

**FITOREMEDIASI Zn (SENG)
MENGUNAKAN TANAMAN NORMAL DAN TRANSGENIK
Solanum nigrum L.**



Tesis

SODIQ PRATOMO, S.Si
L4K 001 086

**PROGRAM MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

TESIS

**FITOREMEDIASI Zn (SENG)
MENGUNAKAN TANAMAN NORMAL DAN TRANSGENIK
Solanum nigrum L.**

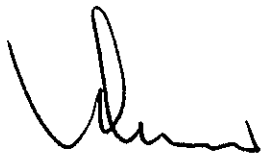
Disusun oleh :

SODIQ PRATOMO, S.Si
L4K001086

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
Pada tanggal 19 Mei 2004
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



Ir. Sumarno, MSi
NIP. 130 892 624

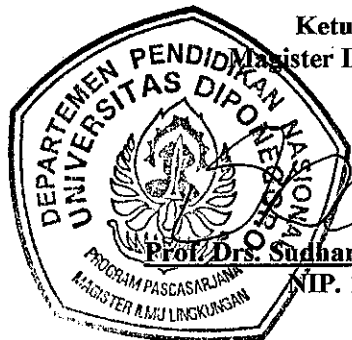
Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. M. Ahkam Subroto, M App Sc
NIP. 320 005 982

Ketua Program

Magister Ilmu Lingkungan



Prof. Drs. Sudharto P. Hadi, MES., PhD.
NIP. 130 810 134

UPT-PUSTAK-UNDIP

No. Daft: 3583 A / MIL / Cj
Tgl. : 4/3 04

Lembar Pengesahan

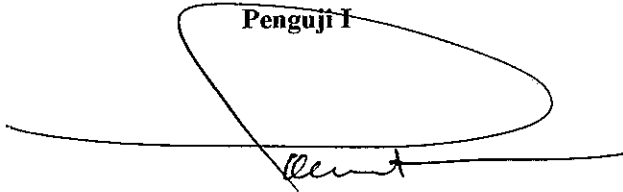
**FITOREMEDIASI Zn (SENG)
MENGUNAKAN TANAMAN NORMAL DAN TRANSGENIK
*Solanum nigrum L.***

Disusun oleh :

SODIQ PRATOMO, S.Si
L4K001086

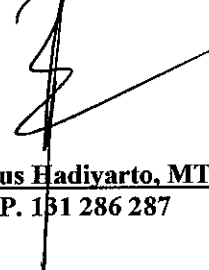
Menyetujui dan mengesahkan :

Penguji I



Dr. Ir. Purwanto, DEA
NIP. 131 601 417

Penguji II



Ir. Agus Hadiyanto, MT
NIP. 131 286 287

Mengetahui Komisi Pembimbing :

Pembimbing I



Ir. Sumarno, MSI
NIP. 130 892 624

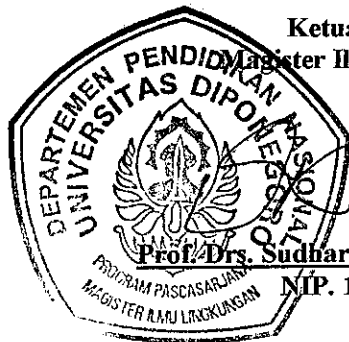
Pembimbing II



Dr. Ir. M. Ahkam Subroto, M App Sc
NIP. 320 005 982

Ketua Program

Magister Ilmu Lingkungan

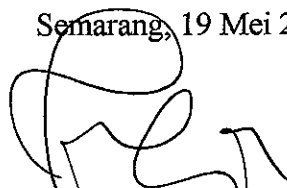


Prof. Drs. Sudharto P. Hadi, MES., PhD.
NIP. 130 810 134

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini adalah pekerjaan saya sendiri dan didalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu lembaga perguruan tinggi dan lembaga pendidikan lainnya. Pengetahuan yang diperoleh dari hasil penerbitan maupun yang belum / tidak diterbitkan, sumbernya dijelaskan di dalam tulisan dan daftar pustaka.

Semarang, 19 Mei 2004



SODIO PRATOMO, S.Si
NIM : L4K001086

ABSTRAK

Berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air diketahui bahwa pencemaran logam berat di sungai di Indonesia, terutama logam berat Zn (seng), telah melebihi batas ambang persyaratan kualitas air Kelas I, II dan III. Salah satu metode yang aplikatif dan diharapkan mampu menangani masalah pencemaran logam berat adalah dengan cara fitoremediasi, yaitu menggunakan tanaman atau bagian-bagiannya sebagai sistem pengolahan biologis yang alami. Penelitian ini menggunakan tanaman *Solanum nigrum* L transgenik dan normal yang ditumbuhkan pada media yang mengandung logam berat Zn dengan konsentrasi tambahan 0 mg/kg media (kontrol) dan 200 mg/kg media dengan menggunakan pot-pot dalam rumah kaca ketika tanaman berumur 28 hari. Pengamatan pertumbuhan tanaman dan kandungan Zn dalam setiap bagian tanaman (akar, batang, daun dan buah) dilakukan setiap dua minggu sekali dengan memanen setiap sampel tanaman hingga berakhirnya siklus pertumbuhan tanaman (26 minggu). Parameter-parameter yang diukur untuk setiap bagian tanaman dan tanah untuk masing-masing perlakuan adalah berat basah, berat kering, dan kandungan Zn dalam setiap bagian tanaman. Metode yang digunakan untuk pembagian tanaman adalah metode yang digunakan oleh Eltayeb et al. (1997) dan Lancaster & Mann (1975). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinetika pertumbuhan tanaman *Solanum nigrum* L. baik normal maupun transgenik tidak terpengaruh oleh pemaparan logam berat Zn pada media dan membentuk kurva pertumbuhan sesuai dengan model persamaan Monod. Logam berat Zn terakumulasi paling besar di bagian akar untuk tanaman *Solanum nigrum* L transgenik, sedangkan pada tanaman normalnya secara umum terakumulasi pada daun dan atau batang. Selama siklus hidupnya kemampuan tanaman *Solanum nigrum* L dalam menyerap logam berat Zn pada awalnya menaik, kemudian menurun sampai berakhirnya daur hidup tanaman tersebut. Kemampuan tanaman transgenik *Solanum nigrum* L. dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat Zn pada konsentrasi yang tidak berbeda dibandingkan dengan nilai konsentrasi fisiologis yang dapat dijerap dan diakumulasi oleh tanaman normalnya.

Kata Kunci : Fitoremediasi, Logam berat Zn, *Solanum nigrum* L., Tanaman transgenik.

ABSTRACT

Based on the Indonesian Government's Regulation No. 82/2001 on Water Quality Management and Water Pollution Control, it was previously studied that heavy metal pollution in river stream in Indonesia, especially heavy metal Zn (zinc), has exceeded the maximum threshold for water quality Class I, II and III. One of the applicable methods that can be expected capable to deal with heavy metal pollution problems is phytoremediation, i.e. the use of plants or plant parts as a natural biological treatment system. This research used normal and transgenic plants of *Solanum nigrum* L. grown on medium containing Zn of 0 mg/kg medium (control) and 200 mg/kg medium in pots under green house conditions when the plants were 28-day old. Observation on plant growth and Zn contents in every plant part (roots, stems, leaves and fruits) was conducted every 2 weeks by harvesting triplicate samples of the plants until the end of their life cycle (26 weeks). The measured parameters for every plant part and soil for each treatment were wet weights, dry weights, and Zn contents. The method used for the plant division was the method according to Eltayeb et al. (1997) and Lancaster & Mann (1975). The results show that the growth kinetics of *Solanum nigrum* L. normal as well as transgenic were not affected by Zn exposure on the media and produced growth curves in accordance with Monod equation for microbial cultures. Zn was most accumulated in roots of the transgenic plants, whereas in the normal plants Zn generally was accumulated in leaves or stems. During their life cycle, the ability of *Solanum nigrum* L. in adsorbing Zn was originally increased and then decreased towards the end of their life cycle. The ability of the transgenic plants of *Solanum nigrum* L. in adsorbing and accumulating Zn is comparable to the physiological concentration that can be adsorbed and accumulated by their normal plants.

Keywords: Phytoremediation, Zn, *Solanum nigrum* L., Transgenic plants.

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah SWT seru sekalian alam, hanya atas petunjuk, bimbingan dan ridla-Nya, Penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “ **Fitoremediasi I Zn (Seng) menggunakan tanaman Normal dan Transgenik *Solanum nigrum L.***”.

Pada kesempatan yang baik ini, dengan tulus penulis sampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan yang tinggi kepada para pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam menyelesaikan tesis ini, terutama kepada :

1. Kapolri cq. Kapuslabfor Bareskrim Polri cq. Kalabfor cabang Semarang yang telah memberikan kesempatan, kepercayaan dan seluruh dukungan fasilitas kepada penulis untuk mengikuti Program Pendidikan Pascasarjana di Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang.
2. Komisaris Jenderal Polisi Drs. Erwin Mappaseng, atas kebijakan dan bantuan beliau penulis dapat mulai mengikuti pendidikan di Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang.
3. Prof. Sudharto P Hadi, MES, Ph.D atas segala dorongan motifasi dan bimbingannya.
4. Ir. Sumarno, MSi selaku Pembimbing I yang dengan penuh kesabaran dan seluruh dukungan fasilitas lainnya memberikan bimbingan selama menyusun tesis ini.
5. Ir. Muhammad Ahkam Subroto, M.App.Sc, Ph.D yang dengan penuh kesabaran, koleksi pustaka pribadi dan seluruh dukungan fasilitas lainnya memberikan inspirasi, motifasi dan bimbingan dalam penyusunan tesis ini.
6. Dr. Ir. Purwanto, DEA dan Ir. Agus Hadiyanto, MT Selaku penguji atas segala bimbingan, koreksi, masukan perbaikan penulisan tesis ini.
7. Kepala Pusat Penelitian Bioteknologi - LIPI, Jl. Raya Bogor Km. 46, Cibinong 16911 atas segala fasilitas dan kemudahan selama penelitian hingga selesainya tesis ini.
8. Komisaris Besar Polisi Drs. R. AR Harry Anwar, SH, dengan tegas dan disiplin memberikan dasar dasar ketabahan, dorongan motifasi, bimbingan serta kejelian dalam meraih peluang untuk masa depan.
9. Komisaris Besar Polisi H. Drs. Achmad Slamet, dengan kebijakan yang penuh kearifan, kesabaran dan kebakikan memberikan bimbingan, dorongan motifasi serta segala fasilitas kemudahan mulai pendidikan hingga tahap akhir penulisan tesis ini.

10. Komisaris Besar Polisi Drs. H. Suntjono, Apt selaku Kalabfor Cabang Semarang yang telah memberikan kesempatan penulis menyelesaikan tesis ini.
11. Istriku terkasih Retno Wardani, ST bagaikan magma nan tak kunjung padam, sebagai motifator yang setia dan sabar menemani diskusi serta anak-anakku tersayang Aditya Wira Pratama dan Anindita Wira Diyatma yang membuat penulis tak kenal lelah.
12. Ibu, bapak, eyang, adik-adik dan seluruh keluarga besarnya, atas segala do'a dan dukungannya serta telah mengajari penulis untuk menjadi lebih dewasa, arif dan bijaksana.
13. Bu Yayuk, Mas Bowo dan Mas Wisnu atas bantuannya khususnya dalam pengolahan data statistik.
14. Eman Sulaeman dan Indra Fakhma atas bantuan teknisnya dalam pemeliharaan tanaman *S. nigrum* di rumah kaca Puslit Bioteknologi – LIPI, Jl. Raya Bogor Km. 46, Cibinong 16911.
15. Rekan-rekan sejawat Laboratorium Forensik cabang Semarang Puslabfor Bareskrim Polri khususnya staf Taud atas segala bantuan dan pengertiannya mulai pendidikan hingga selesainya penulisan tesis ini.
16. Sahabat-sahabat MIL reguler 2001 atas dukungan dan kesediaannya hadir pada seminar pra-proposal, proposal dan seminar hasil penelitian, admisi MIL atas segala kemudahannya, para Dosen dan semua pihak yang tak mungkin penulis sebut satu-persatu yang telah membantu penulis baik moril maupun materiel sehingga tesis ini dapat terwujud.

Semoga tesis ini dapat membawa manfaat bagi kita semua.

Semarang, 19 Mei 2004

P e n u l i s

SODIQ PRATOMO, S.Si

DAFTAR ISTILAH

Absorpsi	Proses penyerapan logam; suatu keadaan dari konsentrasi logam.
Adsorpsi	Akumulasi dari gas, cairan, atau solut pada permukaan padatan atau cairan.
Dengan Perlakuan	Media dengan penambahan logam berat Zn 200 mg/kg media dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$.
Fitoremediasi	Penggunaan tanaman atau bagian-bagiannya sebagai sistem pengolahan biologis yang alami untuk menangani masalah limbah dan pencemaran lingkungan, seperti pada tanah atau air yang tercemar.
Logam berat	Logam dengan berat jenis lebih besar dari 5, khususnya yang bersifat beracun (toksik).
Tanaman Normal	Tanaman sebagaimana yang terdapat di alam.
Tanaman Transgenik	Tanaman yang genomnya telah mengalami perubahan melalui transfer gen atau gen-gen dari spesies lain.
Tanpa Perlakuan	Media tanpa penambahan logam berat Zn atau 0 mg/kg media, digunakan sebagai media kontrol.
Translokasi	Perubahan lokasi.

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 1	Tanaman yang potensial untuk fitoremediasiberbagai logam berat atau radionuklida	9
Tabel 2	Karakteristik fisika kimia tanah (media)	22
Tabel 3	Laju pertumbuhan spesifik (μ) tanaman <i>Solanum nigrum</i> L. selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama.	34
Tabel 4	Akumulasi Zn pada kondisi optimum daur hidup tanaman <i>Solanum nigrum</i> L.	41
Tabel 5	Translokasi Zn optimum pada Tanaman Transgenik Dengan Perlakuan	42
Tabel 6	Translokasi Zn optimum pada Tanaman Transgenik Tanpa Perlakuan	43
Tabel 7	Translokasi Zn optimum pada Tanaman Normal Dengan Perlakuan	44
Tabel 8	Translokasi Zn optimum pada Tanaman Normal Tanpa Perlakuan	44

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 1	Kurva pertumbuhan tanaman transgenik dengan perlakuan selama daur hidupnya.	29
Gambar 2	Laju pertumbuhan spesifik tanaman transgenik dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,96 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.	29
Gambar 3	Kurva pertumbuhan tanaman transgenik tanpa perlakuan selama daur hidupnya.	30
Gambar 4	Laju pertumbuhan spesifik tanaman transgenik tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,89 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.	31
Gambar 5	Kurva pertumbuhan tanaman normal dengan perlakuan selama daur hidupnya.	32
Gambar 6	Laju pertumbuhan spesifik tanaman normal dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,88 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,99$.	32
Gambar 7	Kurva pertumbuhan tanaman normal tanpa perlakuan selama daur hidupnya.	33
Gambar 8	Laju pertumbuhan spesifik tanaman normal tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,86 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.	34
Gambar 9	Kurva pertumbuhan total tanaman <i>Solanum nigrum</i> L. selama daur hidupnya.	34
Gambar 10	Berat Zn pada <i>Solanum Nigrum</i> L Transgenik Dengan Perlakuan.	35
Gambar 11	Konsentrasi Zn pada <i>Solanum Nigrum</i> L Transgenik Dengan Perlakuan.	36
Gambar 12	Berat ZnTotal pada <i>Solanum Nigrum</i> L Transgenik Dengan Perlakuan.	36
Gambar 13	Berat Zn pada <i>Solanum Nigrum</i> L Transgenik Tanpa Perlakuan.	37

Gambar 14	Konsentrasi Zn pada Solanum Nigrum L Transgenik Tanpa Perlakuan.	37
Gambar 15	Berat Zn Total pada Solanum Nigrum L Transgenik Tanpa Perlakuan	38
Gambar 16	Berat Zn pada Solanum Nigrum L Normal Dengan Perlakuan.	38
Gambar 17	Konsentrasi Zn pada Solanum Nigrum L Normal Dengan Perlakuan.	39
Gambar 18	Berat Zn Total pada Solanum Nigrum L Normal Dengan Perlakuan.	39
Gambar 19	Berat Zn pada Solanum Nigrum L Normal Tanpa Perlakuan.	40
Gambar 20	Konsentrasi Zn pada Solanum Nigrum L Normal Tanpa Perlakuan.	40
Gambar 21	Berat Zn Total pada Solanum Nigrum L Normal tanpa Perlakuan.	41

DAFTAR LAMPIRAN

		Halaman
Lampiran 1	Lembar pengamatan berat (g) tanaman <i>solanum nigrum</i> L transgenik dengan perlakuan.	50
Lampiran 2	Lembar pengamatan berat (g) tanaman <i>solanum nigrum</i> L transgenik tanpa perlakuan.	51
Lampiran 3	Lembar pengamatan berat (g) tanaman <i>solanum nigrum</i> L normal dengan perlakuan.	52
Lampiran 4	Lembar pengamatan berat (g) tanaman <i>solanum nigrum</i> L normal tanpa perlakuan.	53
Lampiran 5	Konsentrasi (Ppm) logam berat Zn tiap bagian tanaman.	54
Lampiran 6	Uji beda translokasi logam Zn pada tanaman <i>solanum nigrum</i> L transgenik dan normal	55
Lampiran 7	Foto foto	56

DAFTAR ISI

Lembar Judul		i
Lembar pengesahan		ii
Pernyataan		iv
Abstrak		v
Kata Pengantar		vii
Daftar Istilah		ix
Daftar Tabel		x
Daftar Gambar		xi
Daftar Lampiran		xiii
Daftar Isi		xiv
BAB I	PENDAHULUAN	1
	I.1 Latar Belakang	1
	I.2 Identifikasi dan Perumusan masalah	3
	I.3 Tujuan Penelitian	4
	I.4 Hipotesis	4
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA	5
	II.1 Logam Berat Zn	5
	II.2 Konsep dasar fitoremidiasi	6
	II.3 Pemilihan Jenis Tanaman	9
	II.4 Kinetika Pertumbuhan	11
	II.5 Kultur akar rambut	12
BAB III	METODE PENELITIAN	15
	III.1 Kerangka pemikiran	15
	III.2 Bahan dan alat	15
	III.3 Variabel penelitian	15
	III.4 Waktu dan tempat kegiatan	16
	III.5 Prosedur penelitian	16
	III.6 Persiapan media	17

III.7	Pengumpulan data penelitian	18
III.8	Analisis kandungan logam Zn	18
III.9	Analisis data	19
III.10	Diagram alir	20
BAB IV	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	21
IV.1	Karakteristik fisika kimia media	21
IV.2.	Parameter <i>confounding</i>	26
IV.3	Kinetika pertumbuhan	28
IV.3.1	Tanaman transgenik dengan perlakuan	28
IV.3.2	Tanaman transgenik tanpa perlakuan	30
IV.3.3	Tanaman normal dengan perlakuan	31
IV.3.4	Tanaman normal tanpa perlakuan	33
IV.4	Akumulasi logam berat Zn pada <i>solanum nigrum</i> L	35
IV.4.1	Tanaman transgenik dengan perlakuan	35
IV.4.2	Tanaman transgenik tanpa perlakuan	37
IV.4.3	Tanaman normal dengan perlakuan	38
IV.4.4	Tanaman normal tanpa perlakuan	39
IV.4.5	Uji Beda kemampuan tanaman <i>solanum nigrum</i> L transgenik dan normal dalam mengakumulasi logam berat Zn	41
IV.5	Translokasi	42
IV.5.1	Tanaman transgenik dengan perlakuan	42
IV.5.2	Tanaman transgenik tanpa perlakuan	43
IV.5.3	Tanaman normal dengan perlakuan	44
IV.5.4	Tanaman normal tanpa perlakuan	44
BAB V	SIMPULAN DAN SARAN	46
V.1	Simpulan	46
V.2	Saran	46
Daftar Pustaka		47
Lampiran – lampiran		50

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Perkembangan dan kemajuan yang pesat dalam bidang teknologi telah banyak memberikan kemudahan bagi manusia. Kemajuan - kemajuan dalam bidang teknologi yang berhubungan langsung dengan pembangunan di sektor industri banyak memberikan keuntungan langsung bagi manusia, akan tetapi kemajuan teknologi juga memberikan dampak buruk pada manusia. Pembangunan di bidang industri tidak jarang menimbulkan dampak negatif berupa pencemaran lingkungan baik di udara, air maupun tanah akibat limbah industri yang dihasilkan. Sebagian limbah industri mempunyai daya racun yang kuat dan bahkan dapat menyebabkan kematian hewan, tumbuhan maupun manusia.

Toksikan yang sangat berbahaya umumnya berasal dari buangan industri, terutama yang melibatkan logam berat dalam proses produksinya (Palar dalam Sudarso, 1997). Pencemaran logam berat yang terjadi merupakan proses bioakumulasi yang bersumber dari industri-industri yang kurang atau tidak melakukan pengolahan terhadap limbahnya. Hal ini disebabkan berbagai alasan seperti besarnya biaya yang harus dikeluarkan, kurangnya tenaga dan fasilitas yang memadai, kurangnya pengetahuan tentang teknik mengelola limbah dan sebagainya. Senyawa logam berat dapat memberikan respon yang bermacam-macam, di antaranya dapat menyebabkan bioakumulasi, perubahan tingkah laku dan bahkan dapat menyebabkan kematian. Mason (1981) mengemukakan bahwa keberadaan logam berat di dalam perairan berdampak pada perubahan komposisi dan penurunan jumlah atau hilangnya spesies perairan dari komunitasnya.

Sumber utama pencemaran logam berat di perairan dapat berasal dari batuan (geologi), kegiatan industri, kegiatan perdagangan, sumber lalu lintas di jalan dan limbah domestik maupun industri. Beberapa jenis logam berat yang mencemari lingkungan dan sungai-sungai di Indonesia di antaranya adalah Cu, Hg, Pb, Zn dan Cd. Logam-logam berat tersebut merupakan toksikan umum di sungai (Mason, 1981). Dari beberapa jenis logam berat yang mencemari sungai-sungai di Indonesia, Zn (seng) merupakan jenis logam berat yang kandungannya paling tinggi dibanding beberapa logam berat lainnya.

Laporan penelitian Machbub & Mulyadi (2000) menyebutkan bahwa Zn yang mencemari sungai-sungai di Indonesia telah melebihi batas persyaratan kualitas air baku untuk air selain kelas IV sesuai PP no. 82 Tahun 2001. Di pulau Sumatera, dari 15 sungai

yang diteliti, kadar rata-rata Zn berkisar antara 0,0268 mg/L sampai dengan 0,068 mg/L, sedangkan nilai yang disyaratkan untuk air baku selain kelas IV maksimal 0,05 mg/L. Di pulau Jawa, sebanyak 12 sungai dari 18 sungai yang diteliti tidak memenuhi syarat. Kadar Zn rata-rata di sungai-sungai pulau Jawa adalah 0,064 mg/L sampai dengan 0,71 mg/L. Di pulau Kalimantan, terdapat 3 sungai dari 9 sungai yang diteliti tidak memenuhi syarat untuk cemaran Zn dengan kadar rata-rata Zn antara 0,052 mg/L sampai dengan 0,260 mg/L. Di pulau Irian Jaya, kadar Zn yang mencemari sungai-sungai juga melebihi kadar yang disyaratkan yaitu sebesar 0,118 mg/L.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Machbub dan Mulyadi (2000), maka dapat disimpulkan bahwa cemaran logam berat yang paling dominan mencemari sungai-sungai di Indonesia adalah Zn. Sedangkan air merupakan kebutuhan mutlak makhluk hidup sekaligus media transport bahan organik maupun anorganik, termasuk berbagai jenis limbah di dalamnya, sehingga memungkinkan cemaran logam berat terpapar di setiap bagian di dunia ini termasuk di tanah. Tanah merupakan buangan akhir dari setiap aktifitas makhluk hidup, sehingga dibutuhkan biaya mahal dan teknologi canggih yang memungkinkan untuk menanganinya. Untuk itu perlu dilakukan upaya dalam menangani masalah cemaran logam berat di sungai-sungai Indonesia umumnya dan pada tanah pada khususnya. Metode remediasi yang dapat digunakan untuk menangani pencemaran logam berat antara lain adalah metode fisika-kimia, metode ekstraksi, metode elektrokinetik, metode bioremediasi dan sebagainya.

Metode penanganan pencemaran logam berat dengan cara fisika-kimia banyak mengalami kendala dan keterbatasan. Cara fisika-kimia yang biasa dilakukan untuk menangani pencemaran logam berat dalam air limbah adalah dengan jalan pengendapan, namun cara pengendapan ini memiliki beberapa kelemahan, di antaranya adalah prosesnya rumit, membutuhkan bahan kimia dan biaya yang besar serta endapan yang dihasilkan sulit ditangani lebih lanjut karena masih bersifat toksik.

Metode ekstraksi pada prinsipnya menggunakan cara fisika-kimia biasa namun menggunakan skala yang lebih besar, yaitu tanah yang tercemar logam berat dikeruk kemudian dilakukan ekstraksi terhadap logam-logam tersebut. Sedangkan metode elektrokinetik menggunakan dasar sel elektrokimia di mana sistem tanah merupakan tempat penyimpanan hampir semua unsur hara dan konsentrasi ion dalam larutan tanah. Gerakan ion, akumulasi, perubahan dalam tingkat oksidasi dan reduksi suatu unsur dan banyak lagi reaksi kimia lain dalam tanah adalah reaksi-reaksi yang pada tingkat tertentu mirip dengan

yang terjadi pada sel elektrokimia. Pada prakteknya teknik-teknik tersebut memerlukan arus listrik yang sangat besar sehingga selain rumit pengerjaannya juga memerlukan biaya yang relatif tinggi dan belum memungkinkan dilaksanakan di Indonesia.

Metode bioremediasi banyak digunakan untuk cemaran organik karena proses bioremediasi didasarkan pada dekomposisi bahan organik di biosfer yang dilakukan oleh bakteri dan jamur heterotropik yang memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber karbon dan energi. Namun metode bioremediasi mempunyai keterbatasan, misalnya pada tanah liat dengan permeabilitas rendah pada sistem bioventing. Penghembusan udara pada tanah liat juga mengalami kendala kontak langsung dengan oksigen dari udara. Di samping itu, proses pengaliran cairan dibatasi pula oleh kecepatan resirkulasi air tanah, endapan nutrisi, endapan senyawa besi atau terbentuknya kelebihan biomassa akan menutup pori-pori tanah (Citroreksoko, 1996).

Salah satu metode yang aplikatif dan diharapkan mampu menangani masalah pencemaran logam berat pada tanah adalah dengan cara fitoremediasi, yaitu menggunakan tanaman atau bagian-bagiannya sebagai sistem pengolahan biologis yang alami. Teknik fitoremediasi sangat sesuai untuk penanganan pencemaran logam berat yang tidak dapat diatasi dengan metode fisika-kimia biasa. Proses fitoremediasi dapat berlangsung secara *in situ* ataupun *ex situ*. Kelebihan teknik fitoremediasi adalah lebih bersahabat dengan lingkungan dan lebih menguntungkan karena biaya yang dikeluarkan lebih murah dan mudah pengerjaannya.

1.2 Identifikasi dan Perumusan masalah

- a. Bagaimanakah pengaruh pemaparan Zn pada media terhadap kinetika pertumbuhan tanaman *Solanum nigrum* L ?
- b. Apakah tanaman transgenik *S. nigrum* L. mempunyai kemampuan dalam menyerap dan mengakumulasi Zn pada konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang dapat diserap oleh tanaman normal *S. nigrum* L?
- c. Bagaimanakah kemampuan tanaman *S. nigrum* L. sebagai hiperakumulator sampai berakhirnya daur hidup tanaman tersebut ?
- d. Apakah ada beda translokasi logam berat Zn antara tanaman *S. nigrum* L transgenik dengan tanaman *S. nigrum* L normal ?

I.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemaparan Zn pada media terhadap kinetika pertumbuhan, tingkat konsentrasi dan translokasi logam berat Zn yang dapat dijerap dan diakumulasi oleh tanaman normal dan transgenik *Solanum nigrum* L. secara *in situ*.

I.4 Hipotesis

- a. Tidak ada pengaruh pemaparan Zn sebanyak lebih dari 200 mg/kg pada media terhadap kinetika pertumbuhan tanaman *Solanum nigrum* L.
- b. Tanaman transgenik *S. nigrum* L. mempunyai kemampuan dalam menyerap dan mengakumulasi Zn pada konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang dapat dijerap oleh tanaman normalnya.
- c. Dengan bertambahnya umur tanaman *S. nigrum* L., maka kemampuannya sebagai hiperakumulator Zn akan naik kemudian menurun sampai berakhirnya daur hidup tanaman tersebut.
- d. Ada beda translokasi logam berat Zn antara tanaman *S. nigrum* L transgenik dengan tanaman *S. nigrum* L normal.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pencemaran pada tanah oleh logam berat merupakan salah satu persoalan lingkungan yang sangat serius yang hingga saat ini belum ditemukan metode atau teknologi yang secara sempurna mampu menangani permasalahan tersebut. Setiap metode mempunyai kelebihan dan kekurangannya. Menurut Dzombak (2000), teknologi remediasi logam berat pada tanah dikelompokkan antara lain: isolasi, imobilisasi, penurunan toksisitas/mobilitas, penyaringan secara fisika dan ekstraksi. Berbagai pertimbangan telah diuraikan pada Bab I sebelumnya, yang pada intinya selain rumit pengerjaannya juga mahal dan yang lebih penting karena suatu dan lain hal belum memungkinkan untuk dilaksanakan di Indonesia. Hal tersebut yang mendorong para ilmuwan untuk senantiasa melakukan penelitian agar ditemukan suatu metode yang aplikatif baik secara *ex situ* maupun *in situ*, mudah pengerjaannya, relatif murah dan bersahabat dengan lingkungan.

II.1 Logam berat Zn

Logam berat merupakan bagian dari senyawa anorganik yang pada umumnya bersifat beracun (toksik). Logam berat dapat mengalami biokonsentrasi dan bioakumulasi dalam tubuh makhluk hidup yang berakibat kadar dalam tubuh makhluk hidup lebih besar daripada kadarnya dalam lingkungan perairan. Selain itu, logam berat juga mengalami biomagnifikasi, yaitu kadarnya semakin meningkat seiring dengan peningkatan posisi organisme pada rantai makanan (Effendi, 2000).

Sumber utama pencemaran logam berat di perairan dapat berasal dari batuan (geologi), kegiatan industri, kegiatan perdagangan, sumber lalu lintas di jalan dan limbah domestik maupun industri. Mason dalam Sudarso (1997) mengemukakan bahwa logam berat merupakan toksikan yang umum berada di perairan Indonesia (sungai), yang meliputi timbal, nikel, kadmium, seng, tembaga dan merkuri. Dari beberapa jenis logam berat yang mencemari sungai-sungai Indonesia, menurut laporan penelitian Machbub & Mulyadi (2000) logam Zn (seng) merupakan jenis logam berat yang kandungannya paling tinggi dibanding beberapa logam berat lainnya.

Menurut Mejare & Bolow (2001), pada konsentrasi rendah logam berat termasuk Zn merupakan ion yang esensial bagi pertumbuhan sebagai unsur renik, tetapi pada konsentrasi lebih tinggi logam berat bersifat toksik. Sedangkan Yoga & Sudarso (1998) mengemukakan

bahwa logam berat Zn merupakan logam berat esensial yang dibutuhkan oleh tubuh manusia. Seng berperan dalam penggabungan dua jenis protein yaitu *metalloenzim* (berperan dalam enzim *carbonic anhydrase* sebagai regulasi penggantian karbon dioksida dalam tubuh), di samping itu seng juga berkemampuan dalam membentuk ion kompleks protein logam yang berperan dalam mekanisme karier dan transpor ion dalam sel.

Toksisitas logam berat Zn menurun dengan meningkatnya kesadahan, sebaliknya akan meningkat dengan meningkatnya suhu dan penurunan oksigen terlarut. Toksisitas terhadap organisme akuatik (algae, avertebrata dan ikan) sangat variatif mulai dari < 1 mg/L hingga > 100 mg/L. Menurut Moore dalam Effendi (2000), toksisitas logam berat Zn bersama sama dengan K, Mg dan Cd bersifat aditif, yaitu toksisitasnya merupakan penjumlahan dari masing-masing logam. Menurut Peavy et al dalam Effendi (2000) toksisitas logam Zn dan Cu bersifat sinergik yaitu toksisitasnya meningkat, lebih toksik dari pada penjumlahan keduanya. Menurut Lombi et al (1999), logam berat Zn dan logam berat Cd mempunyai struktur yang mirip sehingga mempunyai beberapa kesamaan sifat. Untuk itu perlu dilakukan upaya dalam menangani masalah cemaran logam berat di Indonesia terutama untuk logam berat Zn (seng) tersebut.

II.2 Konsep Dasar Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah upaya penggunaan tanaman dan bagian-bagiannya untuk dekontaminasi limbah dan masalah-masalah pencemaran lingkungan baik secara *ex-situ* menggunakan kolam buatan atau reaktor maupun secara *in-situ* (langsung di lapangan) pada tanah atau daerah yang terkontaminasi limbah. Proses fitoremediasi dapat dilakukan dengan menggunakan tanaman secara langsung, dengan menggunakan ekstrak tanaman yang mengandung berbagai enzim degradator maupun dengan menggunakan kultur jaringan tanaman terutama untuk penanganan air limbah dengan menggunakan sistem lahan basah, lahan alang-alang dan tanaman apung (Subroto, 1996).

Menurut Subroto (1996), konsep fitoremediasi lebih berkembang dengan aplikasi baru untuk dekontaminasi tanah yang tercemar oleh senyawa-senyawa organik maupun anorganik. Perkembangan yang pesat di bidang penelitian fitoremediasi tidak lepas dari kemajuan di bidang biologi molekuler, rekayasa genetika dan teknologi enzim. Fitoremediasi dapat dijadikan indikator adanya pencemaran air dan udara.

Beberapa jenis tanaman memiliki kemampuan untuk bertahan dari konsentrasi senyawa organik dan anorganik yang tinggi tanpa pengaruh sifat toksik, juga dapat merubah

dan mendegradasi senyawa organik atau mengubah senyawa anorganik yang bersifat toksik menjadi senyawa yang sifat toksiknya lebih rendah. Tanaman memperlihatkan potensinya untuk menangani kontaminan logam dengan cara fitoekstraksi (mengambil dan merombak kontaminan menjadi biomassa dalam tanah), rizofiltrasi (memfilter logam dari air ke sistem akar) dan fitostabilisasi (menstabilkan sampah dengan kontrol erosi dan evapotranspirasi dalam jumlah yang besar) (Schnoor, 1997).

Menurut Subroto (1996), secara umum aplikasi fitoremediasi untuk penanganan masalah pencemaran tanah dapat ditempuh melalui dua pendekatan yang berbeda yaitu melalui proses fitodekontaminasi yang terdiri dari fitoekstraksi dan fitodegradasi serta proses fitostabilisasi. Fitoekstraksi adalah suatu proses dimana tanaman mengakumulasi kontaminan pada daun atau tunas untuk selanjutnya dipanen secara periodik. Fitoekstraksi terutama ditujukan untuk kontaminan dalam bentuk logam berat berbahaya seperti kadmium (Cd) dan merkuri (Hg). Fitodegradasi adalah proses di mana tanaman beserta mikroflora yang terkait mengubah polutan yang ada menjadi senyawa yang tidak berbahaya.

Lebih lanjut Subroto (1996) menerangkan bahwa fitodegradasi mengandalkan kemampuan tanaman secara internal untuk melakukan metabolisme dalam mengubah polutan yang berbahaya menjadi senyawa yang aman kemudian disimpan di dalam struktur tanaman atau diuapkan melalui daun dan tunas. Fitostabilisasi merupakan proses di mana polutan mengalami presipitasi, dijerap dalam jaringan tanaman atau matriks tanah. Mekanisme yang umum terjadi pada proses fitostabilisasi adalah reaksi redoks, presipitasi kontaminan menjadi bentuk endapan dan pengikatan bahan-bahan organik ke dalam bagian lignin tanaman.

Schnoor (1997) menyebutkan bahwa beberapa jenis tanaman yang digunakan untuk fitoremediasi mempunyai sifat sebagai hiperakumulator logam karena memiliki kemampuan untuk menampung sejumlah besar logam, bahkan logam yang tidak dibutuhkan oleh tanaman.

Subroto (1996) menerangkan bahwa saat ini hanya dikenal beberapa spesies tanaman yang mampu menjadi hiperakumulator logam berat, di antaranya adalah *Sebertia accuminata* yang mampu mengakumulasi 25% nikel per berat kering dan *Thlaspi caerulescens* yang dapat mengakumulasi seng (Zn) sampai 4% tanpa adanya kerusakan jaringan. Aplikasi tanaman hiperakumulator logam berat ternyata mengalami beberapa kesulitan, di antaranya adalah karena tanaman hiperakumulator seringkali hanya mengakumulasi elemen tertentu, kebanyakan tanaman hiperakumulator adalah tanaman

langka yang hanya ditemukan di tempat-tempat terpencil dan kebanyakan tanaman hiperakumulator tumbuh lambat serta memiliki biomassa yang rendah. Tanaman hiperakumulator logam berat diharapkan dapat diperoleh dengan penggunaan teknik-teknik rekayasa genetika.

Metzger *et al.* (1992) melaporkan bahwa kultur akar tanaman tembakau dan *morning glory* dapat digunakan sebagai model untuk mengevaluasi adanya akumulasi kadmium (Cd) dari suspensi lumpur, sedangkan Ornes & Sajwan (1992) menyebutkan bahwa tanaman air *Ceratophyllum demersum* L. memiliki potensi sebagai filter biologis (*biological filter*) untuk mengakumulasi kadmium (Cd) dalam limbah cair. Chen *et al.* (1996) melaporkan bahwa jaringan akar dari *Amaranthus spinosus* dan *S. nigrum* L. dapat digunakan sebagai biosorpsi ion tembaga (Cu^{2+}) untuk sungai-sungai yang tercemar. Baru-baru ini dilaporkan oleh Wahyuni & Subroto (2001) bahwa kultur akar rambut *S. nigrum* L. dapat digunakan untuk degradasi residu pestisida diazinon secara *ex situ*, sedangkan Priambodo (2002) melaporkan penggunaan kultur akar rambut *S. nigrum* L. untuk penjerapan dan akumulasi logam berat Zn secara *in vitro*.

Di Indonesia, enceng gondok (*Eichornia crassipes*) telah lama digunakan untuk pengolahan air limbah secara tradisional dan bahkan proses pencucian limbah terjadi secara alamiah di hulu-hulu sungai. Beberapa tanaman air lainnya seperti kapu-kapu (*Pistia stratiotes*) dan kiambang (*Salvinia natans*) mempunyai potensi yang besar untuk pengolahan air limbah. Baru-baru ini tanaman air alang-alang telah digunakan untuk pengolahan limbah cair terpadu. Tiga jenis alang-alang yang digunakan adalah *Phragmites australis*, *Typha latifolia* dan *Schoenoplectus laustris* (Subroto, 1996).

Keuntungan utama dari aplikasi fitoremediasi dibandingkan dengan sistem remediasi lainnya menurut Miller (1996) adalah kemampuannya untuk menghasilkan buangan sekunder yang lebih rendah sifat toksiknya, lebih bersahabat dengan lingkungan serta lebih ekonomis. Kelemahan fitoremediasi adalah dari segi waktu yang dibutuhkan lebih lama dan juga terdapat kemungkinan masuknya kontaminan ke dalam rantai makanan melalui konsumsi hewan dari tanaman tersebut.

Menurut Subroto (1996), keuntungan fitoremediasi selain mudah juga merupakan alternatif yang murah dibandingkan dengan cara remediasi fisiko-kimia maupun bioremediasi yang menggunakan mikroorganisme (bakteri, kapang dan jamur). Adapun keterbatasan sistem fitoremediasi adalah terutama yang berhubungan dengan batasan konsentrasi kontaminan yang dapat ditolerir oleh tanaman, masalah kebocoran kontaminan

yang sangat larut dalam air dan lamanya waktu yang diperlukan pada fitoremediasi tanah yang tercemar.

II.3 Pemilihan Jenis Tanaman

Berbagai jenis tanaman yang potensial dimanfaatkan untuk fitoremediasi logam berat atau radionuklida dan telah dilakukan penelitian sebagaimana tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1.
Tanaman yang potensial untuk fitoremediasi berbagai logam berat atau radionuklida.

No	Logam berat/ radionuklida	Spesies Tanaman	Referensi
1	Cd	<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern	Kumar et al. 1995a Huang et al. 1997a Ebbs et al. 1997 Salt et al. 1995b
2	Cr (VI)	<i>B. juncea</i>	Kumar et al. 1995a Huang et al. 1997a
3	¹³⁷ Cs	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.; <i>B. juncea</i> , <i>B. oleracea</i> L.; <i>Phalaris arundinacea</i> L.; <i>Phaseolus acutifolius</i> A.Gray.	Lasat et al. 1997 Lasat et al. 1998 Negri and Hinchman, 2000
4	Cu	<i>B. juncea</i>	Ebbs and Kochian, 1997
5	Ni	<i>B. juncea</i>	Ebbs and Kochian, 1997
6	Pb	<i>B. campestris</i> L.; <i>B. carinata</i> A. Br.; <i>B.</i> <i>juncea</i> ; <i>B. napus</i> L.; <i>B. nigra</i> (L.) Koch.; <i>Helianthus annuus</i> L.; <i>Pisum</i> <i>sativum</i> L.; <i>Zea mays</i> L.	Begonia et al. 1998 Baylock et al. 1997 Ebbs and Kochian, 1998
7	Se	<i>B. napus</i> L.; <i>Festuca arundinacea</i> Schreb; <i>Hibiscus cannabinus</i> L.	Bañuelos et al. 1997
8	U	<i>B. chinensis</i> L; <i>B. juncea</i> ; <i>B. narinosa</i> L., <i>Amaranthus</i> spp.	Huang et al. 1998
9	Zn	<i>Avena sativa</i> ; <i>B. juncea</i> ; <i>B. napus</i> L. <i>Hordeum vulgare</i> , <i>B. rapa</i>	Ebbs et al. 1997 Ebbs and Kochian, 1998

Sumber : Prasad (2003)

Jenis tanaman yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanaman leunca (*S. nigrum* L.) normal dan transgenik yang merupakan tanaman hasil regenerasi dari akar rambut *S. nigrum* L. yang merupakan tanaman hasil transformasi genetika oleh bakteri tanah *A. rhizogenes* galur ATCC 15834 dalam skala rumah kaca.

Alasan pemilihan spesies tanaman *S. nigrum* L. adalah sebagai berikut:

- a. *S. nigrum* L. merupakan tanaman lokal Indonesia (dikenal dengan nama *leunca*, termasuk tanaman terong-terongan) sehingga dalam aplikasinya di lapangan tidak akan mengalami kesulitan sama sekali baik dalam hal pertumbuhan maupun interaksinya dengan lingkungan sekitar.
- b. Benih dari tanaman *S. nigrum* L. mudah diperoleh dalam jumlah berlimpah selama siklus pertumbuhannya selama 26 minggu. Benih tersebut dapat disimpan dalam jangka panjang (hingga 8 tahun) tanpa kehilangan viabilitasnya sehingga suplai benih tersebut dapat dengan mudah diperoleh.
- c. Tanaman *S. nigrum* L. termasuk tanaman yang rentan terhadap infeksi bakteri tanah *A. rhizogenes* untuk membentuk akar rambut. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman *S. nigrum* L. mudah ditransformasi secara genetika untuk meningkatkan kemampuannya dalam mengabsorpsi dan mengakumulasi logam berat, misalnya dengan mengekspresikan gen-gen hiperakumulator logam berat yang berasal dari spesies tanaman lainnya atau dari mikroba.
- d. Dari studi terdahulu (Chen et al., 1996; Macek et al., 1994; Priambodo, 2002), telah terbukti bahwa akar/akar rambut dari *S. nigrum* L. dapat mengabsorpsi dan mengakumulasi logam-logam berat (Cu, Cd, Zn) dalam konsentrasi yang cukup tinggi secara *in vitro* dan *ex-situ*. Hal ini menunjukkan potensi dari tanaman *S. nigrum* L., terutama klon transgeniknya, untuk digunakan sebagai remediator pencemaran logam berat di lapangan (secara *in-situ*). Studi yang dilakukan oleh Priambodo (2002) menunjukkan bahwa akar rambut *S. nigrum* L. mempunyai kemampuan tumbuh dalam media yang mengandung konsentrasi Zn tinggi (hingga 18,64 mg/L) dan bahkan hingga 60 mg/L setelah melalui tahap penyesuaian (data tidak dipublikasikan), dan mampu menyerap dan mengakumulasi Zn yang ada di dalam media ke dalam jaringan akar. Kemampuan kultur akar transgenik tersebut lebih baik dibandingkan dengan kemampuan kultur akar normalnya. Hal ini diduga karena perubahan sistem metabolisme pada akar rambut *S. nigrum* L. yang disebabkan oleh ekspresi gen *roID* ke dalam jaringan akar yang berasal dari bakteri

A. rhizogenes (Grichko et al., 2000). Ekspresi gen *roiD* ini, dan juga gen-gen lainnya yang berasal dari *A. rhizogenes*, diduga dapat meningkatkan ekspresi protein-protein pengikat-logam pada akar rambut *S. nigrum* L. sehingga pada akhirnya dapat meningkatkan kemampuannya dalam menjerap dan mengakumulasi ion-ion logam berat tertentu (Mejare & Bulow, 2001).

II.4 Kinetika pertumbuhan

Pemahaman mengenai kinetika pertumbuhan sel mikroba, hewan dan tumbuhan sangat penting untuk perancangan dan operasi bioreaktor. Kinetika pertumbuhan sel yang dinyatakan dengan laju pertumbuhan sel dipengaruhi oleh berbagai kondisi fisika dan kimia. Kinetika sel merupakan interaksi berbagai sistem reaksi biokimia dan fenomena transpor yang menyangkut banyak tahap sistem multikomponen. Selama pertumbuhan sel tua maupun muda secara terus menerus mengalami transformasi dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan, sehingga model matematik kinetika pertumbuhan yang akurat merupakan hal yang mustahil. Untuk menurunkan model matematik yang sederhana harus dibuat asumsi mengenai berbagai komponen sel dan dinamika populasi sel (Sumarno, 2004).

Dalam kondisi tertentu konsentrasi hara utama yang berlebihan dapat menghambat pertumbuhan, sehingga hara utama harus dicatu dalam jumlah tidak berlebihan. Di dalam praktek konsentrasi salah satu hara utama dibatasi sedang lainnya konsentrasinya berlebihan sehingga pertumbuhan meningkat secara eksponensial sampai hara terbatas habis. Persamaan Monod merupakan penyederhanaan mekanisme pertumbuhan sel yang sangat rumit yang cukup memadai untuk menggambarkan kinetika fermentasi bila konsentrasi komponen yang menghambat pertumbuhan cukup rendah. Faktor yang mempengaruhi kinetika pertumbuhan antara lain konsentrasi substrat, konsentrasi produk, faktor lingkungan lain dan kinetika pembentukan produk (Sumarno, 2004).

Selama pertumbuhan yang seimbang hanya parameter tunggal μ yang digunakan untuk menentukan kinetika pertumbuhan populasi. Harga laju pertumbuhan spesifik tersebut digunakan untuk menggambarkan pengaruh lingkungan terhadap sel.

Tanaman dapat menjerap logam berat dari tanah dan mengangkutnya melalui xylem kemudian diakumulasi di dalam batang dan daun (Blaylock, et al. 1997); keadaan tersebut menunjukkan bahwa tanaman mampu menjerap polutan dari lokasi yang telah terkontaminasi dengan memanen biomassa tanaman tersebut (Chaney, 1983), fenomena ini disebut dengan peristiwa fitoremediasi.

Pertumbuhan tanaman normal dan transgenik *S. nigrum* L. baik tanaman tanpa perlakuan/kontrol (tanpa ada penambahan Zn) maupun tanaman dengan perlakuan/uji (dengan adanya penambahan Zn dengan konsentrasi 200 mg/kg berat media) dapat dirumuskan dengan persamaan-persamaan berikut :

$$\frac{dX}{dt} = r_x = \mu X \quad \mu = \frac{1}{X} \frac{dX}{dt} \text{ atau } \ln \frac{X}{X_0} = \mu(t - t_0) \quad (1)$$

atau

$$t_d = \frac{0,693}{\mu} \quad (2)$$

dimana:

- μ = Laju pertumbuhan spesifik (minggu⁻¹).
- X_0 = Berat biomassa (g berat kering) pada waktu t_0 (minggu).
- X = Berat biomassa (g berat kering) pada waktu t (minggu).
- t_d = Waktu penggandaan (minggu).

II.5 Kultur Akar Rambut

Kultur jaringan tanaman merupakan teknik untuk menumbuhkan organ, jaringan dan sel tanaman secara *in vitro* (buatan). Jaringan dapat dikulturkan pada agar padat atau dalam medium hara cair (Wettler & Constabel, 1991). Menurut Subroto (1996), kultur jaringan tanaman merupakan teknik pertumbuhan jaringan tanaman pada media buatan, dalam keadaan terkontrol dan pada kondisi steril.

Kultur jaringan tanaman secara luas dipakai untuk tujuan perbanyak tanaman (mikropropagasi), produksi metabolit sekunder, studi biosintesis metabolit primer dan sekunder, pelestarian plasma nutfah dan pemuliaan tanaman (Subroto, 1996). Ada beberapa bentuk kultur jaringan tanaman yang dapat dibuat sesuai dengan keperluan, yaitu kultur kalus, kultur suspensi sel, kultur tunas, kultur akar rambut dan kultur embrio (Subroto & Ermayanti, 1998).

Menurut Wettler & Constabel (1991), sel yang berasal dari spesies tanaman apapun dapat dibiakkan atau dikulturkan secara aseptis pada atau dalam medium hara. Jika ditanam dalam medium agar maka jaringan akan membentuk kalus yaitu massa atau sel-sel yang tidak tertata. Jika diinginkan kultur suspensi sel, kalus dipindahkan pada medium cair dan

wadahnya kemudian ditempatkan pada pengocok. Berangsur-angsur dalam waktu beberapa minggu dan dengan melakukan subkultur akan didapat kultur suspensi sel. Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan kalus dan kultur suspensi sel amat beragam dan terutama bergantung pada jenis jaringan dan komposisi medium.

Subroto (1996) menerangkan bahwa akar rambut (*hairy roots*) adalah kultur akar tanaman hasil transformasi genetika oleh bakteri tanah *Agrobacterium rhizogenes*. Kultur akar rambut biasanya diinisiasi dengan cara infeksi langsung tanaman atau eksplan dari spesies yang rentan terhadap infeksi bakteri *A. rhizogenes*.

Lebih lanjut Subroto (1996) menjelaskan bahwa mekanisme pembentukan akar rambut terjadi apabila tanaman terinfeksi oleh *A. rhizogenes* yang menyebabkan pemasukan satu atau dua bagian dari transfer DNA (T_L atau T_R) yang terkandung di dalam plasmid bakteri ke dalam genom tanaman. Kejadian transformasi tersebut dipicu oleh aktivitas gen-gen vir yang terkandung di dalam bagian plasmid yang tidak ditransfer. Integrasi dari DNA tersebut bersifat acak dan seringkali banyak salinan T-DNA yang masuk. Hal ini menghasilkan perubahan metabolisme hormon auksin pada jaringan yang ditransformasi dan terbentuknya akar rambut pada tempat yang terinfeksi. Akar rambut tersebut menunjukkan pembentukan percabangan lateral yang banyak dan mensintesis asam amino spesifik yang disebut opin. Akar rambut tersebut dapat dipotong dan ditumbuhkan secara *in vitro* di dalam medium cair tanpa hormon setelah bakteri yang masih tersisa dibunuh dengan penambahan antibiotik.

Subroto *et al.* (1996) menerangkan bahwa kultur akar rambut dan kultur teratoma tunas (*shooty teratoma*) yang merupakan kultur tunas hasil transformasi genetika dengan bakteri *Agrobacterium tumefaciens* memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan kultur tanaman untuk pengolahan limbah.

Kultur akar rambut dapat memperlihatkan kemampuannya dalam perkembangan metode fitotransformasi, fitostimulasi, rizofiltrasi dan fitoekstraksi untuk menangani masalah limbah dan logam berat. Kultur akar rambut dari *Beta vulgaris* (gula bit), *Nicotiana tabacum* (tembakau), *Calystegia sepium* (Metzger *et al.*, 1992) dan *S. nigrum* L. (leunca) (Maček *et al.*, 1994) telah dicoba untuk studi akumulasi logam kadmium.

Nedelskoska & Doran (1999) juga meneliti tentang kemampuan kultur akar rambut dari kelas *Cruciferae* spesies *Thlaspi caerulescens* sebagai tanaman hiperakumulator yang mampu menampung logam kadmium sampai 6,3%. Mackova *et al.* (1997) mempelajari kemampuan kultur akar rambut *Armoracia rusticana*, *S. aviculare*, *Atropa belladonna* dan *S.*

nigrum secara *in vitro* untuk mendegradasi Delor 103 yang merupakan campuran senyawa *polychlorinated biphenils* (PCB). Hasilnya menunjukkan bahwa kultur akar rambut *S. nigrum* L. (SNC-90) merupakan degradator yang paling ampuh. Baru-baru ini Wahyuni dan Subroto (2001) menunjukkan bahwa kultur akar rambut *S. nigrum* L. dapat digunakan untuk mendegradasi residu pestisida diazinon secara *ex situ*. Selama 23 hari di dalam reaktor kolom diazinon dapat didegradasi hingga 50% dan dirubah menjadi 3 senyawa baru. Sedangkan Priambodo (2002) melaporkan penggunaan kultur akar rambut *S. nigrum* L. untuk penjerapan dan akumulasi logam berat Zn secara *in vitro*. Penjerapan logam berat Zn hingga 98% dapat dicapai pada hari ke-15. Hal ini menunjukkan potensi tanaman transgenik *S. nigrum* L. hasil regenerasi dari akar rambut tersebut untuk digunakan sebagai remediator logam berat Zn secara *in situ*. Kemampuan regenerasi akar rambut *S. nigrum* L. menjadi tanaman utuh baru-baru ini juga telah ditunjukkan dengan pembentukan akar yang lebih baik dibandingkan dengan tanaman induknya (*S. nigrum* L. jenis liar) (Subroto *et al.*, 2001).

Beberapa keuntungan yang dapat diperoleh dengan penggunaan kultur jaringan tanaman untuk proses fitoremediasi adalah:

- a. Proses fitoremediasi dapat dilakukan di mana saja tanpa ketergantungan dari sumber tanamannya;
- b. Tidak tergantung dari iklim atau cuaca (proses terkontrol) sehingga proses dapat dengan mudah dioptimalkan;
- c. Mutu dari tanaman dapat dengan mudah ditingkatkan melalui rekayasa genetika; dan
- d. Relatif lebih murah karena biomassa tanaman dapat diperoleh dengan cepat (Subroto, 1996).

BAB III METODE PENELITIAN

III.1 Kerangka Pemikiran

Teknik fitoremediasi merupakan teknik baru yang dikembangkan dan diharapkan mampu untuk menangani masalah pencemaran logam berat di Indonesia dengan memanfaatkan tanaman. Jenis tanaman yang digunakan adalah tanaman leunca (*S. nigrum* L.) transgenik yang merupakan tanaman hasil regenerasi dari akar rambut *S. nigrum* L. yang merupakan tanaman hasil transformasi genetika oleh bakteri tanah *A. rhizogenes* galur ATCC 15834 dan tanaman *S. nigrum* L normal yang benihnya didapatkan dari koleksi Pusat Penelitian Bioteknologi-LIPI Cibinong, Bogor.

Penggunaan teknik fitoremediasi untuk menangani masalah pencemaran logam berat pada penelitian ini terbatas hanya pada jenis logam berat yang paling dominan mencemari perairan dan tanah di Indonesia dan dilakukan pada skala rumah kaca. Hasil yang didapat pada penelitian ini diharapkan mampu untuk dikembangkan dan diaplikasikan langsung di lapangan atau di tempat-tempat yang tercemar oleh Zn.

III.2 Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah benih tanaman transgenik *S. nigrum* L. galur ATCC 15834, benih tanaman normal *S. nigrum* L. (sebagai kontrol) koleksi Pusat Penelitian Bioteknologi-LIPI Cibinong, Bogor, dan logam berat Zn (seng) dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$. Bahan-bahan lainnya yang diperlukan yaitu: tanah, kompos, pupuk kandang, dan air.

Peralatan yang digunakan adalah alat-alat gelas, pot, pH meter, timbangan analitik, lemari es, freezer, rumah kaca dan AAS (*Atomic Absorbtion Spectrophotometer*) pada panjang gelombang (λ) 213,9 nm.

III.3 Variabel Penelitian

Variabel utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Konsentrasi Zn
 - 1) Tanpa perlakuan (penambahan Zn pada media = 0).
 - 2) Dengan perlakuan (penambahan Zn pada media 200 mg/kg media).

- b. Jenis tanaman
 - 1) Tananaman transgenik *S. nigrum* L
 - 2) Tanaman normal *S. nigrum* L
- c. Waktu pemaparan
Selama daur hidup tanaman tersebut (0 s/d 26 minggu).

III.4 Waktu dan Tempat Kegiatan

Kegiatan penelitian ini dimulai pada bulan Mei 2002 sampai Maret 2004, dilaksanakan di Pusat Penelitian Bioteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) di Cibinong, Bogor. Untuk analisis karakteristik fisika-kimia tanah dan sampel hasil penelitian menggunakan alat AAS di Balai Penelitian Tanah Bogor.

III.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam pot-pot di rumah kaca dengan prosedur sebagai berikut:

- a. Penyemaian benih *S. nigrum* L. galur ATCC 15834 (transgenik) dan *S. nigrum* L. normal (kontrol) di tempat persemaian di rumah kaca. Kecambah umumnya muncul setelah 4-10 hari. Sebagai media dasar (kontrol) digunakan tanah/kompos/pupuk kandang dengan perbandingan 1:1:1. Perlakuan diberikan pada pot-pot percobaan dengan penambahan larutan Zn (dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$) dengan konsentrasi 0 mg/kg berat media (tanpa perlakuan/kontrol) dan 200 mg/kg berat media (dengan perlakuan). Percobaan dilakukan dengan ulangan sebanyak 3 kali untuk masing-masing perlakuan.
- b. Pindahkan kecambah yang berumur 28 hari ke pot-pot yang lebih besar di rumah kaca dengan media yang sama seperti pada tahap (a) untuk masing-masing kecambah.
- c. Pengamatan pertumbuhan tanaman dan kandungan Zn dalam setiap bagian tanaman (akar, batang, daun dan buah). Pengamatan dilakukan setiap dua minggu dengan memanen setiap sampel tanaman. Parameter-parameter yang diukur untuk setiap bagian tanaman dan tanah untuk masing-masing perlakuan adalah: berat basah, berat kering, kandungan Zn dalam setiap bagian tanaman. Pengamatan dan pengambilan sampel dilakukan 2 minggu sekali hingga berakhirnya siklus pertumbuhan tanaman (26 minggu). Metode yang digunakan untuk pembagian

tanaman adalah metode yang digunakan oleh Eltayeb *et al.* (1997) dan Lancaster & Mann (1975) dimana dalam siklus pertumbuhan dan perkembangannya masing-masing tanaman dibagi menjadi 10 bagian, yaitu daun kecil (<3,4 cm), daun muda 1 (3,4-7,4 cm), daun muda 2 (7,4-11,0 cm), daun tua (>11,0 cm), buah kecil - hijau ($d < 3,0$ mm), buah muda - hijau ($d \pm 6,0$ mm), buah mengkal-hijau gelap, buah masak - hitam gelap, batang (seluruhnya) dan akar (seluruhnya). Masing-masing bagian tersebut kemudian diukur berat dan kandungan logam berat Zn-nya untuk mendapatkan pola akumulasinya selama pertumbuhan.

- d. Menganalisis kandungan Zn dalam setiap sampel dengan menggunakan AAS pada panjang gelombang (λ) 213,9 nm.
- e. Menganalisis kinetika pertumbuhan yang terjadi pada tanaman *S. nigrum* L normal dan transgenik akibat pemaparan Zn (dengan perlakuan) dibandingkan dengan tanaman *S. nigrum* L kontrol (tanpa perlakuan/ tanpa penambahan Zn).

III.6 Persiapan media

- a. Mencampur hingga homogen bahan media tanah berupa tanah/kompos/pupuk kandang dengan perbandingan 1:1:1.
- b. Menimbang kebutuhan media tanah untuk tiap pot masing masing 3,5 kg.
- c. Jumlah pot yang dibutuhkan: 2 (jenis tanaman) x 13 (jumlah sampling) x 2 (perlakuan) x 3 (ulangan) = 156 pot, terdiri dari:
 - 1) 78 pot tanaman *S. nigrum* L normal, terdiri atas:
 - a) 39 pot kontrol (tanpa penambahan Zn).
 - b) 39 pot perlakuan (dengan penambahan Zn).
 - 2) 78 pot tanaman *S. nigrum* L transgenik ATCC 15834 terdiri atas:
 - a) 39 pot kontrol (tanpa penambahan Zn).
 - c) 39 pot perlakuan (dengan penambahan Zn).
- d. Penambahan Zn dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ ke dalam tanah dilakukan dengan melarutkannya dengan air dan mencampurkannya dengan media tanah secara merata. Jumlah air yang diperlukan ditentukan dengan mengukur kejenuhan air untuk media tanah tiap pot yaitu selisih berat antara tanah yang telah dibasahi dengan air hingga jenuh dan tanah sebelum dibasahi dengan air.
- e. Menghitung kebutuhan logam Zn untuk tiap pot sehingga didapatkan konsentrasi 200 mg/kg sebagai berikut: BA Zn = 65,38; BM $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ =

287,54 sehingga dibutuhkan $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ 879,596 mg/kg atau 3,079 g/pot (berat 1 pot = 3,5 kg).

f. Mencampurkan larutan logam Zn ke dalam media tanah hingga homogen.

III.7. Pengumpulan data penelitian

a. Sampling dilakukan setiap dua minggu sekali setelah pemindahan tanaman dari tempat penyemaian ke pot-pot perlakuan, yaitu minggu ke-2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 dan 26 (13 sampling),

b. Untuk hari ke-0 (minggu ke-0) dilakukan pengambilan sampel sebagai berikut:

- 1) 3 (tiga) sampel tanah awal tanpa penambahan Zn untuk dianalisa kadar Zn-nya, digunakan untuk perhitungan blanko.
- 2) 3 (tiga) sampel tanah awal tanpa penambahan Zn untuk dianalisa karakteristik fisika-kimia tanah (Rossi et al., 2002)
- 3) 3 (tiga) sampel tanaman *S. nigrum* L normal, masing-masing dipisahkan dan ditimbang berat basah dan berat kering antara akar, daun, batang dan buah, untuk kemudian dianalisis kandungan Zn awal.
- 4) 3 (tiga) sampel tanaman *S. nigrum* L transgenik, masing-masing dipisahkan dan ditimbang berat basah dan berat kering antara akar, daun, batang dan buah, untuk kemudian dianalisis kandungan Zn awal.
- 5) 3 (tiga) sampel air yang digunakan untuk dianalisis kandungan Zn-nya.

c. Pada minggu ke-2 dan seterusnya dilakukan pengambilan sampel dengan cara memanen, kemudian dipisahkan, diukur, ditimbang berat basah dan kering masing-masing bagian tanaman sesuai Eltayeb et al. (1997) dan Lancaster & Mann (1975) di atas.

III.8 Analisis Kandungan Logam Zn

Proses analisis kandungan logam Zn yang terdapat pada bagian-bagian tanaman dan air dilakukan menggunakan alat AAS pada panjang gelombang (λ) 213,9 nm. Sebelum dianalisis, sampel yang diperoleh terlebih dahulu harus dipreparasi dalam bentuk cair. Proses preparasi ini dilakukan untuk mempermudah pembacaan konsentrasi logam oleh alat AAS pada panjang gelombang (λ) 213,9 nm.

Proses preparasi bagian-bagian tanaman dan media tanah untuk tiap sampel dilakukan dengan cara menimbang sejumlah sampel, kemudian diabukan dengan cara memasukkan sampel bersama cawan porselen ke dalam tanur dengan suhu pembakaran sekitar 550°C selama lebih kurang tiga jam sampai sampel berwarna putih (menjadi abu).

Sampel yang telah menjadi abu kemudian dilarutkan dengan asam nitrat (HNO_3) 1 N sebanyak 10 mL dan diuapkan pada penangas air dengan suhu 80°C selama 2 - 3 menit. Larutan abu kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 100 mL dan diencerkan menggunakan asam nitrat (HNO_3) 0,1 N sampai tepat tanda tera. Sampel yang telah diencerkan kemudian dimasukkan ke dalam botol kecil berukuran 50 mL kemudian ditutup menggunakan aluminium foil dan siap untuk dianalisis kandungan logamnya menggunakan alat AAS pada panjang gelombang (λ) 213,9 nm.

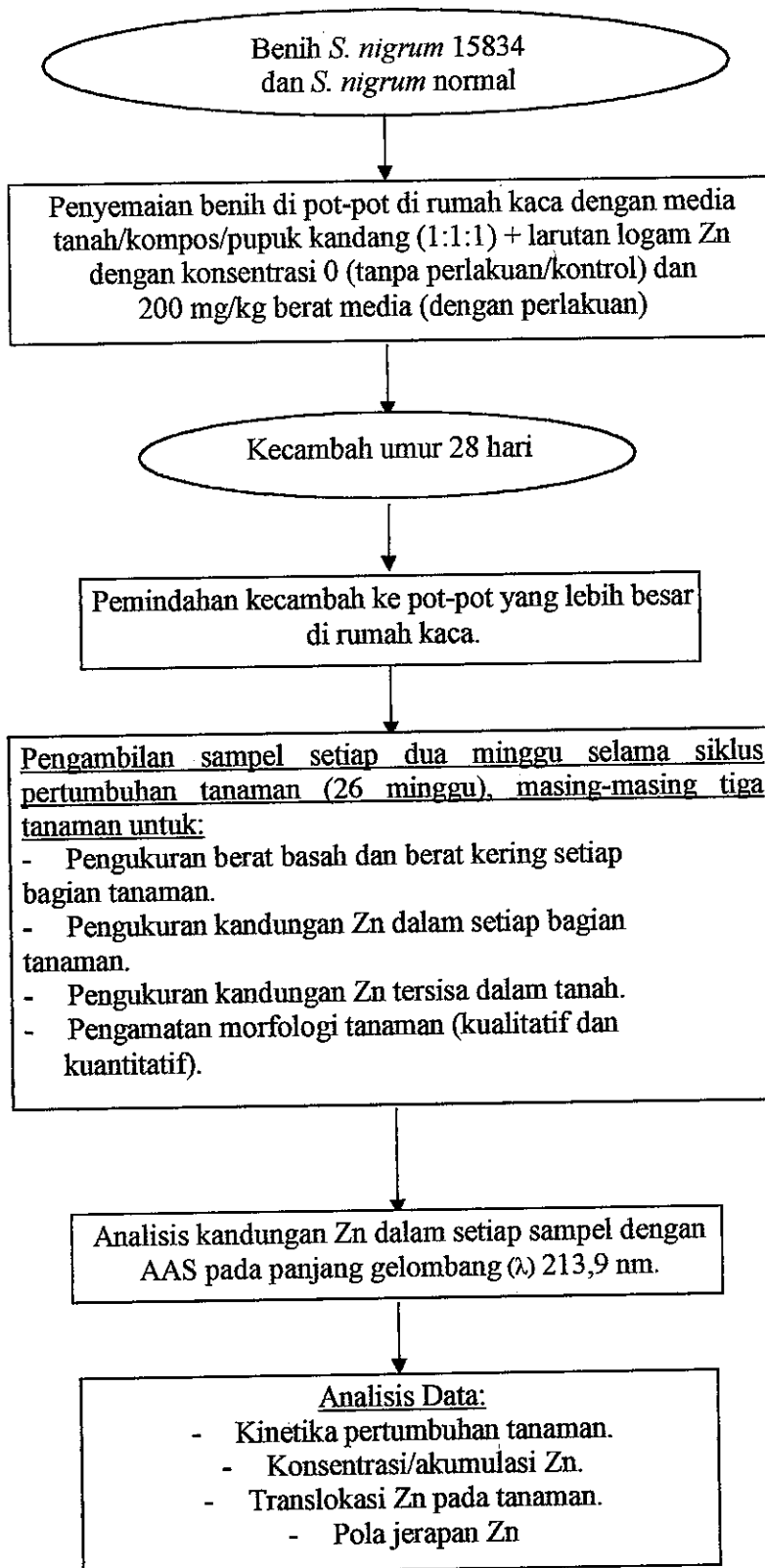
Untuk sampel air yang digunakan untuk melarutkan logam Zn guna membantu memberikan perlakuan terhadap media tanah untuk pertumbuhan tanaman tidak perlu dipreparasi karena sudah berbentuk cair. Media sisa tersebut hanya diencerkan menggunakan aquades bebas ion agar dapat terbaca kandungan logamnya pada alat AAS. Sebanyak 2 mL media sisa dimasukkan ke dalam labu ukur 50 mL kemudian diencerkan dengan aquades bebas ion sampai tepat tanda tera. Media sisa yang telah diencerkan kemudian dimasukkan ke dalam botol kecil berukuran 50 mL kemudian ditutup dengan aluminium foil dan siap dianalisis kandungan logamnya.

III.9 Analisis Data

Analisis data yang diperoleh dari percobaan dilakukan dengan metode sebagai berikut:

- a. Analisis statistika uji t/uji beda nyata untuk membandingkan pertumbuhan tanaman dan konsentrasi logam berat yang dijerap oleh tanaman.
- b. Model kinetika pertumbuhan tanaman dan jerapan logam berat Zn pada tanaman transgenik dan tanaman normal *S. nigrum* L. selama siklus pertumbuhan.

III.10 Diagram Alir Penelitian



BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

IV.1 Karakteristik fisika kimia media

Tanaman membutuhkan kondisi lingkungan yang optimum untuk mendukung proses pertumbuhannya, baik itu tanaman normal maupun tanaman yang dihasilkan dari rekayasa genetika. Kondisi optimum yang mendukung keberhasilan pertumbuhan tanaman dengan baik di antaranya adalah kebutuhan hara (N, P, K), kebutuhan oksigen, kebutuhan air dan mineral-mineral penting lainnya.

Sebagai media dasar (kontrol) pertumbuhan tanaman dalam penelitian ini digunakan campuran tanah/kompos/pupuk kandang dengan perbandingan 1:1:1. Perlakuan diberikan pada pot-pot percobaan masing-masing seberat sekitar 3,5 kg dengan penambahan larutan logam berat Zn dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ dengan konsentrasi 0 mg/kg berat media (kontrol = tanpa perlakuan) dan 200 mg/kg berat media (dengan perlakuan). Penentuan besarnya penambahan logam berat Zn tersebut didasarkan studi yang dilakukan oleh Priambodo (2002) yang menunjukkan bahwa akar rambut *S. nigrum* L. mempunyai kemampuan tumbuh dalam media yang mengandung konsentrasi Zn tinggi (hingga 18,64 mg/L) dan bahkan hingga 60 mg/L setelah melalui tahap penyesuaian (data tidak dipublikasikan), sedangkan menurut Rossi et al (2002) bahwa tanaman *Brassica napus* toleran terhadap penambahan logam berat Zn sebanyak 600 mg/kg media, sehingga diambil jalan tengah angka 200 mg/kg dengan harapan tanaman *S. nigrum* L masih mampu bertahan/toleran terhadap paparan logam tersebut dan belum habis hingga berakhirnya daur hidup tanaman dalam penelitian ini. Sebelum penambahan logam berat Zn media telah mengandung logam Zn total sekitar 117 ppm atau 409,5 μg , sedangkan Zn dengan DTPA sekitar 15,25 ppm, dengan penambahan 200 mg/kg logam Zn akan menambah kandungan logam berat tersebut, bahkan mungkin lebih banyak lagi karena media tanah yang didasarkan pada berat 3,5 kg tidak dalam kondisi benar-benar kering.

Hasil analisis terhadap beberapa karakteristik fisika-kimia tanah sebagai media pertumbuhan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.
Karakteristik fisika kimia tanah (media)

No	Tekstur			Ekstrak 1:5		Terhadap contoh kering 105 oC															
	Pasir	Debu	Liat	pH		Bahan Organik						Nilai tukar Kation (NH4-Asetat 1N, pH 7)						Total		DTPA	
				H2O	KCl	C	N	C/N	Ca	Mg	K	Na	Jumlah	KTK	KB*	P	Mn	Zn	Zn	Zn	
1	10	18	72	6.2	6	5.2	0.5	11	18.3	8.8	6.1	0.6	33.77	29.2	>100	0.12	1.332	117	15.03		
2	17	20	63	6.3	6.1	5.2	0.5	10	17.3	832	6.1	0.8	32.61	28.6	>100	0.14	1.310	125	15.45		
3	10	21	69	6.2	6.1	4.4	0.5	11	19.4	9.1	6.7	0.9	36.08	29.5	>100	0.13	1.200	110	15.38		
rerata	12.3	19.7	68	6.2	6.07	4.9	0.5	11	18.3	283	6.3	0.8	34.15	29.1	>100	0.13	1.28	117	15.29		

Lempung

Dari Tabel 2 terlihat bahwa kandungan lempung dari media adalah sekitar 68% yang sudah barang tentu akan mempunyai pengaruh yang relatif besar terhadap kemampuan tanaman mengakumulasi logam berat Zn.

Oleh karena koloid lempung menyandang muatan negatif, kation-kation tertarik oleh partikel lempung. Kebanyakan dari kation-kation bebas menyebar dalam fase larutan dengan difusi. Kerapatan populasi ion dengan sendirinya paling tinggi pada permukaan lempung atau di dekatnya. Kation-kation ini disebut kation terjerap. Umumnya ion dengan ukuran terhidrasi yang lebih kecil dijerap secara preferensi. Deret ion dengan preferensi jerapan yang menurun disebut *deret liotrop*, sebagaimana dilaporkan oleh Gast (1977). Taylor & Ashcroft (1972) dalam Tan (1982) menemukan bukti bahwa deret liotrop akan berbeda untuk tipe lempung yang berbeda.

Pada kondisi-kondisi tertentu kation terjerap diikat sedemikian kuatnya oleh lempung, sehingga mereka tidak dapat terambil kembali dengan reaksi pertukaran kation, hal ini dapat terjadi bagi hampir semua kation, namun yang paling penting adalah dengan ion K^+ dan NH_4^+ karena ion-ion tersebut pas dengan ukuran kisi lempung. Menurut Tan (1982) dengan pemberian pupuk K^+ atau NH_4^+ akan mengisi posisi-posisi kosong kisi lempung sehingga menjenuhi kapasitas penyematan tanah.

Pasir

Sebagaimana keberadaan lempung, adanya pasir dalam media pun sangat berpengaruh terhadap proses penyerapan logam berat tersebut oleh tanaman percobaan. Dari hasil analisis terhadap media diketahui bahwa kandungan pasirnya adalah sekitar 12% sehingga menurut Tan (1982) akan mempengaruhi kapasitas tukar kation yang memegang peranan yang sangat penting dalam penyerapan hara oleh tanaman, kesuburan tanah, retensi hara dan pemupukan. Menurut Sam (2000), adanya pasir akan menurunkan kapasitas tukar kation karena pasir tidak mengikat kation.

Kapasitas Tukar Kation

Kapasitas tukar kation tanah didefinisikan sebagai kapasitas tanah untuk menyerap dan mempertukarkan kation. Kation-kation yang berbeda dapat mempunyai kemampuan yang berbeda untuk menukar kation yang dijerap. Jumlah yang dijerap sering tidak setara dengan yang dipertukarkan. Ion-ion divalen biasanya diikat lebih kuat dari pada ion-ion

monovalen. Dengan kata lain, nilai kapasitas tukar kation tanah bervariasi menurut tipe dan jumlah koloid yang ada dalam tanah, sebagai contoh nilai kapasitas tukar kation untuk humus adalah 200 mEK per 100 g. Hasil analisis terhadap media didapatkan nilai kapasitas tukar ionnya adalah sekitar 35 mEK per 100 g, yang relatif jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai untuk kategori humus di atas, walaupun dari tabel tersebut dikatakan bahwa kejenuhan basanya lebih dari 100% karena adanya kation-kation bebas selain kation-kation yang dapat ditukar.

Kejenuhan basa

Kejenuhan basa merupakan sifat yang berhubungan dengan kapasitas tukar kation. Kejenuhan basa sering dianggap sebagai petunjuk tingkat kesuburan tanah. Kemudahan pelepasan kation terjerap untuk tanaman tergantung pada tingkat kejenuhan basa. Suatu tanah dianggap sangat subur bila kejenuhan basanya $\geq 80\%$, kesuburan sedang antara 80 dan 50% dan tidak subur $\leq 50\%$. Sebagaimana disebutkan sebelumnya bahwa nilai kejenuhan media adalah lebih dari 100% yang berarti sangat subur.

Kation lain

Dalam penelitian ini dianalisis juga keberadaan kation lain seperti fosfor, besi mangan selain kation mineral lainnya, yang tidak menutup kemungkinan pula adanya logam-logam lain dalam media tersebut. Adanya kation-kation lain seperti Cu, Cd, Ca dan Mn akan saling mempengaruhi/berkompetisi dalam proses *up take* oleh tanaman (Cieslinski 1996, Kabata – pendius ang Pendius 1992, Lombi, et al 1999). Diperkirakan bahwa logam berat Zn mungkin akan berkompetisi dengan logam berat Cd untuk *up take* oleh tanaman, sebab masing masing strukturnya sangat mirip (Lombi et al 1999 dalam Sam 2000). Adanya Ca^{2+} akan mengurangi bioavailabilitas dengan meningkatkan nilai pH dan saling bersaing pada proses penyerapan di lokasi akar (Cieslinski, 1996 dalam Sam 2000). Logam Mn kemungkinan juga mempengaruhi kemampuan tanaman tersebut dalam menyerap logam Zn.

Air

Menurut Hardjowigeno (1995), air berguna bagi pertumbuhan tanaman sebagai unsur hara tanaman. Tanaman memerlukan air dan karbon dioksida untuk membentuk gula dan karbohidrat. Air juga berguna sebagai pelarut unsur hara. Unsur hara yang terlarut

dalam air akan dijerap oleh akar-akar tanaman dari larutan tersebut. Dalam penelitian ini di samping digunakan sebagaimana kebutuhan di atas dengan cara menyiramkan pada tanaman dan atau dalam media pertumbuhannya (tanah dalam pot) juga dimanfaatkan untuk melarutkan logam berat Zn dalam bentuk $Zn(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ sebagai perlakuan guna menambah konsentrasi 200 mg/kg media logam tersebut ke dalam media pertumbuhan tanaman percobaan tersebut. Air yang digunakan diambil dari sumur Puslit Bioteknologi-LIPI Cibinong dan mengandung logam berat Zn sekitar 0,475 ppm sehingga dengan penyiraman akan menambah konsentrasi logam berat Zn dalam media tersebut.

pH

Menurut Gumbira-Sa'id (1987), pH medium merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan pembentukan produk. Besarnya pH untuk pertumbuhan maksimum seringkali berkisar satu sampai satu setengah unit. Pertumbuhan tanaman *S. nigrum* L akan optimum apabila medianya juga dalam kondisi optimum atau dengan kata lain membutuhkan pH media yang optimum selama pertumbuhannya. Nilai pH media yang rendah akan menaikkan bioavailabilitas logam berat, dan biasanya akan menaikkan *up take* tanaman terhadap logam berat, kecuali logam berat tersebut memberikan respons racun terhadap tanaman tersebut. Menurut Bingham (1980) dalam Sam 2000, mobilitas optimum logam berat dicapai pada kisaran pH = 4,5 sampai dengan 5,5. Dari hasil analisis pada Tabel 2 didapatkan bahwa pH media adalah berkisar antara 6 sampai dengan 6,5 sehingga akan memberikan hasil yang lebih baik apabila dilakukan koreksi terhadap nilai pH karena menurut Hardjowigeno (1995) pH sangat menentukan mudah tidaknya unsur-unsur hara dijerap oleh tanaman. Koreksi terhadap nilai pH biasanya dilakukan dengan melakukan penambahan asam, dan untuk beberapa jenis tanaman dengan menambahkan asam-asam organik dari kompos (Salisbury & Ross, 1992 dalam Sam 2000).

Kondisi media pertumbuhan memang tidak optimum sebagaimana yang diharapkan, apalagi dengan jumlah media yang hanya sekitar 3,5 kg tidak dapat memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman selama siklus hidupnya karena dirancang dengan sistem tertutup dalam arti tidak ada penambahan nutrisi kecuali penyiraman air selama daur hidupnya.

IV.2. Parameter *Confounding*

Parameter *Confounding* adalah parameter yang dimungkinkan berpengaruh dalam proses fitoremediasi namun tidak menjadi pokok kajian dalam penelitian ini, parameter parameter tersebut antara lain :

Kompetisi Kation

Kemampuan tanaman untuk mengakumulasi logam berat Zn sangat dipengaruhi oleh sifat fisika-kimia medianya. Sebagaimana diuraikan di muka bahwa adanya kation-kation lain seperti Cu, Cd, Ca dan Mn akan saling mempengaruhi/berkompetisi dalam proses *up take* oleh tanaman (Cieslinski 1996, Kabata – pendius ang Pendius 1992, Lombi, et al 1999). Diperkirakan bahwa logam berat Zn mungkin akan berkompetisi dengan logam berat Cd untuk *up take* oleh tanaman sebab masing-masing strukturnya sangat mirip (Lombi et al 1999 dalam Sam 2000).

Adanya Ca^{2+} akan mengurangi bioavailabilitas dengan meningkatkan nilai pH dan saling bersaing pada proses penyerapan di lokasi akar (Cieslinski, 1996 dalam Sam 2000). Dengan adanya kandungan Cu/Cd yang lebih tinggi akan meningkatkan bioavailabilitas Zn. Begitupun kemungkinan adanya kandungan logam-logam lain dalam media tersebut yang mempengaruhi dan atau bersaing untuk diakumulasikan di akar atau ditranslokasikan ke bagian tanaman yang lain.

Pembentukan kompleks dan pengkhelatan

Pembentukan kompleks dan pengkhelatan memegang peranan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Dengan pengkhelatan akan meningkatkan mobilitas banyak kation yang akan berakibat pada ketersediaannya pada tanaman. Pelepasan hara tanaman oleh pelapukan mineral-mineral tanah biasanya merupakan suatu proses yang lambat, namun pembentukan kompleks cenderung mempercepat proses dekomposisi mineral-mineral tanah dan dengan demikian mempercepat pelepasan hara tersebut, sehingga kemampuan tanaman menyerap logam berat semakin meningkat. Menurut Pogrzeba et al logam berat akan lebih banyak terakumulasi di akar dibandingkan di batang namun dengan penambahan EDTA, pada tanaman jagung akan mengalami peningkatan jumlah logam yang diakumulasikan dan sebagian berat ditranslokasikan ke bagian batang.

Khelat ada yang alami dan yang sintetis, yang alami antara lain, Phytochelatin (PC) Metallothioneine (MT) dan asam-asam organik, sedangkan yang sintesis *EDTA* (*ethylene diamine tetra acetic acid*), *EGTA* (*ethylene glycol tetra acetic acid*).

Bahan Organik

Komponen organik tanah berasal dari biomasa yang mencirikan tanah aktif yang sifat dan akumulasinya tergantung pada jenis dan bahan tanaman yang mengalami pelapukan. Menurut Street (1977) dalam Sam (2000), bahan organik biasa ditambahkan ke tanah untuk menurunkan pH. Ini merupakan metode yang baik untuk menaikkan bioavailabilitas logam berat, namun terkadang penambahan bahan organik justru menurunkan bioavailabilitas logam berat apabila bahan organik tersebut mempunyai afinitas tinggi.

Asam sitrat dan asam maleat adalah dua senyawa yang telah menunjukkan kemampuan untuk bereaksi kompleks dengan logam berat pada akar tanaman. Akibat kehilangan H^+ , salah satu bagian asam (gugus COO^-) mengikat muatan positif kation. Tanaman mengeluarkan asam apabila melakukan *up take* logam-logam *non-bioavailable*, asam-asam yang sama akan menahan fungsi sel-sel tanaman apabila logam-asam kompleks dibawa ke bagian akar. Logam asam sitrat kompleks akan ditraslokasikan melalui xylem (Senden et al. 1990 dalam Sam 2000)

Fertilizer

Menurut Lorenz (1994) dalam Sam (2000), adanya nitrogen (NH_4^+) akan menaikkan bioavailabilitas logam berat pada kondisi pH rendah akibat proses disosiasi N dengan H^+ di dalam tanah. Lorenz (1994) juga menunjukkan adanya korelasi positif antara penggunaan K dan bioavailabilitas logam, namun tidak jelas bagaimana mekanismenya.

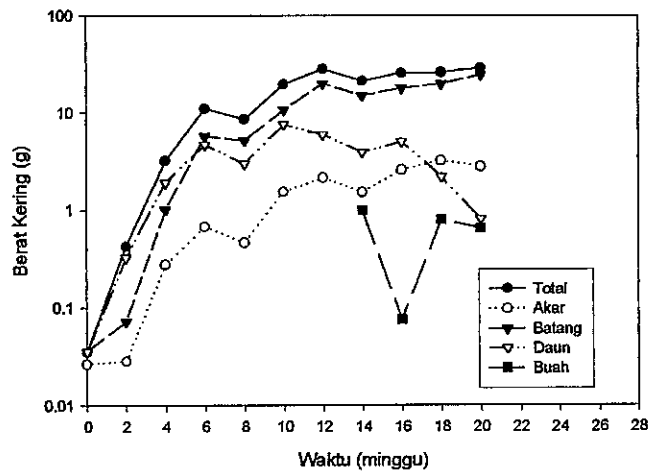
IV.3. Kinetika Pertumbuhan

Kinetika pertumbuhan digambarkan sebagai pertumbuhan dan pembentukan produk, bukan hanya pertumbuhan sel aktif, tetapi juga kegiatan-kegiatan sel-sel istirahat dan sel mati (Gumbira-s Sa'id dalam Priambodo, 2002), dan sangat dipengaruhi oleh sifat fisika-kimia media sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya.

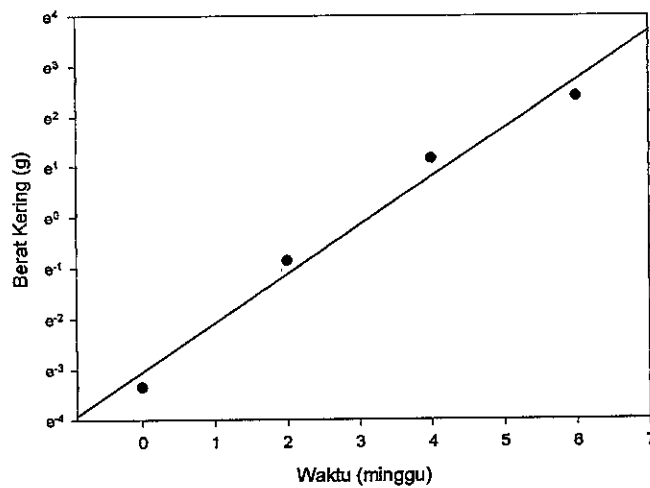
Perhitungan kinetika pertumbuhan didasarkan pada jumlah biomasa kering yang dipanen siap dua minggu sekali selama daur hidup tanaman tersebut menggunakan persamaan (1) pada Bab 2 yang dibantu dengan *software Sigma Plot exac graphs for exact science 6.1 by SPSS*. Dari data biomassa kering tersebut dapat dibuat kurva pertumbuhan untuk masing-masing tanaman selama daur hidupnya dan dihitung laju pertumbuhan spesifiknya (μ). Semakin tinggi nilai μ -nya maka semakin baik pertumbuhannya. Dalam penelitian ini dilihat apakah pemaparan logam berat Zn pada konsentrasi 200 mg/kg media mempengaruhi kinetika pertumbuhan tanaman normal dan transgenik dari *S. nigrum* L. Selain itu, dari kurva pertumbuhan tersebut dapat pula dilihat apakah pertumbuhan masing-masing tanaman tersebut mengikuti model pertumbuhan Monod sebagaimana yang lazim berlaku pada kultur bakteri dan yang telah terbukti berlaku pula pada kultur jaringan tanaman (kultur suspensi sel dan kultur organ seperti akar rambut dan teratoma tunas). Penyimpangan dari model Monod dapat digunakan untuk mengidentifikasi keabnormalan dari pertumbuhan, misalnya adanya kekurangan nutrisi, kekurangan air dan hambatan-hambatan dari faktor lingkungan eksternal sehingga perbaikan kondisi pertumbuhan dapat dilakukan.

IV.3.1 Tanaman Transgenik dengan perlakuan

Dari Gambar 1 dapat dilihat kurva pertumbuhan tanaman transgenik dengan perlakuan selama daur hidupnya. Terlihat bahwa mulai minggu ke-0 sampai dengan sekitar minggu ke-6 tanaman tumbuh secara eksponensial (yang ditandai dengan garis lurus) yang diikuti dengan pertumbuhan menurun dan akhirnya stasioner hingga selesai daur hidup tanaman tersebut. Fenomena tersebut sesuai dengan model persamaan Monod untuk pertumbuhan bakteri, namun tidak mengalami fase penyesuaian (*lag phase*) pada awal pertumbuhan karena pemindahan tanaman dilakukan setelah kecambah berumur sekitar 28 hari sehingga telah mengalami masa penyesuaian sebelum dilakukan pengamatan dalam penelitian ini. Buah baru muncul pada minggu ke 14, itupun kurang optimum.



Gambar 1.
Kurva pertumbuhan tanaman transgenik dengan perlakuan selama daur hidupnya.



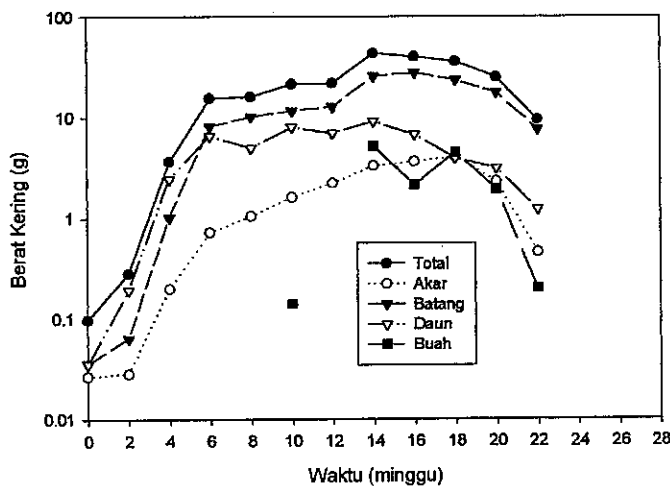
Gambar 2
Laju pertumbuhan spesifik tanaman transgenik dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,96 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.

Gambar 2 di atas memperlihatkan plot semilogaritmik untuk menentukan nilai μ (laju pertumbuhan spesifik) tanaman transgenik dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. Dari kurva tersebut diperoleh nilai μ sebesar $0,96 \text{ minggu}^{-1}$ dengan nilai koefisien r^2 sebesar $0,98$. Nilai r^2 tersebut menunjukkan interpretasi tinggi,

sehingga pola tersebut mengikuti model pertumbuhan Monod fase pertumbuhan mengalami percepatan sebagaimana yang lazim berlaku pada kultur bakteri dan yang telah terbukti berlaku pula pada kultur jaringan tanaman.

IV.3.2 Tanaman Transgenik Tanpa Perlakuan

Pada Gambar 3 dapat dilihat kurva pertumbuhan tanaman transgenik tanpa perlakuan selama daur hidupnya.



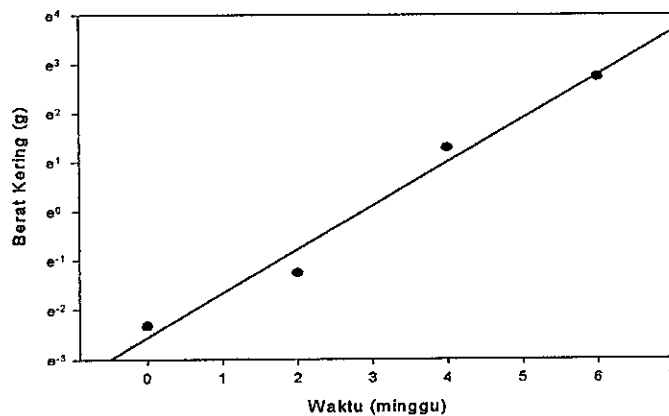
Gambar 3

Kurva pertumbuhan tanaman transgenik tanpa perlakuan selama daur hidupnya.

Dari Gambar 3 di atas terlihat bahwa mulai minggu ke-0 sampai dengan sekitar minggu ke-6 tanaman tumbuh secara eksponensial (yang ditandai dengan garis lurus) yang diikuti dengan pertumbuhan menurun dan akhirnya stasioner hingga minggu ke-18 dan berlanjut dengan fase kematian hingga selesai daur hidup tanaman tersebut. Fenomena tersebut sesuai dengan model persamaan Monod untuk pertumbuhan bakteri, namun tidak mengalami fase penyesuaian (*lag phase*) pada awal pertumbuhan karena pemindahan tanaman dilakukan setelah kecambah berumur sekitar 28 hari sehingga telah mengalami masa penyesuaian sebelum dilakukan pengamatan dalam penelitian ini.

Gambar 4 memperlihatkan plot semilogaritmik untuk menentukan nilai μ (laju pertumbuhan spesifik) tanaman transgenik tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. Dari kurva tersebut diperoleh nilai μ sebesar 0,89 minggu⁻¹

¹ dengan nilai koefisien r^2 sebesar 0,98. Nilai r^2 tersebut menunjukkan interpretasi tinggi, sehingga pola tersebut mengikuti model pertumbuhan Monod fase pertumbuhan mengalami percepatan sebagaimana yang lazim berlaku pada kultur bakteri dan yang telah terbukti berlaku pula pada kultur jaringan tanaman.

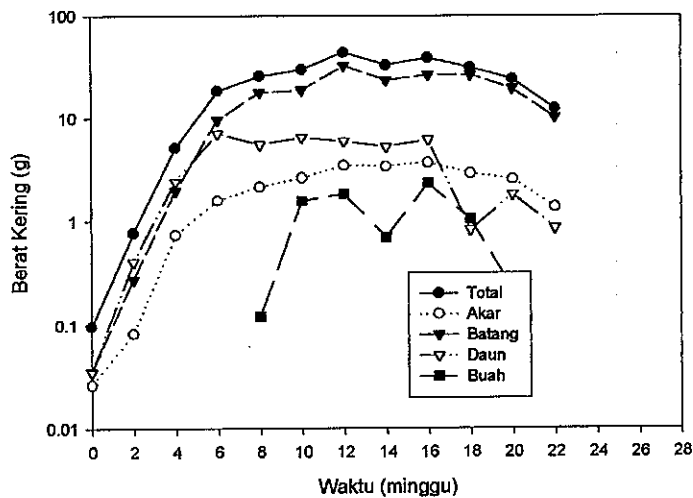


Gambar 4

Laju pertumbuhan spesifik tanaman transgenik tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,89 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.

IV.3.3 Tanaman Normal Dengan Perlakuan

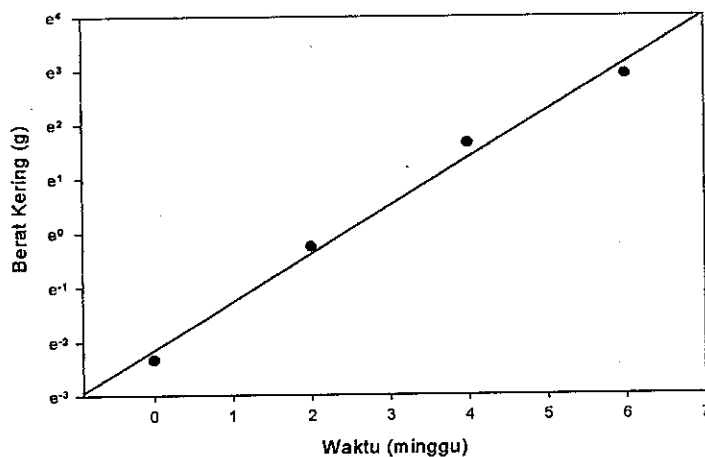
Pada Gambar 5 dapat dilihat kurva pertumbuhan tanaman normal dengan perlakuan selama daur hidupnya. Terlihat bahwa mulai minggu ke-0 sampai dengan sekitar minggu ke-6 tanaman tumbuh secara eksponensial (yang ditandai dengan garis lurus) yang diikuti dengan pertumbuhan menurun dan akhirnya stasioner hingga minggu ke-18 dan berlanjut dengan fase kematian hingga selesai daur hidup tanaman tersebut. Fenomena tersebut sesuai dengan model persamaan Monod untuk pertumbuhan bakteri, namun tidak mengalami fase penyesuaian (*lag phase*) pada awal pertumbuhan karena pemindahan tanaman dilakukan setelah kecambah berumur sekitar 28 hari sehingga telah mengalami masa penyesuaian sebelum dilakukan pengamatan dalam penelitian ini.



Gambar 5

Kurva pertumbuhan tanaman normal dengan perlakuan selama daur hidupnya.

Gambar 6 memperlihatkan plot semilogaritmik untuk menentukan nilai μ (laju pertumbuhan spesifik) tanaman normal dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. Dari kurva tersebut diperoleh nilai μ sebesar $0,88 \text{ minggu}^{-1}$ dengan nilai koefisien r^2 sebesar $0,99$. Nilai r^2 tersebut menunjukkan interpretasi tinggi, sehingga pola tersebut mengikuti model pertumbuhan Monod fase pertumbuhan mengalami percepatan sebagaimana yang lazim berlaku pada kultur bakteri dan yang telah terbukti berlaku pula pada kultur jaringan tanaman.

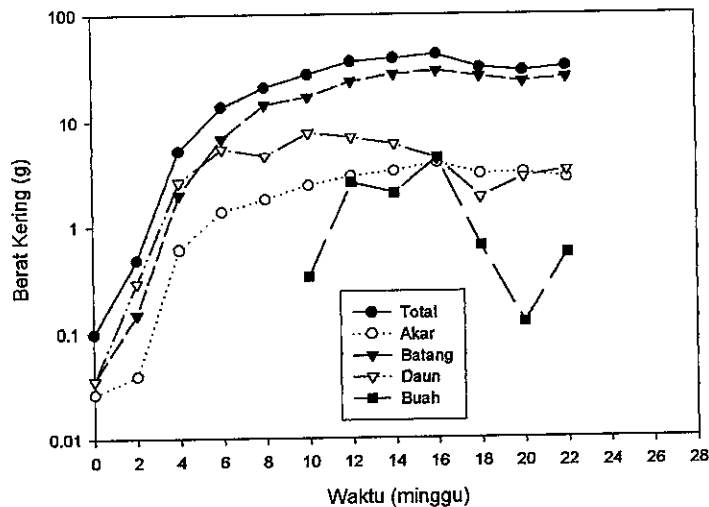


Gambar 6

Laju pertumbuhan spesifik tanaman normal dengan perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,88 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,99$.

IV.3.4 Tanaman Normal Tanpa Perlakuan

Pada Gambar 7 dapat dilihat kurva pertumbuhan tanaman normal tanpa perlakuan selama daur hidupnya.



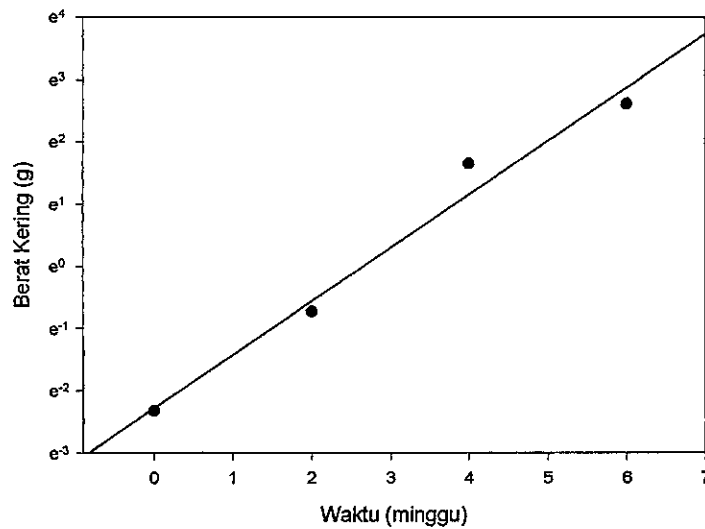
Gambar 7

Kurva pertumbuhan tanaman normal tanpa perlakuan selama daur hidupnya.

Dari Gambar 7 di atas terlihat bahwa mulai minggu ke-0 sampai dengan sekitar minggu ke-6 tanaman tumbuh secara eksponensial (yang ditandai dengan garis lurus) yang diikuti dengan pertumbuhan menurun dan akhirnya stasioner hingga selesai daur hidup tanaman tersebut. Fenomena tersebut sesuai dengan model persamaan Monod untuk pertumbuhan bakteri, namun tidak mengalami fase penyesuaian (*lag phase*) pada awal pertumbuhan karena pemindahan tanaman dilakukan setelah kecambah berumur sekitar 28 hari sehingga telah mengalami masa penyesuaian sebelum dilakukan pengamatan dalam penelitian ini.

Gambar 8 memperlihatkan plot semilogaritmik untuk menentukan nilai μ (laju pertumbuhan spesifik) tanaman normal tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. Dari kurva tersebut diperoleh nilai μ sebesar $0,86 \text{ minggu}^{-1}$ dengan nilai koefisien r^2 sebesar $0,98$. Nilai r^2 tersebut menunjukkan interpretasi tinggi, sehingga pola tersebut mengikuti model pertumbuhan Monod fase pertumbuhan mengalami percepatan

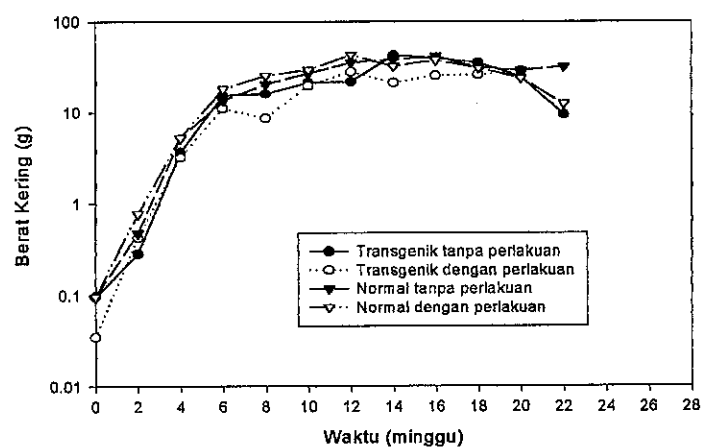
sebagaimana yang lazim berlaku pada kultur bakteri dan yang telah terbukti berlaku pula pada kultur jaringan tanaman.



Gambar 8

Laju pertumbuhan spesifik tanaman normal tanpa perlakuan selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama. $\mu = 0,86 \text{ minggu}^{-1}$; $r^2 = 0,98$.

Kurva pertumbuhan total untuk semua tanaman (normal dan transgenik, tanpa dan dengan perlakuan) dapat dirangkum pada Gambar 9 dengan masing-masing nilai μ -nya seperti tercantum pada Tabel 3.



Gambar 9

Kurva pertumbuhan total tanaman *S. nigrum* L. selama daur hidupnya.

Tabel 3.

Laju pertumbuhan spesifik (μ) tanaman *S. nigrum* L. selama pertumbuhan eksponensial 6 minggu pertama.

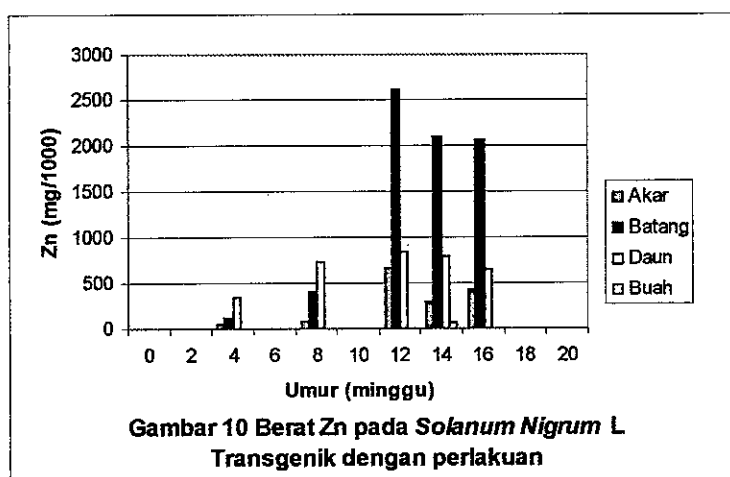
<i>S. nigrum</i> L.	μ (minggu ⁻¹)	
	Tanpa perlakuan	Dengan perlakuan
Normal	0,86	0,88
Transgenik	0,89	0,96

Dari Gambar 9 dan Tabel 3 dapat dilihat bahwa pemaparan logam berat Zn pada konsentrasi 200 mg/kg media tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan tanaman *S. nigrum* L. baik normal maupun transgenik. Dari Tabel 3 terlihat bahwa pemaparan logam berat Zn tersebut tidak mempengaruhi atau pengaruhnya sangat kecil terhadap pertumbuhan tanaman normal (nilai μ meningkat dari 0,86 minggu⁻¹ menjadi 0,88 minggu⁻¹) dan transgenik (nilai μ meningkat dari 0,89 minggu⁻¹ menjadi 0,96 minggu⁻¹)

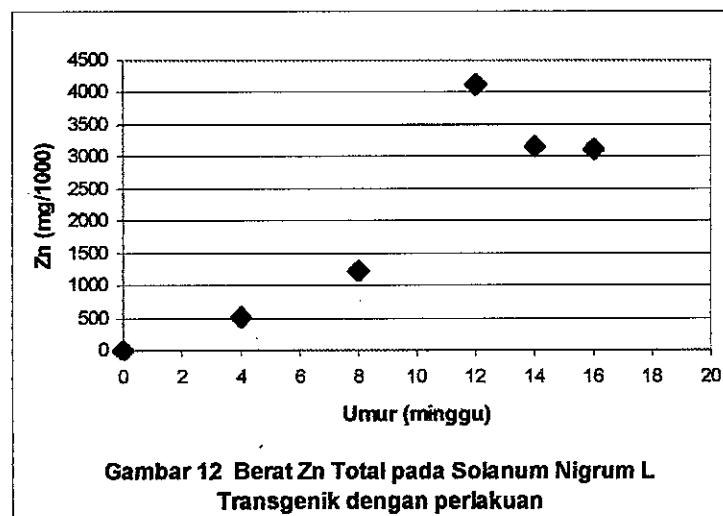
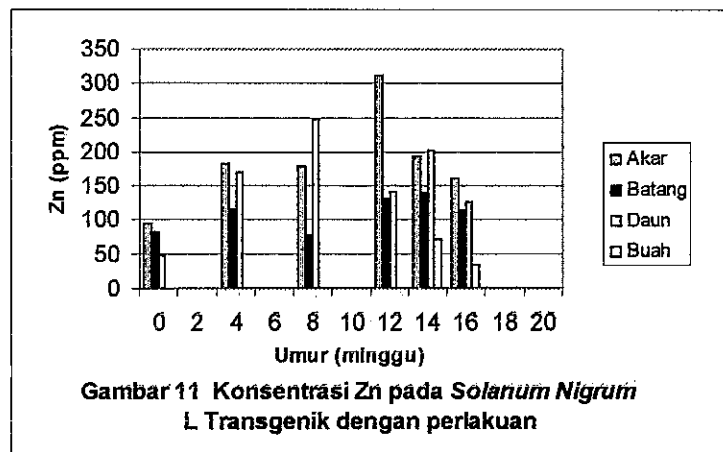
IV.4 Akumulasi Logam Berat Zn Pada *S. nigrum* L

Besarnya akumulasi logam berat Zn pada tanaman *S. nigrum* didapatkan dengan mengalikan besarnya konsentrasi logam berat Zn dengan berat biomassa kering untuk tiap bagian tanaman tersebut. Akumulasi tersebut dipengaruhi banyak faktor, antara lain karakteristik fisika-kimia media pertumbuhan yang digunakan yang meliputi pH, kapasitas tukar ion, kejenuhan basa, persaingan kation dan lain-lain sebagaimana diuraikan sebelumnya.

IV.4.1 Tanaman Transgenik Dengan perlakuan

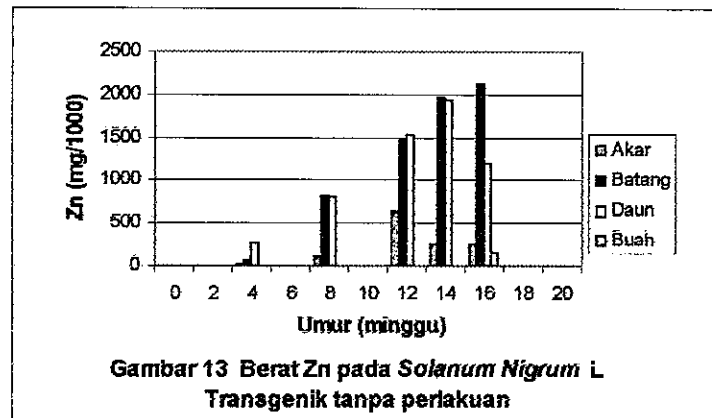


Dari Gambar 10 di atas terlihat bahwa akumulasi logam berat Zn terbesar pada batang mencapai 2610 μg . Kemampuan tanaman *S. nigrum* L dalam menyerap logam berat Zn optimum pada batang dicapai pada minggu ke 12. Namun kalau dilihat dari besarnya konsentrasi logam berat Zn seperti terlihat pada Gambar 11, maka konsentrasi tertinggi yaitu sebesar 311 ppm dicapai oleh akar pada umur tanaman 12 minggu. Sesuai dengan pergerakan waktu, kemampuan tanaman tersebut untuk menyerap Zn akan naik kemudian menurun sampai akhir daur hidup tanaman tersebut. Akumulasi logam berat optimum yang mampu dijerap oleh tanaman transgenik dengan perlakuan dicapai pada minggu ke 12 yaitu sebesar 4120,5 μg .

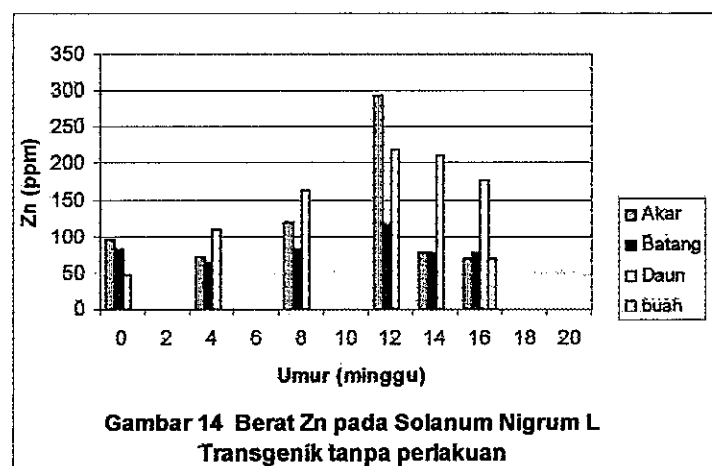


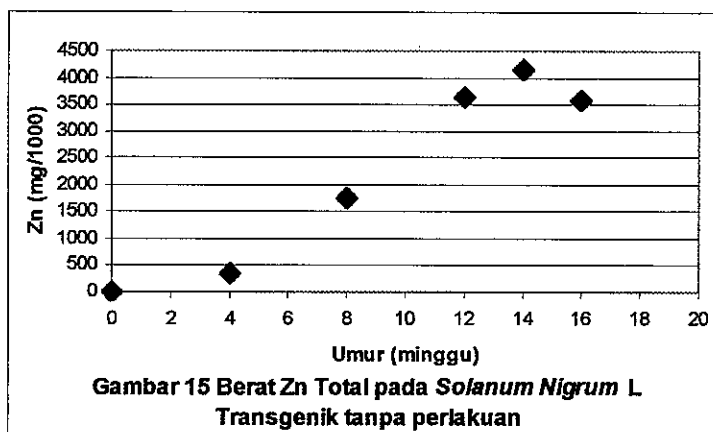
Dari Gambar 12 di atas terlihat bahwa semakin bertambahnya umur tanaman kemampuan menyerap logam berat akan naik sampai dengan minggu ke 12 – 14, kemudian akan menurun sampai berakhirnya daur hidup tanaman tersebut.

IV.4.2 Tanaman Transgenik Tanpa Perlakuan



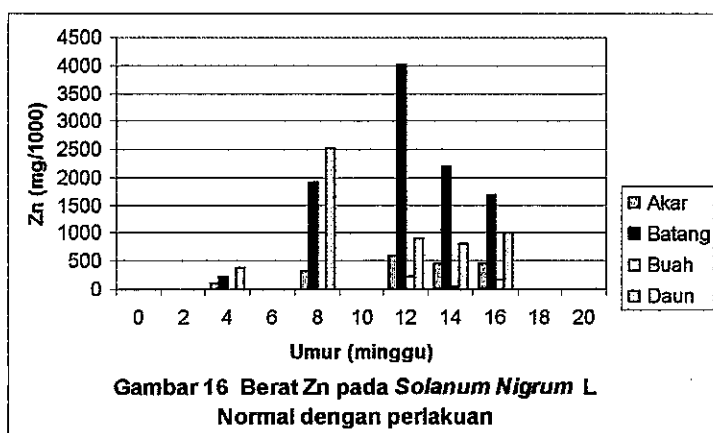
Dari Gambar 13 di atas terlihat bahwa akumulasi logam berat Zn terbesar pada batang mencapai 1198 μg . Kemampuan tanaman *S. nigrum L.* dalam menyerap logam berat Zn optimum pada batang dicapai pada minggu ke 16 pengamatan. Namun kalau dilihat dari besarnya konsentrasi logam berat Zn sebagaimana terlihat pada Gambar 14, maka konsentrasi tertinggi yaitu sebesar 292 ppm dicapai oleh akar pada minggu ke 12. Akumulasi logam berat optimum yang mampu dijerap oleh tanaman transgenik tanpa perlakuan dicapai pada minggu ke 14 yaitu sebesar 4147,4 μg .





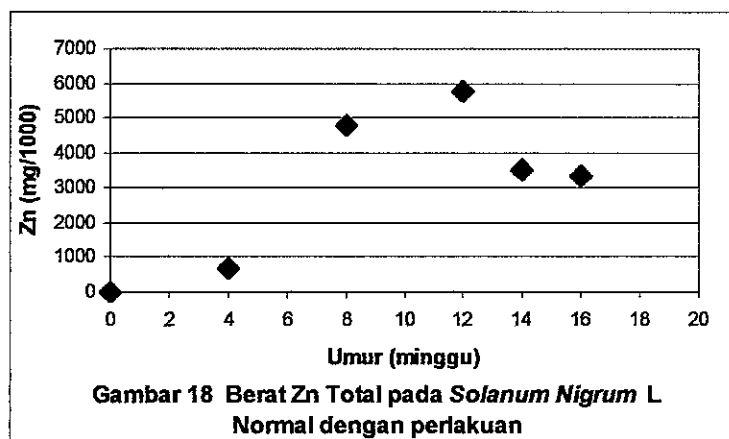
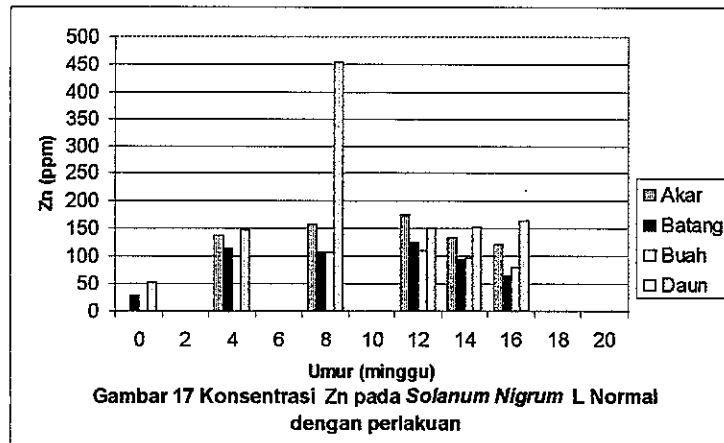
Dari Gambar 15 terlihat bahwa semakin bertambahnya umur tanaman kemampuan menyerap logam berat Zn akan naik sampai sekitar minggu ke 14, dan akan menurun sampai akhir daur hidupnya.

IV.4.3 Tanaman Normal Dengan Perlakuan



Dari Gambar 16 di atas terlihat bahwa akumulasi logam berat Zn terbesar pada batang mencapai 4013 μg . Kemampuan tanaman *S. nigrum L* dalam menyerap logam berat Zn optimum pada batang dicapai pada minggu ke 12. Namun kalau dilihat dari besarnya konsentrasi logam berat Zn sebagaimana terlihat pada Gambar 17, maka konsentrasi tertinggi yaitu sebesar 454 ppm dicapai oleh daun pada minggu ke 8. Sesuai dengan pergerakan waktu, kemampuan tanaman tersebut untuk menyerap Zn akan naik kemudian menurun. Akumulasi logam berat optimum yang mampu dijerap oleh tanaman normal tanpa perlakuan dicapai pada minggu ke 12 yaitu sebesar 5752 μg .

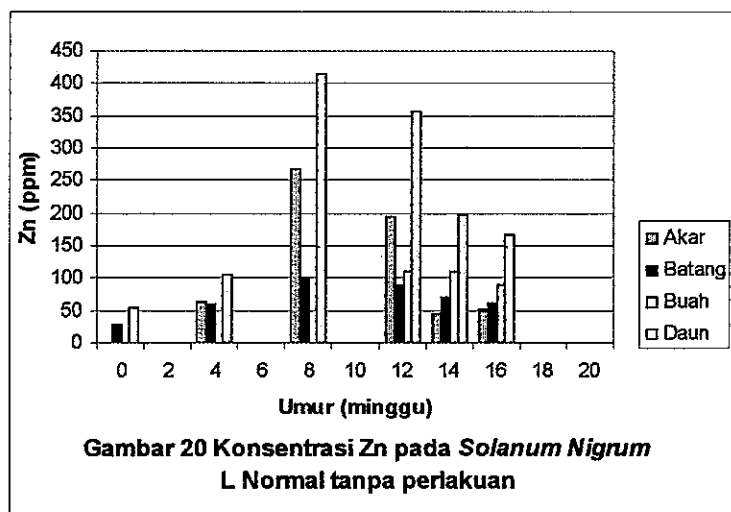
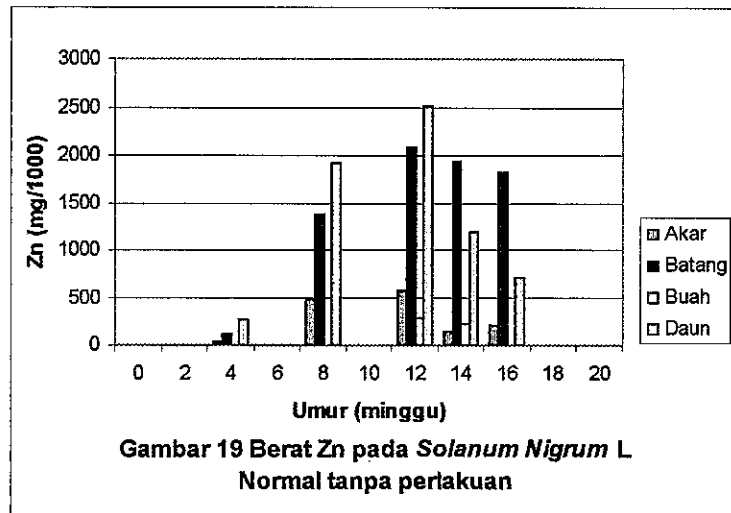
Dari Gambar 18 di bawah terlihat bahwa semakin bertambahnya umur tanaman, maka kemampuan menyerap logam berat Zn akan naik sampai sekitar minggu ke 12, kemudian akan menurun sampai akhir daur hidup tanaman tersebut.

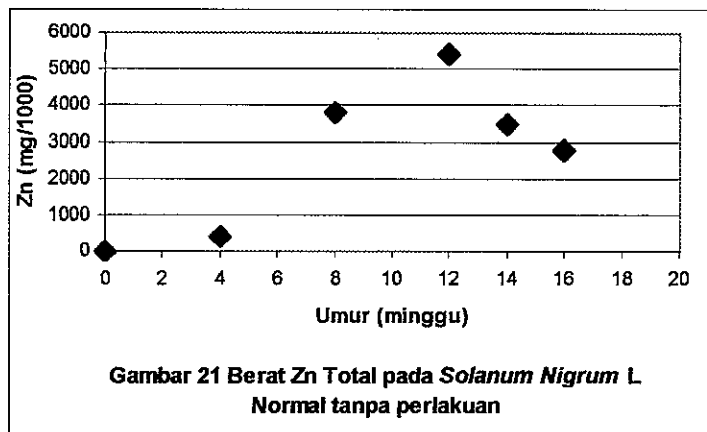


IV.4.4 Tanaman Normal Tanpa Perlakuan

Dari Gambar 19 terlihat bahwa akumulasi logam berat Zn terbesar pada batang mencapai 2502 μg . Kemampuan tanaman *S. nigrum L* dalam menyerap logam berat Zn maksimal pada batang dicapai pada minggu ke 12. Namun kalau dilihat dari besarnya konsentrasi logam berat Zn sebagaimana terlihat pada Gambar 20 maka konsentrasi tertinggi yaitu sebesar 415 ppm dicapai oleh daun pada minggu ke 8. Sesuai dengan berjalannya waktu, semakin bertambahnya umur tanaman maka kemampuan menyerap Zn naik, kemudian semakin berkurang, hal ini terlihat untuk setiap bagian tanaman yang meliputi akar, batang, buah dan daun. Akumulasi logam berat optimum yang mampu

dijerap oleh tanaman transgenik dengan perlakuan dicapai pada minggu ke 12 yaitu sebesar 5437,8 μg .





IV.4.5 Uji Beda Kemampuan Tananam *S. nigrum L.* Transgenik dan Normal dalam mengumulasi logam berat Zn

Tabel 4.
Akumulasi Zn pada kondisi optimum daur hidup tanaman *S. nigrum L.*

<i>S. nigrum L.</i>	Tanpa perlakuan (μg)	Dengan perlakuan (μg)
Normal	5437,8	5752
Transgenik	4147,4	4120,5

Dari Tabel 4 di atas terlihat bahwa logam berat Zn yang mampu diakumulasi oleh tanaman *S. nigrum L.* normal relatif lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman transgeniknya.

Sedangkan apabila dilakukan uji beda secara statistik menggunakan uji t dengan $n_1 = 6$, $n_2 = 6$ dan $\alpha = 0,05$ didapatkan hasil sebagai berikut :

Ho : Tanaman *S. nigrum L.* transgenik mempunyai kemampuan dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat Zn sama dengan kemampuan tanaman normalnya.

Ha : Tanaman *S. nigrum L.* transgenik mempunyai kemampuan dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat Zn lebih tinggi dibandingkan kemampuan tanaman normalnya.

Karena uji statistik t hitung = - 0,438467 lebih kecil dari t tabel = 1,812, maka uji jatuh pada daerah penerimaan, maka disimpulkan Ho diterima Ha ditolak, dengan kata lain hipotesis bahwa Tanaman transgenik *S. nigrum L.* mempunyai kemampuan dalam menyerap dan mengakumulasi Zn pada konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan yang dapat diserap oleh tanaman normalnya tidak terbukti.

IV.5. Translokasi

Translokasi adalah gambaran distribusi dari akumulasi logam berat Zn yang ada pada tiap bagian tanaman *S. nigrum* yang meliputi akar, batang, buah dan daun. Banyak faktor mempengaruhi terhadap fenomena translokasi tersebut sebagaimana telah diuraikan pada karakteristik fisika-kimia media dan parameter *confounding* sebelumnya.

IV.5.1 Tanaman Transgenik Dengan Perlakuan

Gambaran distribusi logam berat Zn pada tanaman *S. nigrum* L transgenik dengan perlakuan, baik konsentrasi maupun akumulasinya, ditampilkan pada Tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5
Translokasi Zn optimum pada Tanaman Transgenik Dengan Perlakuan

	Bagian Tanaman							
	Akar		Batang		Buah		Daun	
	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai
Zn (ppm)	40	77	23	76,67	4	0	33	211,33
Biomassa (g)	8	3,35	68	25,59	1	5,15	23	9,16
Zn (μ g)	12	250,5	60	1961,8	1	0	28	1935,1

Dari Tabel 5 di atas terlihat bahwa translokasi terbesar berat akumulasi logam berat Zn adalah pada batang yang mencapai 60% atau 1961,8 μ g, translokasi terkecil pada bagian buah yang hanya mencapai sekitar 1%. Sedangkan menurut besarnya konsentrasi logam berat Zn, dicapai oleh bagian akar sebesar 40% atau akumulasi konsentrasi sebesar 77 ppm, translokasi terkecil pada bagian buah sebesar 4%, sedangkan akumulasi biomasa terbesar dicapai oleh batang, sekitar 68 % atau 25,59 g, terkecil pada buah sekitar 1% atau 5,15 g.

Kondisi optimum tanaman *S. nigrum* L transgenik dalam menjerap optimum Zn sebagaimana tergambar pada Tabel 5 di atas dicapai pada minggu ke-12, sehingga apabila tanaman tersebut diaplikasikan pada tanah yang tercemar Zn sebaiknya dipanen pada kondisi tersebut atau pada minggu ke-12.

Menurut Subroto (2001), tanaman transgenik mempunyai jumlah biomasa akar yang lebih banyak dibandingkan dengan tanaman normalnya sehingga diharapkan akumulasi logam Zn terbanyak pada akar, namun pada penelitian ini didapatkan bahwa jumlah biomasa akar tanaman transgenik relatif lebih sedikit bila dibandingkan dengan jumlah biomasa akar tanaman normal, hal ini kemungkinan besar disebabkan karena logam yang di akar tidak mampu diangkut ke bagian tanaman yang lain dengan baik, keterbatasan

nutrien yang ada pada media pertumbuhan selama daur hidupnya, sehingga pertumbuhan tidak optimum seperti yang diharapkan sehingga biomasa yang diperoleh juga sangat terbatas. Atau terjadinya persaingan di antara kation-kation yang ada pada media sehingga jumlah logam Zn yang terjerap menjadi terbatas, sebagaimana tampak pada Tabel 2 bahwa terdapat logam Fe dan Mn yang cukup tinggi di samping kation-kation mineral lainnya. Hal ini dapat juga disebabkan adanya *chelator* sehingga logam telah membentuk kompleks.

IV.5.2 Tanaman Transgenik Tanpa Perlakuan

Gambaran distribusi dan translokasi logam berat Zn tanaman *S. nigrum* L transgenik tanpa perlakuan, baik konsentrasi maupun akumulasinya, ditampilkan pada Tabel sebagai berikut :

Tabel 6
Translokasi Zn optimum pada Tanaman Transgenik Tanpa Perlakuan

	Bagian Tanaman							
	Akar		Batang		Buah		Daun	
	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai
Zn (ppm)	33	310,67	22	130	3	0	42	142,67
Biomassa (g)	8	2,14	62	20,07	6	0	24	5,93
Zn (μ g)	10	665,33	48	2609,6	1	0	43	845,62

Dari Tabel 6 di atas terlihat bahwa translokasi terbesar berat akumulasi logam berat Zn adalah pada batang yang mencapai 48% atau 2609,6 μ g, karena akumulasi biomasa terbesar dicapai oleh batang, sekitar 62% atau 20,07 g, padahal konsentrasi logam berat Zn terbesar dicapai oleh bagian daun sebesar 42% atau akumulasi konsentrasinya sebesar 142,67 ppm sehingga bagaimanapun akumulasi berat logam Zn sangat tergantung pada jumlah biomasanya.

Translokasi akumulasi berat terkecil pada bagian buah yang hanya mencapai 1%. Konsentrasi paling rendah pada buah sebesar 3% dan biomassa paling rendah pada buah sekitar 6%.

Kondisi optimum tanaman *S. nigrum* L transgenik tanpa perlakuan dalam menjerap optimum Zn sebagaimana tergambar pada Tabel 6 di atas dicapai pada minggu ke-14, sehingga apabila tanaman tersebut diaplikasikan pada tanah yang tercemar Zn sebaiknya dipanen pada kondisi tersebut atau pada minggu ke-14.

IV.5.3 Tanaman Normal Dengan Perlakuan

Translokasi logam berat Zn pada tanaman *S. nigrum* L normal dengan perlakuan, baik konsentrasi maupun akumulasinya, ditampilkan pada Tabel 7 sebagai berikut :

Tabel 7
Translokasi Zn optimum pada Tanaman Normal Dengan Perlakuan

	Bagian Tanaman							
	Akar		Batang		Buah		Daun	
	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai
Zn (ppm)	26	176,67	19	125	1	109,83	41	150,67
Biomassa (g)	9	3,48	70	32,1	3	1,85	18	6,00
Zn (μg)	11	615,57	56	4012,9	3	219,05	31	904,48

Dari Tabel 7 di atas terlihat bahwa konsentrasi terbesar logam berat Zn dicapai oleh bagian daun sebesar 41% atau akumulasi konsentrasinya 150,67 ppm, namun karena akumulasi biomasa terbesar dicapai oleh batang, sekitar 70% atau 32,1 g, maka translokasi terbesar berdasarkan berat akumulasi logam berat Zn adalah pada batang yang mencapai 56% atau 4012,9 μg . Translokasi terkecil pada bagian buah yang hanya mencapai 3%, konsentrasi terkecil pada buah 13% yang relatif jauh lebih besar dibandingkan konsentrasinya pada buah tanaman transgenik dan biomasa terkecil pada buah 3%.

Kondisi optimum tanaman *S. nigrum* L normal dengan perlakuan dalam menjerap optimum Zn sebagaimana tergambar pada Tabel 7 di atas dicapai pada minggu ke-12, sehingga apabila tanaman tersebut diaplikasikan pada tanah yang tercemar Zn sebaiknya dipanen pada kondisi tersebut atau pada minggu ke-12.

IV.5.4 Tanaman Normal Tanpa Perlakuan

Translokasi logam berat Zn pada tanaman *S. nigrum* L normal tanpa perlakuan adalah sebagai berikut :

Tabel 8
Translokasi Zn optimum pada Tanaman Normal Tanpa Perlakuan

	Bagian Tanaman							
	Akar		Batang		Buah		Daun	
	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai	%	Nilai
Zn (ppm)	24	194,67	15	88	12	111	49	357,33
Biomassa (g)	9	2,96	70	23,57	3	2,57	28	7,00
Zn (μg)	9	576,91	46	2074,2	3	285	42	2501,7

Dari Tabel 8 di atas terlihat bahwa konsentrasi terbesar logam berat Zn dicapai oleh bagian daun sebesar 49% atau akumulasi konsentrasi sebesar 357,33 ppm, namun karena akumulasi biomasa terbesar dicapai oleh batang, sekitar 70% atau 23,57.7 g, maka translokasi terbesar berdasarkan berat akumulasi logam berat Zn adalah pada batang yang mencapai 46% atau sebesar 2074,2 μ g. Translokasi terkecil pada bagian buah yang hanya mencapai 3%, konsentrasi terkecil pada buah 12% yang relatif jauh lebih besar dibandingkan konsentrasinya pada buah tanaman transgenik dan biomasa terkecil pada buah 3%.

Kondisi optimum tanaman *S. nigrum* L normal tanpa perlakuan dalam menyerap optimum Zn sebagaimana tergambar pada Tabel 8 di atas dicapai pada minggu ke-12, sehingga apabila tanaman tersebut diaplikasikan pada tanah yang tercemar Zn sebaiknya dipanen pada kondisi tersebut atau pada minggu ke-12.

Secara umum tampak bahwa akumulasi konsentrasi logam Zn yang mampu dijerap oleh tanaman dengan perlakuan, baik transgenik maupun normal lebih tinggi dibanding dengan tanaman tanpa perlakuan, karena dengan perlakuan berarti telah diberikan tambahan logam berat Zn pada media minimal 200 mg/kg media.

Kalau diperhatikan bahwa translokasi konsentrasi logam berat Zn pada tanaman transgenik relatif lebih besar (sekitar 12 – 13%) jika dibandingkan dengan tanaman normalnya (sekitar 3 - 4 %). Konsentrasi terbesar pada tanaman transgenik dengan perlakuan dicapai oleh bagian akar, sedangkan untuk tanaman transgenik tanpa perlakuan dan tanaman normal dengan perlakuan dicapai oleh bagian daun. Dengan uji beda statistik untuk mengetahui distribusi Zn pada bagian tanaman, menggunakan uji t (Lampiran 7) akan terlihat bahwa ada beda nyata antara tanaman *S. nigrum* L transgenik dan tanaman *S. nigrum* L normal.

Pada tanaman transgenik akumulasi konsentrasi logam berat Zn lebih tinggi di akar, kemungkinan akibat terjadinya reaksi kompleks di xylem membentuk kompleks Phytochelation – Zn yang tidak ditranslokasikan. Zn dapat ditranslokasikan oleh chelator lain atau mungkin asam-asam organik (Salt, et al. 1995 dalam Sam 2000).

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

V.1 Simpulan

Dari hasil pembahasan yang telah dilakukan maka penulis mengambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Kinetika pertumbuhan tanaman *S. nigrum* L. baik tanaman normal maupun tanaman transgenik tidak terpengaruh oleh pemaparan Zn lebih dari 200 mg/kg media, sesuai model persamaan Monod tanpa mengalami fase penyesuaian (*lag phase*) dengan laju pertumbuhan rata-rata 0,9 minggu⁻¹.
- b. Dengan bertambahnya umur, kemampuan tanaman *S. nigrum* L dalam menyerap Zn akan naik dan akan optimal pada umur antara 12 sampai dengan 14 minggu, kemudian menurun sampai berakhirnya daur hidupnya. Sehingga pada aplikasinya akan optimal bila dipanen pada umur tersebut.
- c. Kemampuan tanaman transgenik *S. nigrum* L. dalam menyerap dan mengakumulasi logam berat Zn pada konsentrasi yang tidak berbeda dibandingkan dengan yang dapat diserap oleh tanaman normalnya.
- d. Ada beda translokasi logam berat Zn, untuk tanaman *S. nigrum* L transgenik cenderung ke akar sekitar 40 %, sedangkan tanaman normalnya cenderung ke daun atau batang sekitar 42 %.

V.2 Saran

Penelitian ini perlu ditindaklanjuti dengan menggunakan media tanah yang tercemar dengan logam berat Zn secara *in situ* untuk mengetahui efektifitas dari metode fitoremediasi dengan menggunakan tanaman *S. nigrum* L. Parameter-parameter yang perlu untuk diperhatikan dalam aplikasi secara *in situ* antara lain adalah karakteristik fisika-kimia tanah yang tercemar, keberadaan cemaran-cemaran lain selain logam berat Zn (baik logam berat lain maupun cemaran organik), dan kondisi lingkungan lainnya (misalnya suhu dan curah hujan).

DAFTAR PUSTAKA

- Balitbang Pertanian. 1992. Aplikasi Bioteknologi Kultur Jaringan Pada Tanaman Industri. Dalam Prosiding Forum Komunikasi Ilmiah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Puslitbang Tanaman Industri, Bogor.
- Chen, J. P., W. R. Chen dan R. Chi Hsu. 1996. Biosorption of Copper From Aqueous Solution By Plant Root Tissues. *Journal of Fermentation and Bioengineering* 81 (5): 458-463.
- Cox Sam 2000. Mechanisms and Strategis for Phytoremediation of Cadmium. [Http://lamar.colostate.edu/~ samcox/](http://lamar.colostate.edu/~samcox/). Department of Horticulture Colorado State, University, Colorado.
- Eltayeb, E.A., Al-Ansari, A.S. dan Roddick, J.G. 1997. Change in the steroidal alkaloid solasodine during development of *Solanum nigrum* dan *Solanum incanum*. *Phytochemistry* 46 (32): 489-494.
- Grichko, V.P., B. Filby dan B.R. Glick. 2000. Increased ability of transgenic plants expressing the bacterial enzyme ACC deaminase to accumulate Cd, Co, Cu, Ni, Pb, and Zn. *Journal of Biotechnology* 81: 45-53.
- Lancaster, J.E. dan Mann, J.D. 1975. Change in solasodine content during the development of *Solanum laciniatum* Ait. *N.Z. J. Agric. Res.* 18: 139-144.
- Macek, T., P. Kotrba, M. Suchova, F. Skacel, K. Demnerova dan T. Rumi. 1994. Accumulation of Cadmium By Hairy Root Cultures of *Solanum nigrum*. *Biotechnology Letters* 16 (6): 621-624.
- Machbub, B., Mulyadi, M. 2000. Kualitas Air Sungai Alamiah Sebagai Standar Kualitas Sumber Air. *Buletin PUSAIR* no. 34 Tahun IX, April 2000: 31-38.
- Mackova, M., T. Macek, P. Kucerova, J. Burkhard, K. Demnerova, dan J. Pazlarova. 1997. Degradation of Polychlorinated Biphenyls By Hairy roots Culture of *Solanum nigrum*. *Biotechnology Letters* 19 (8): 787-790.
- Mason, C. F. 1981. *Biology of Fresh Water Pollution*, Longman, London and New York, 100- 104 pp.
- Mathe-Gaspar, G dan Asnton A, 2002, Heavy metal uptake by two radish varieties, *Proceeding of the 7th hungarian Congress on Plant Physiology* volume 46(3-4):113-114, 2002.

- Mejare, M. dan L. Bulow. 2001. Metal-binding proteins and peptides in bioremediation and phytoremediation of heavy metals. *Trends in Biotechnology* 19 (2): 67-73.
- Metzger, L., L. Fouchault, C. Glad, R. Prost dan D. Tepfer. 1992. Estimation of Cadmium Availability Using Transformed Roots. *Plant and Soil* 143 : 249-257.
- Miller, R. K. 1996. Ground-Water Remediation Technology Analysis Center. Technology Overview Report. TO-96-03.
- Nedelkoska, T. V. dan P. M. Doran. 1999. Hyperaccumulation of Cadmium By Hairy Roots of *Thlaspi cerulescens*. *Biotechnology and Bioengineering* 67 (5) : 607-615.
- Ornes, W. H. dan K. S. Sajwan. 1992. Cadmium Accumulation and Bioavailability In Coontail *Ceratophyllum demersum L.* *Plants, Water, Air and Soil Pollution* 69 : 291-300.
- Palar, H. 1994. Pencemaran dan Toksikologi Logam berat, Rineka Cipta, Jakarta Hal. 43-131.
- Pogrzeba, M., Kuccharski, R., Saa-Nowosielska A., Malkowski, E., Krynski, K., Kuperberg, Heavy metal removal from municipal sewage sludges by phytoextraction, Institute for Ecology of industrial areas, 6 kossutha Str.40-832 Katowice, PL
- Priambodo, S. 2002. Fitoremediasi Logam Berat Menggunakan Kultur Akar Rambut *Solanum nigrum L.* Skripsi Sarjana Teknologi Pertanian, Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor. 68 hal.
- Rossi, G., Figliolia, A., Socciarelli, S., Pennelli, B., Capability of *Brassica napus* to Accumulate Cadmium, Zinc and Copper from Soil, *Acta Biotechnol.* 22(2002)1-2, 133-140.
- Schnoor, J. L. 1997. Phytoremediation. Technology Evaluation Report. TE-9801.
- Subroto, M. A. 1996. Fitoremediasi. Dalam: Prosiding Pelatihan dan Lokakarya Peranan Bioremediasi Dalam Pengelolaan Lingkungan, Cibinong, 24-25 Juni 1996.
- Subroto, M.A., N. Artanti, D. Sudrajat, A. Djanakum dan E. Widayat. 2001. *Agrobacterium rhizogenes*-mediated transformation of *Solanum nigrum L.*: spontaneous plant regeneration and endogenous IAA contents. *Indonesian Journal of Agricultural Sciences* 1: 53-59.
- Subroto, M. A. dan T. M. Ermayanti. 1998. Praktek Kultur Jaringan Taanaman dan Alternatif Penerapannya di SMU. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Bandung. 35 hal.

- Subroto, M. A., J. D. Hamill dan P. M. Doran. 1996. Development of Shooty Teratomas From Several Solanaceous Plants: Growth Kinetics, Stoichiometry and Alkaloid Production. *Journal of Biotechnology* 45 (1): 45-57.
- Sudarso, Y. 1997. Toksisitas Beberapa Senyawa Logam Berat Terhadap Siput *Hydrobia sp.* *Limnotek* Vol. V, No. 1 Tahun 1997, Hal 75-79.
- Sumarno, 2004, Bioreaktor, Materi kuliah, Program magister Ilmu Lingkungan Undip Semarang.
- Tan Kin H, 1982 Principles of soil chemistry, The University of Georgia, College of agriculture, Athens, Georgia
- Wahyuni, T. dan M.A. Subroto. 2001. Biodegradation of diazinon by hairy root culture of *Solanum nigrum*. In: Proceedings of the 2nd Indonesian Biotechnology Conference, Yogyakarta, Indonesia, 24-26 Oktober 2001.
- Wettler, L. R. dan F. Constabel. 1991. Metode Kultur Jaringan Tanaman. ITB Bandung.