} pada Akar dan Pucuk

Perlakuan Mn pada media tanam *T. erecta* yang mengandung Cr^{3+} menunjukkan bahwa Mn berpengaruh terhadap proses oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} , hal ini ditunjukkan dengan terdeteksinya Cr^{6+} dalam jaringan organ pucuk dan akar dari tanaman. Kombinasi perlakuan Cr^{3+} dan Mn juga menunjukkan pengaruh nyata terhadap pertumbuhan, kandungan Cr^{6+} dan kandungan pigmen fotosintetik dari tanaman *T. erecta* (Gambar 1).



Gambar 1. Kadar Cr^{6+} akar *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The root Cr^{6+} content of *T. erecta* in the Cr^{3+} and Mn treatment with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and concentrations of Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

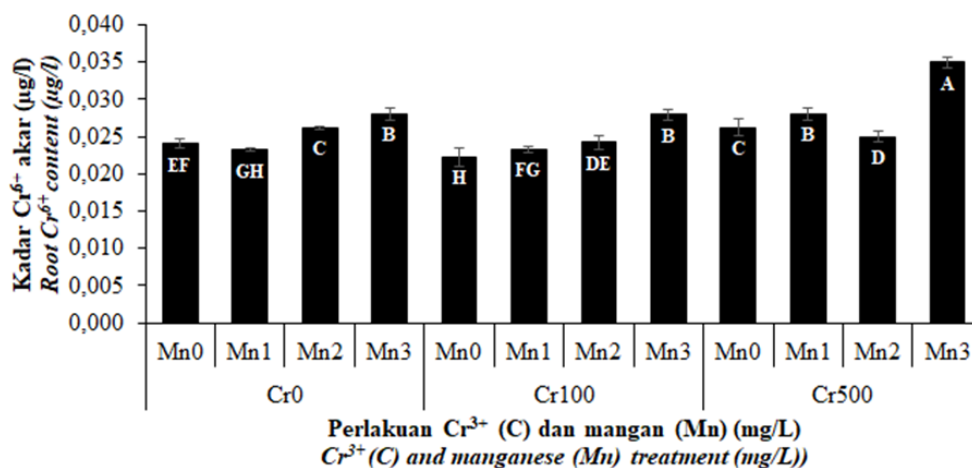
Efek interaksi Cr^{3+} dan Mn terhadap kadar Cr^{6+} dalam akar *T. erecta* bervariasi di antara perlakuan. Tanaman uji tanpa perlakuan Cr dengan penambahan Mn sebesar 1 mg/l (C0M1) dan 10 mg/l (C0M3) menunjukkan kadar Cr^{6+} dalam akar lebih besar dan berbeda nyata dibandingkan dengan tanpa penambahan Mn (C0M0) dan Mn sebesar 5 mg/l (C0M2). Tanaman uji dengan perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l, penambahan Mn dengan berbagai konsentrasi menunjukkan kadar Cr^{6+} akar yang berbeda. Kadar Cr^{6+} pada tanaman yang diberi Cr^{3+} sebesar 100 mg/l (C1M2) dan 500 mg/l (C2M2) mengalami penurunan secara signifikan dibanding tanaman tanpa perlakuan Cr^{3+} (C0M2). Tanaman *T. erecta* yang diberi perlakuan konsentrasi Mn tinggi (10 mg/l) dan Cr^{3+} 100

(C1M3) dan 500 mg/l (C2M3) menunjukkan kadar Cr^{6+} dalam akar yang tidak berbeda nyata. Kadar Cr^{6+} akar mulai terlihat mengalami peningkatan secara nyata pada penambahan Mn sebesar 5 dan 10 mg/l pada tanaman yang diberi perlakuan Cr^{3+} 100 mg/l, sedangkan Mn 1 mg/l menurunkan secara nyata dibandingkan perlakuan tanpa Mn. Kadar Cr^{6+} akar tertinggi dijumpai pada perlakuan C2M3 yaitu sebesar 0,059 $\mu g/l$.

Selain kadar Cr^{6+} akar, perlakuan Cr^{3+} dan Mn juga mempengaruhi secara nyata kadar Cr^{6+} pada bagian pucuk tanaman uji (Gambar 2). Kadar Cr^{6+} tanaman uji tanpa perlakuan Cr^{3+} menunjukkan perbedaan nyata antara yang ditambah Mn 0 (C0M0) dan 1 mg/l (C0M1) dengan Mn 5 (C0M2) dan 10 mg/l (C0M3). Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100

dan 500 mg/l pada tanaman yang diberi penambahan Mn dengan berbagai konsentrasi pada media tanamnya cenderung meningkatkan secara nyata kadar Cr^{6+} pada bagian pucuk *T. erecta*. Di antara perlakuan Mn, konsentrasi Mn sebesar 10 mg/l meningkatkan secara nyata kadar Cr^{6+} bagian pucuk pada tanaman *T. erecta* baik yang tanpa diberi perlakuan Cr^{3+} (C0M3) maupun dengan perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 (C1M3) dan 500 mg/l (C2M3). Kadar Cr^{6+} pada tanaman yang diberi Mn

sebesar 1 dan 5 mg/l pada Cr^{3+} sebesar 100 (C1M2) mengalami penurunan secara signifikan. Kadar Cr^{6+} bagian pucuk yang paling kecil dijumpai pada perlakuan Cr^{3+} 100 mg/l tanpa penambahan Mn pada medianya (C1M0) yaitu sebesar 0,022 $\mu\text{g/l}$, sedangkan yang paling besar dijumpai pada perlakuan Cr^{3+} 500 mg/l dan Mn 10 mg/l (C2M3) yaitu sebesar 0,035 $\mu\text{g/l}$.



Gambar 2. Kadar Cr^{6+} pucuk *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The shoot Cr^{6+} content of *T. erecta* in the Cr^{3+} and Mn treatment with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and concentrations of Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

Pertumbuhan Tanaman

Tanaman *T. erecta* yang ditumbuhkan pada media tanam (tanah: kompos = 3:1) dengan perlakuan kombinasi Cr^{3+} dan Mn pada berbagai konsentrasi menunjukkan respon yang berbeda baik dalam pertumbuhan dan kadar Cr^{6+} tanaman (akar dan pucuk) (Gambar 3). Perlakuan kombinasi Cr^{3+} dan Mn secara nyata mempengaruhi pertumbuhan tanaman *T. erecta* meliputi tinggi tanaman, jumlah

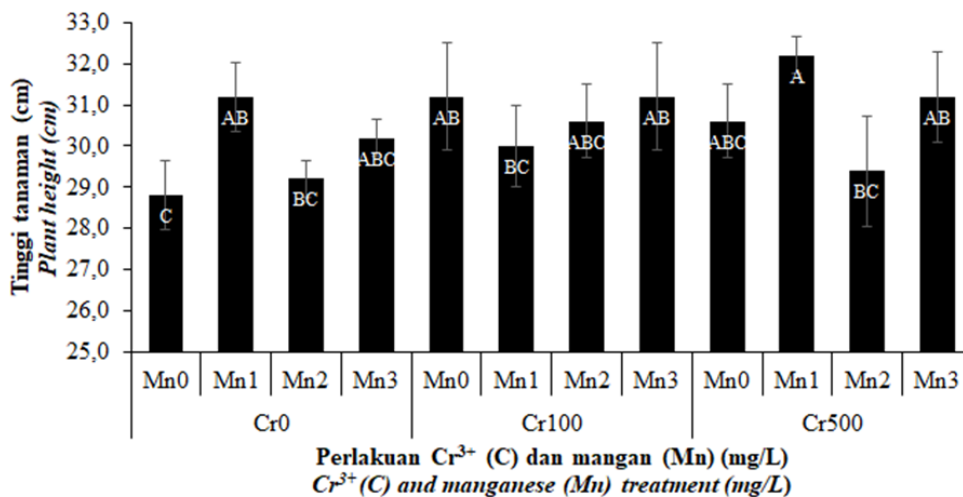
daun, panjang akar, serta berat kering. Perbedaan pengaruh kombinasi perlakuan Cr^{3+} dan Mn terhadap tinggi tanaman *T. erecta* paling signifikan ditunjukkan antara tanaman tanpa perlakuan Cr^{3+} dan Mn (C0M0 atau kontrol) dengan tanaman yang diberi perlakuan Cr^{3+} sebesar 500 mg/l dan Mn sebesar 5 mg/l (C2M1) (Gambar 4).



Gambar 3. Pertumbuhan tanaman *T. erecta* pada kombinasi perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Cr 100 mg/l dan Mn 0 mg/l (C1M0), Cr 100 mg/l dan Mn 1 mg/l (C1M1), Cr 100 mg/l dan Mn 5 mg/l (C1M2) serta Cr 100 mg/l dan Mn 10 mg/l (C1M3). (*The plant growth of T. erecta in combination treatment of Cr^{3+} and Mn with Cr 100 mg/l and Mn 0 mg/l (C1M0), Cr 100 mg/l and Mn 1 mg/l (C1M1), Cr 100 mg/l and Mn 5 mg/l (C1M2) and Cr 100 mg/l and Mn 10 mg/l (C1M3).*)

Pada tanaman tanpa perlakuan Mn (M0), perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l meningkatkan secara nyata tinggi tanaman. Semua konsentrasi Mn tidak mampu meningkatkan secara nyata tinggi tanaman yang diberi perlakuan Cr^{3+} sebesar 100, sedangkan pada Cr^{3+} 500 mg/l, konsentrasi Mn sebesar 1 dan 10 mg/l secara nyata

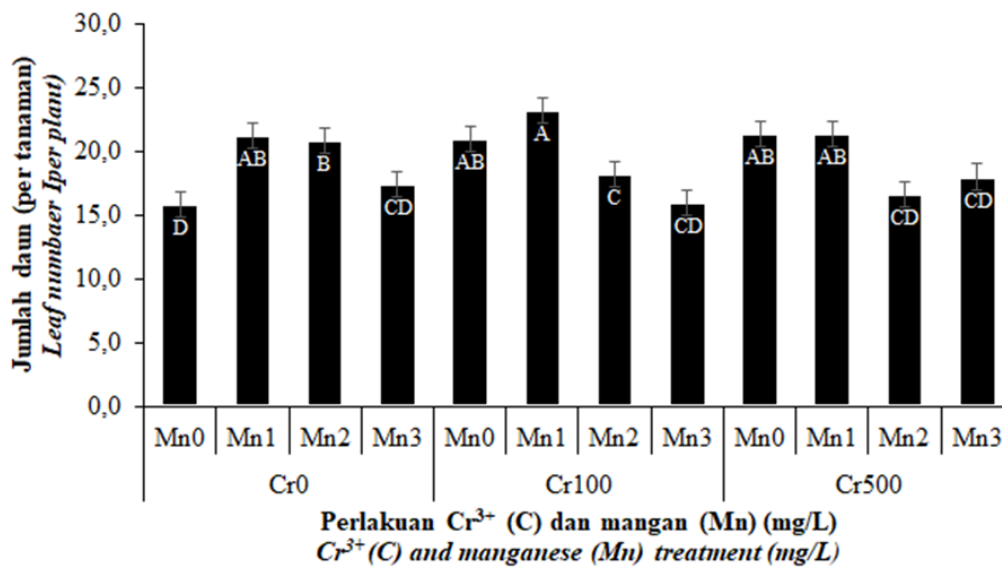
mampu meningkatkan tinggi tanaman. Tinggi tanaman paling rendah dijumpai pada tanaman tanpa perlakuan Cr^{3+} dan Mn (C0M0) yaitu sebesar 28,8 cm, sedangkan paling tinggi dijumpai pada tanaman dengan perlakuan Cr^{3+} sebesar 500 mg/l dan Mn sebesar 5 mg/l (C2M1) yaitu 32,2 cm.



Gambar 4. Tinggi tanaman *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The plant height of T. erecta in the Cr^{3+} and Mn treatments with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and concentration of Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

Pertumbuhan jumlah daun *T. erecta* dipengaruhi secara nyata oleh perlakuan Cr^{3+} dan Mn (Gambar 5). Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l pada tanaman kontrol (tanpa penambahan Mn pada media tanamnya) meningkatkan secara nyata jumlah daun. Jumlah daun pada tanaman dengan Mn sebesar 5 mg/l dan Cr^{3+} sebesar 100 (C1M2) dan 500 mg/l (C2M2) mengalami penurunan secara signifikan dibandingkan tanaman tanpa perlakuan Cr^{3+} (C0M2). Pada perlakuan konsentrasi Mn tinggi (10 mg/l), jumlah daun *T. erecta* untuk semua perlakuan konsentrasi Cr^{3+} (0, 100 dan 500 mg/l) tidak berbeda nyata. Jumlah daun secara nyata mengalami penurunan sejalan dengan meningkatnya konsentrasi Mn dalam media

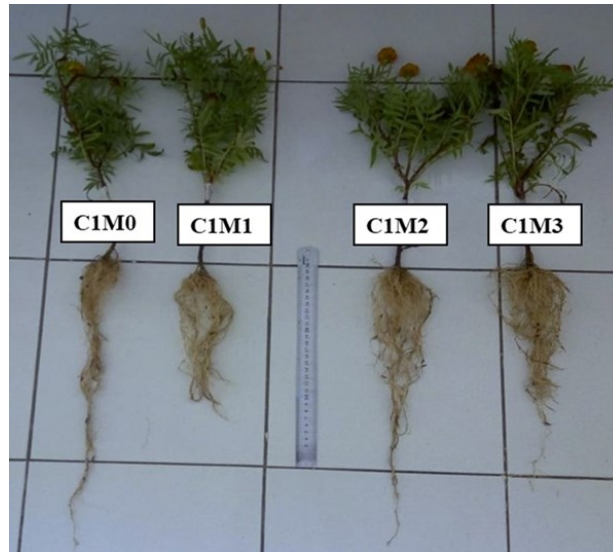
tanam. Penurunan jumlah daun tertinggi dijumpai pada perlakuan konsentrasi Mn sebesar 10 mg/l untuk semua perlakuan konsentrasi Cr^{3+} . Pada perlakuan konsentrasi Mn rendah (1 mg/l), perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l meningkatkan jumlah daun pada *T. erecta*. Jumlah daun tanaman tanpa perlakuan Cr^{3+} dan Mn (C0M0) dengan yang diberi perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 mg/l dan Mn sebesar 1 mg/l (C1M1) menunjukkan perbedaan paling besar dan signifikan, dengan rata-rata jumlah daun masing-masing berturut-turut sebanyak 15,8 dan 23,2 per tanaman.



Gambar 5. Jumlah daun *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The leaves number of T. erecta in the Cr³⁺ and Mn treatments with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and concentration of Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

Pertumbuhan panjang akar pada tanaman *T. erecta* yang diberi perlakuan Cr^{3+} dan Mn menunjukkan perbedaan secara nyata di antara perlakuan (Gambar 6). Pertumbuhan panjang akar paling terhambat ditunjukkan pada *T. erecta* dengan perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 mg/l untuk seluruh perlakuan konsentrasi Mn. Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l menurunkan panjang akar *T. erecta* tanpa perlakuan Mn (M0)

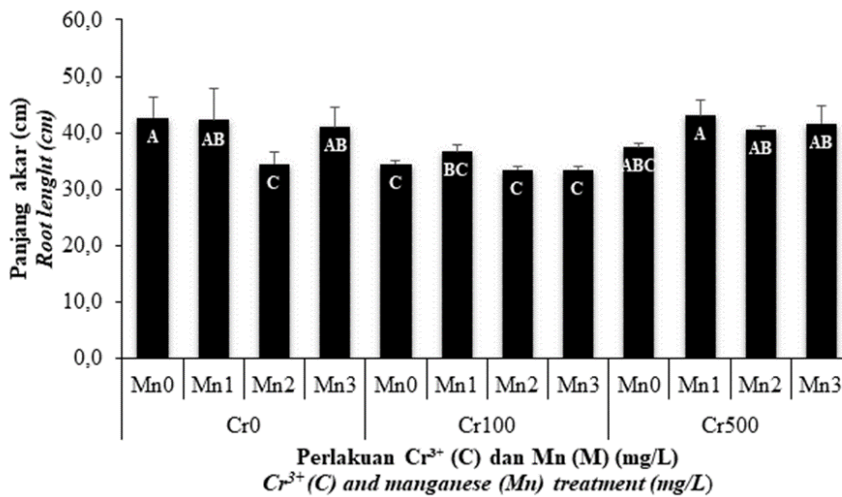
(Gambar 7). Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l pada tanaman kontrol tanpa diberi penambahan Mn dalam media tanamnya meningkatkan secara nyata panjang akar. Panjang akar tanaman yang diberi Mn sebesar 1 mg/l dan Cr^{3+} sebesar 100 (C1M1) dan Mn sebesar 5 mg/l dan Cr^{3+} sebesar 100 mg/l (C1M2) mengalami penurunan secara signifikan dibandingkan tanpa perlakuan (C0M0).



Gambar 6. Pertumbuhan panjang akar *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Cr 100 mg/l dan Mn 0 mg/l (C1M0), Cr 100 mg/l dan Mn 1 mg/l (C1M1), Cr 100 mg/l dan Mn 5 mg/l (C1M2) serta Cr 100 mg/l dan Mn 10 mg/l (C1M3). (*T. erecta* root length growth in Cr^{3+} and Mn treatment with concentrations of Cr 100 mg/l and Mn 0 mg/l (C1M0), Cr 100 mg/l and Mn 1 mg/l (C1M1), Cr 100 mg/l and Mn 5 mg/l (C1M2) and Cr 100 mg/l and Mn 10 mg/l (C1M3)).

Pada perlakuan konsentrasi Cr^{3+} 500 mg/l panjang akar tanaman tidak mengalami perbedaan secara nyata dibandingkan dengan perlakuan Cr^{3+} 0. Pengaruh penambahan Mn terhadap panjang akar tanaman *T. erecta* dengan perlakuan Cr^{3+} 100 mg/l tidak menunjukkan pengaruh berbeda nyata di antara konsentrasi Mn. Hasil yang berbeda ditunjukkan pada tanaman dengan Cr^{3+} sebesar 500 mg/l, penambahan Mn meningkatkan panjang akar

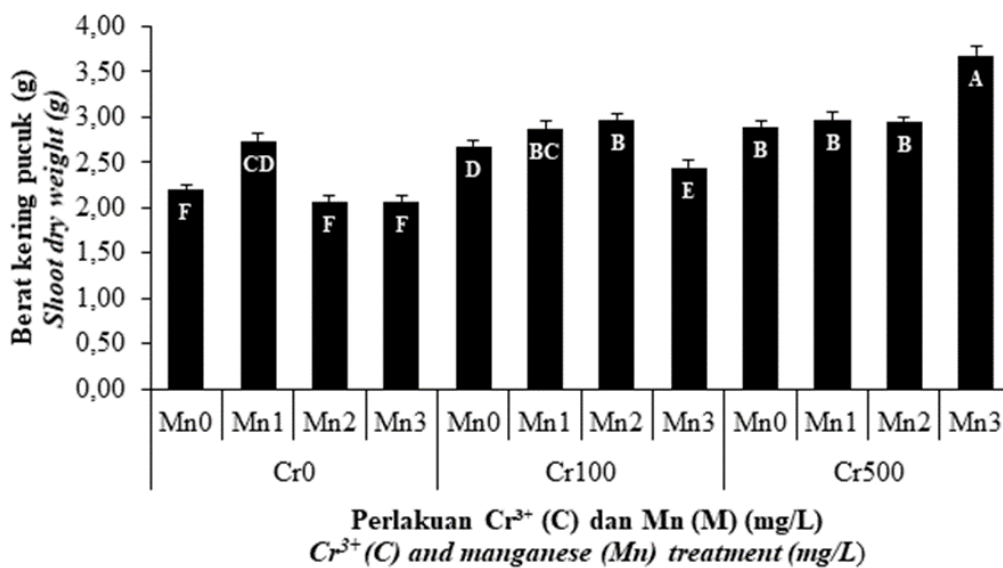
T. erecta dan pengaruhnya berbeda nyata diantara konsentrasi Mn. Hasil ini menunjukkan ada pengaruh interaksi di antara Mn dan Cr^{3+} yang diberikan terhadap pertumbuhan panjang akar. Tanaman dengan panjang akar terbesar dijumpai pada perlakuan Cr^{3+} 500 mg/l dan Mn 5 mg/l (C2M1) dan terkecil pada perlakuan Cr^{3+} 100 mg/l dengan Mn 5 dan 10 mg/l (C1M1 dan C1M2), berturut-turut masing-masing 43,0 dan 34,4 cm.



Gambar 7. Panjang akar *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The root length of T. erecta* in Cr^{3+} and Mn treatment with concentrations of Cr 100 mg/l and Mn 0 mg/l (C1M0), Cr 100 mg/l and Mn 1 mg/l (C1M1), Cr 100 mg/l and Mn 5 mg/l (C1M2) and Cr 100 mg/l and Mn 10 mg/l (C1M3)).

Interaksi perlakuan Cr^{3+} dan Mn mempengaruhi secara nyata biomasa organ pucuk yang ditentukan berdasarkan berat kering pucuk (Gambar 8). Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l pada tanaman yang diberi penambahan Mn pada media tanamnya meningkatkan secara nyata berat kering pucuk dibandingkan tanpa perlakuan Cr^{3+} . Pada tanaman *T. erecta* tanpa perlakuan Cr^{3+} , penambahan Mn dengan konsentrasi sebesar 5 dan 10 mg/l menurunkan secara nyata berat kering pucuk dibandingkan tanaman yang diberi perlakuan

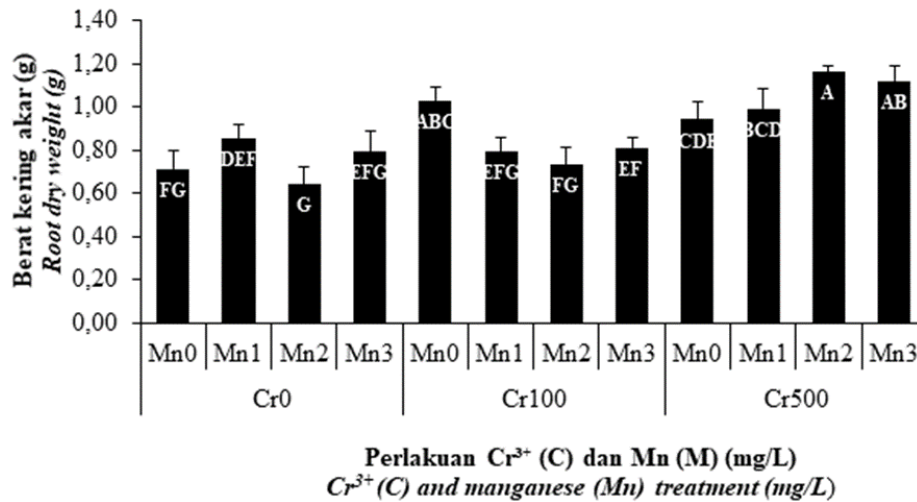
Cr^{3+} dengan konsentrasi lebih tinggi (100 dan 500 mg/l). Penambahan Mn sampai sebesar 5 mg/l meningkatkan berat kering pucuk dibanding kontrol (tanpa penambahan Mn) pada tanaman yang diberi perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 mg/l, sedangkan pada konsenrasi 10 mg/l terjadi penurunan berat kering pucuk. Penambahan Mn pada tanaman dengan perlakuan Cr^{3+} konsentrasi tinggi (500 mg/l) menunjukkan efek yang berbeda dengan Cr^{3+} rendah (100 mg/l), yaitu meningkatkan berat kering pucuk dan nilai berat kering pucuk tertinggi dijumpai pada perlakuan Mn 10 mg/l yaitu sebesar 3,68 g.



Gambar 8. Berat kering pucuk *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The shoot dry weight of T. erecta in the Cr³⁺ and Mn treatments with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and concentrations of Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

Berat kering akar *T. erecta* dipengaruhi secara nyata oleh perlakuan Cr^{3+} dan Mn (Gambar 9). Perlakuan Cr^{3+} sebesar 100 dan 500 mg/l pada tanaman tanpa penambahan Mn dalam media tanamnya (M0) meningkatkan secara nyata jumlah berat kering akar. Berat kering akar tanaman dengan Mn sebesar 1, 5, 10 mg/l dan Cr^{3+} sebesar 100 (C1M2) dan tanpa Cr^{3+} (kontrol) mengalami penurunan secara signifikan dibandingkan tanaman dengan Cr 500 mg/l dan Mn 5 mg/l (C2M3). Penurunan berat kering akar pada kombinasi tanpa Cr^{3+} (0 mg/l) dan Mn sebesar 5 mg/l (C0M2)

terlihat paling signifikan dibandingkan perlakuan lain. Efek Cr^{3+} dan Mn terhadap berat kering akar tanaman uji menunjukkan pola yang berbeda dengan berat kering pucuk. Tanaman uji tanpa perlakuan Cr^{3+} mengalami peningkatan berat kering pada penambahan Mn sebesar 1 (C0M1) dan 10 mg/l (C0M3) dibanding tanpa Mn (C0M0). Penambahan Mn sebesar 5 dan 10 mg/l meningkatkan secara nyata berat kering akar pada tanaman dengan perlakuan Cr^{3+} tinggi (500 mg/l), dan berat kering akar tertinggi (1,158 g) dijumpai pada perlakuan C2M2 (Cr^{3+} 500 mg/l dan Mn 5 mg/l). Berat kering akar terendah dijumpai pada tanaman uji dengan perlakuan C0M2 (tanpa Cr^{3+} dan Mn 5 mg/l) yaitu sebesar 0,636 g.



Gambar 9. Berat kering akar *T. erecta* pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn dengan konsentrasi Mn sebesar 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) dan 10 mg/l (Mn3), serta konsentrasi Cr 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) dan 500 mg/l (Cr500). (*The shoot dry weight of *T. erecta* in Cr^{3+} and Mn treatment with Mn concentrations of 0 mg/l (Mn0), 1 mg/l (Mn1), 5 mg/l (Mn2) and 10 mg/l (Mn3), and Cr concentrations 0 mg/l (Cr0), 100 mg/l (Cr100) and 500 mg/l (Cr500).*)

PEMBAHASAN

Penentuan kadar Cr^{6+} dalam akar dan daun bertujuan untuk mendeteksi oksidasi Cr^{3+} yang dapat terjadi di dalam media oleh Mn atau di dalam sel. Kadar Cr^{6+} pada akar dan pucuk menunjukkan nilai yang tinggi pada perlakuan Cr^{3+} dan Mn konsentrasi tinggi. Terdeteksinya Cr^{6+} pada akar dan pucuk *Tagetes* yang diberi perlakuan Cr^{3+} dan Mn ini menunjukkan bahwa Cr di dalam jaringan tumbuhan selain mengalami reaksi reduksi, dapat juga mengalami oksidasi, tergantung bentuk kimia Cr. Shanker *et al.* (2005), menyatakan adanya kemungkinan reaksi oksidasi Cr^{3+} tersebut terjadi di dalam sel tumbuhan, namun mekanisme oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} di dalam jaringan tumbuhan masih perlu dikaji lebih lanjut, untuk mengetahui proses atau senyawa apa yang menyebabkan reaksi oksidasi tersebut terjadi. Proses oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} dapat terjadi di dalam media oleh adanya Mn yang diberikan. Reaksi oksidasi Cr^{3+} oleh Mn oksida dapat mengalami peningkatan di lingkungan oleh adanya perubahan kondisi lingkungan fisika dan kimia. Adanya agen pengkelat organik mampu meningkatkan pelarutan mineral di dalam lingkungan dan memacu oksidasi Cr^{3+} . Peningkatan laju pelarutan Cr^{3+} di dalam tanah akan meningkatkan laju oksidasi Cr^{3+} oleh Mn oksida (James, 2002; Kim *et al.*, 2002).

Terjadinya oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} oleh adanya perlakuan Mn berperan dalam meningkatkan penghambatan pertumbuhan *T. erecta*, karena proses oksidasi Cr^{3+} menjadi Cr^{6+} yang terjadi di dalam media maupun di dalam sel tanaman merupakan salah satu penyebab

meningkatnya toksisitas Cr^{3+} . Meskipun Cr^{3+} dilaporkan memiliki toksisitas lebih rendah dibandingkan Cr^{6+} , namun apabila Cr^{3+} mengalami transformasi menjadi Cr^{6+} maka toksisitasnya akan meningkat terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Toksisitas Cr^{6+} di dalam media hasil oksidasi Cr^{3+} akan mempengaruhi pertumbuhan *T. erecta*. Cr^{6+} merupakan bentuk Cr yang lebih toksik dan memiliki dampak besar pada proses metabolisme serta mengurangi pertumbuhan dan produktivitas tanaman (Pradhan *et al.*, 2017; Ugwu dan Agunwamba, 2020), dapat menginduksi produksi radikal bebas yang meningkatkan degradasi biomolekul yang ada dalam sel tanaman (Ertani *et al.*, 2017; Ranieri *et al.*, 2020), serta menyebabkan sitotoksik, genotoksik dan ketidakseimbangan hormon yang menghambat perkecambahan dan perkembangan tanaman serta mengurangi produksi bahan kering (Chebeir *et al.*, 2016; Jobby *et al.*, 2018).

Pengaruh interaksi Cr^{3+} dan Mn terhadap tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, berat kering akar dan pucuk pada *T. erecta* bervariasi tergantung dari besaran konsentrasi Cr^{3+} dan Mn yang diberikan. Efek terhadap tinggi tanaman paling besar hanya dijumpai pada *T. erecta* dengan perlakuan Mn sebesar 5 mg/l dan Cr^{3+} 500 mg/l yaitu mencapai 32,2 cm. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi Cr^{3+} dan Mn pada konsentrasi tinggi menghambat pembentukan daun tanaman. Interaksi Mn pada Cr^{3+} pada konsentrasi tinggi memacu pertumbuhan akar. Berat kering pucuk dan akar *Tagetes* dipengaruhi oleh interaksi Cr^{3+} dan Mn, terutama pada Cr^{3+} dan Mn konsentrasi tinggi.

Pengaruh interaksi Mn dan Cr^{3+} juga dilaporkan Shafique *et al.* (2021) pada jagung. Berdasarkan hasil penelitiannya dilaporkan bahwa Cr dan Mn konsentrasi tinggi dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman, namun pada konsentrasi Mn rendah dengan konsentrasi krom tinggi tidak mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Perlakuan 0,5 M MnCl_2 dan 0,5 M CrCl_3 dilaporkan sangat mempengaruhi berat basah dan berat kering daun, namun tidak terhadap berat kering akar. Haokip dan Gupta (2020) juga melaporkan bahwa perlakuan interaksi Cr dan Mn mampu meningkatkan pertumbuhan dan penyisihan (removal) Cr dan Mn dalam medium oleh tanaman kangkung air (*Ipomoea aquatica*).

Apabila dilihat dari rata-rata biomassa kering akar dan pucuk, penambahan Mn sampai 10 mg/l mampu meningkatkan biomassa *T. erecta* pada cekaman Cr baik 100 mg/l maupun 500 mg/l. Efek peningkatan biomassa pada perlakuan konsentrasi Cr dan penambahan Mn konsentrasi tinggi ini dapat disebabkan oleh beberapa di antaranya Cr^{3+} bersifat kurang toksik karena kelarutannya rendah dan mudah membentuk kompleks dengan materi organik, atau karena belum semua Cr^{3+} belum mengalami oksidasi menjadi Cr^{6+} sehingga toksisitasnya masih dapat ditoleransi oleh tanaman. Sifat toksik Cr^{3+} terhadap tumbuhan lebih disebabkan oleh efek secara tidak langsung, yaitu melalui pengubahan pH dan atau penghambatan transpor ion, bukan disebabkan oleh kekuatan oksidatifnya (Mei *et al.*, 2002; Shanker *et al.*, 2005).

Cr tidak tergolong dalam kelompok unsur esensial bagi tanaman, namun memiliki struktur yang mirip dengan banyak unsur esensial, sehingga dapat diserap oleh tanaman dan mempengaruhi status unsur hara pada tanaman (Tiwari *et al.*, 2013; Ali *et al.*, 2018). Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dilaporkan adanya hubungan sinergis antara Cr dan Mn. Chen *et al.* (2017) melaporkan Cr meningkatkan penyerapan Mn tetapi mengurangi kadar Fe, Cu, Zn, dan S pada daun semangka. Pada tanaman tingkat tinggi, Cr (VI) meningkatkan serapan dan translokasi Mn pada daun muda *Lolium perenne* dan *Citrullus vulgaris* (Saleem *et al.*, 2022).

KESIMPULAN

Penambahan Mn dalam media tanam *T. erecta* yang mengandung kromium trivalen (Cr^{3+}) meningkatkan proses oksidasi Cr^{3+} , ditunjukkan dengan terdeteksinya Cr^{6+} dalam bagian akar dan pucuk tanaman. Peningkatan oksidasi Cr^{3+} paling tinggi dijumpai pada penambahan Mn sebesar 10 mg/l. Kadar Cr^{6+} akar dan pucuk *T. erecta* tertinggi dijumpai pada perlakuan Cr^{3+} 500 mg/l dan Mn 10

mg/l berturut-turut sebesar 0,059 dan 0,035 $\mu\text{g/l}$. Cr^{3+} dan Mn pada konsentrasi tinggi meningkatkan tinggi tanaman, panjang akar, berat kering akar dan pucuk, namun menghambat pembentukan daun *T. erecta*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Penina Intansari atas penyediaan lahan untuk pelaksanaan penelitian dan dukungannya selama penelitian, serta kepada Joko Wartanto, S.Si. atas bantuan dan pendampingan selama penelitian di Laboratorium Fakultas Biologi UKSW.

DAFTAR PUSTAKA

- Akinci, I.E and Akinci, S., 2010. Effect of chromium toxicity on germination and early seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.). *African Journal of Biotechnology*, 9(29), pp. 4589–4594.
- Augustynowicz, J., Grosicki, M., Hanus-Fajerska, E., Lekka, M., Andrzej Waloszek, A and Kołoczek, H., 2010. Chromium(VI) bioremediation by aquatic macrophyte *Callitriche cophocarpa* Sendtn. *Chemosphere*, 79, pp. 1077–1083.
- Ali, S., Rizwan, M., Bano, R., Bharwana, S.A., Rehman, M.Z., Hussain, M.B and Al-Wabel, M., 2018. Effects of biochar on growth, photosynthesis, and chromium (Cr) uptake in *Brassica rapa* L. under Cr stress. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17), pp. 1–7.
- Chebeir, M., Chen, G and Liu, H., 2016. Emerging investigators series: frontier review: occurrence and speciation of chromium in drinking water distribution systems. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2(6), pp. 906–914.
- Chen, Q., Zhang, X., Liu, Y., Wei, J., Shen, W., Shen, Z and Cui, J., 2017. Heminmediated alleviation of zinc, lead and chromium toxicity is associated with elevated photosynthesis, antioxidative capacity; suppressed metal uptake and oxidative stress in rice seedlings. *Plant Growth Regulation*, 81, pp. 253–264.
- Chitraprabha, K and Sathyavathi, S., 2018. Phytoextraction of chromium from electroplating effluent by *Tagetes erecta* (L.). *Sustainable Environment Research*, 128, pp. 128–134.
- Coelho, L.C., Bastos, A.R.B., Pinho, P.J., Souza, G.A., Carvalho, J.G., Coelho, V.A.T., Oliveira, L.C.A., Domingues, R.R and Faquin, V., 2017. Marigold (*Tagetes erecta*): The potential value in phytoremediation of chromium. *Pedosphere*, 27 (3), pp. 559–567.
- Coetzee, J.J., Bansal, N and Chirwa, E.M.N., 2020. Chromium in environment, its toxic effect from

- chromite mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation. *Exposure and Health*, 12(1), pp. 51–56.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F and Xie, Y., 2015. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*, 2015, pp. 1–18.
- Ertani, A., Mietto, A., Borin, M and Nardi, S., 2017. Chromium in agricultural soils and crops: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228 (190), pp. 1–12.
- Gheju, M., Balcu, I and Ciopec, M., 2009. Analysis of hexavalent chromium uptake by plants in polluted soils. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 20(1), pp. 127–131.
- Gomes, M.A.C., Hauser-Davis, R.A., Suzukia, M.S and Vitória, A.P., 2017. Review. Plant chromium uptake and transport, physiological effects and recent advances in molecular investigations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 140, pp. 55–64.
- Haokip, N and Gupta, A., 2020. Phytoremediation of chromium and manganese by *Ipomoea aquatica* Forssk. from aqueous medium containing chromium-manganese mixtures in microcosms and mesocosms. *Water and Environment Journal*, 35(3), pp. 884–891.
- Hemalatha, G., Sujitha, S and Pavithra, G.S., 2014. Studies on reduction and removal of hexavalent chromium in industrial waste water by *Alternanthera sessilis* and *Tagetes erecta*. *Bio Technology an Indian Journal*, 9(4), pp. 147–152.
- James, B.R., 2002. *Chemical transformations of chromium in soils: relevance to mobility, bio-availability and remediation*. The chromium file from the International Chromium Development Association, 8, 8 p
- Jobby, R., Jha, P., Yadav, A.K and Desai, N., 2018. Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr (VI)]: a comprehensive review. *Chemosphere*, 207, pp. 255–266.
- Kasmiyati, S dan Sucahyo, 2014. Deteksi cekaman oksidatif akibat toksisitas krom pada *Sonchus oleraceus* melalui penentuan spesies oksigen reaktif secara spektrofotometri dan histokimia. *Agric*, 26 (1 dan 2), pp. 85–98.
- Kasmiyati, S., Santosa, Priyambada, I.D., Dewi, K dan Sandradewi, R., 2015. Perkecambah biji dan pertumbuhan kecambah varietas sorgum (*Sorghum bicolor* L.) pada cekaman krom heksavalen. *Bioma*, 17(1), 41–54.
- Kasmiyati, S., Santosa, Priyambada, I.D., Dewi, K., Sucahyo and Sandradewi, R., 2016. Growth response of *Sorghum bicolor* cultivars to trivalent chromium stress. *Biosaintifika*, 8(1), pp. 73–86.
- Kasmiyati, S., 2016. Mekanisme toleransi *Sorghum bicolor* (L.) moench. terhadap cekaman krom: Kajian fisiologis, anatomis, biokimia dan molekular. *Dissertation*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Indonesia.
- Kim, J.G., Dixon, J.B., Chusuei, C.C and Deng, Y., 2002. Oxidation of chromium (III) to (VI)
- Shah, K., Mankad, A.U and Reddy, M.N., 2017. Cadmium accumulation and its effects on growth and biochemical parameters in *Tagetes erecta* L. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(3), pp. 111–115.
- Shah, K., Mankad, A.U and Reddy, M.N., 2017. Lead accumulation and its effects on growth and biochemical parameters in *Tagetes erecta* L. *International Journal of Life Sciences Scientific Research*, 3(4), pp. 1142–1147
- Liu, J., Duan, C.Q., Zhang, X.H., Zhu, Y.N and Hu, C., 2011. Characteristics of chromium (III) uptake in hyperaccumulator *Leersia hexandra* Swartz. *Environmental and Experimental Botany*, 74, pp. 122–126.
- Madanan, M.T., Shah, I.K., Varghese, G.K and Kaushal, R.K., 2018. Application of aztec marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, pp. 17–22.
- Maqbool A., Ali S., Rizwan M., Ishaque W., Rasool N., Rehman, M.Z.U., Bashir, A., Abid, M and Wu, L., 2018. Management of tannery wastewater for improving growth attributes and reducing chromium uptake in spinach through citric acid application. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), pp. 10848–10856.
- Masciarelli, E., Visconti, U., Ficociello, B and Casorri, L., 2017. Minireview on chromium in agricultural plants and consequences for human nutrition. *Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(2), pp. 53–60.
- Maryani, Amalia, N.N and Agustina, T., 2020. Batik liquid waste inhibited germination and degraded root tissues of *Tagetes erecta* L. and *Zinnia violacea* Cav. *AIP Conference Proceedings*, pp. 1–7.
- Mei, B., Puryear, J.D and Newton, R.J., 2002. Assessment of Cr tolerance and accumulation in selected plant species. *Plant and Soil*, 247(2), pp. 223–231.
- Parihar, A and Malaviya, P., 2015. Effect of textile effluent on the growth and pigment content of *Tagetes erecta* L. (var. Pusa Basanti). *Indian Journal of Applied Research*, 5(5), pp. 1–3.
- Pradhan, D., Sukla, L.B., Sawyer, M and Rahman, P.K., 2017. Recent bioreduction of hexavalent chromium in wastewater treatment: a review.

- Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 55, pp. 1–20.
- Ramana, S., Biswas, A. K., Ajay, Singh, A.B and Ahirwar, N.K., 2012. Phytoremediation of chromium by tuberose. *National Academy Science Letters*, 35, pp. 71–73.
- Ranieri, E., Moustakas, K., Barbafieri, M., Ranieri, A.C., Herrera-Melián, J.A., Petrella, A and Tommasi, F., 2020. Phytoextraction technologies for mercury-and chromium-contaminated soil: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 95 (2), pp. 317–327.
- Saleem, M.H., Afzal, J., Rizwan, M., Shah, Z., Depar, N and Usman, K., 2022. Chromium toxicity in plants: consequences on growth, chromosomal behavior and mineral nutrient status. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 46, pp. 371–389.
- Shanker, A.K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H and Avudainayagam, S., 2005. Chromium toxicity in plants. *Environment International*, 31(5), pp. 739–753.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N.K., Dumat, C and Rashid, M.I., 2017. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, 178, pp. 513–533.
- Sharma, A., Kapoor, D., Wang, J., Shahzad, B., Kumar, V., Aditi Shreeya Bali, A.S., Jasrotia, S., Zheng, B., Yuan, H and Yan, D., 2020. Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: an overview. *Plants*, 9(100), pp. 1–17.
- Shafique, F., Ali, Q., Saleem, M.Z., Bhatti, T.Y., Zikrea, A., Saifullah, Akhter, S and Malik, A., 2021. Effect of manganese and chromium toxicity on growth and photosynthetic pigments of maize. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22 (1 and 2), pp. 58–64.
- Srivastava, D., Tiwari, M., Dutta, P., Singh, P., Chawda, K., Kumari, M and Chakrabarty, D., 2021. Chromium stress in plants: toxicity, tolerance and phytoremediation. *Sustainability*, 13(4629), pp. 1–20.
- Tiwari, K., Singh, N and Rai, U., 2013. Chromium phytotoxicity in radish (*Raphanus sativus*): effects on metabolism and nutrient uptake. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 91, pp. 339–344.
- Ugwu, E.I and Agunwamba, J.C., 2020. A review on the applicability of activated carbon derived from plant biomass in adsorption of chromium, copper, and zinc from industrial wastewater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (240), pp. 1–12.
- Zaheer, I.E., Ali S., Saleem, M.H., Yousaf, H.S., Malik, A., Abbas, Z., Rizwan, M., Abualreesh, M.H., Alatawi, A and Wang, X., 2022. Combined application of zinc and iron-lysine and its effects on morpho-physiological traits, antioxidant capacity and chromium uptake in rapeseed (*Brassica napus* L.). *PLOS ONE*, 17 (1), pp. 1–23.