



## Kajian Cemaran Timbal (Pb) pada Proses Produksi Gula

### *Study of Lead Contamination on Processing of Sugar Production*

Simping Yuliatun)<sup>1)</sup>, Triantarti)<sup>1)</sup>, Linda Mustikaningrum)<sup>1)</sup>, Retno Widowati)<sup>2)</sup>, Opal Priya Wening)<sup>1)</sup>,  
Risvan Kuswurtanto)<sup>1)</sup>

1) Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia, Pasuruan

2) PT Sinergi Gula Nusantara, Jakarta

Alamat korespondensi, Email: [simping7@gmail.com](mailto:simping7@gmail.com)

### ABSTRAK

Adanya cemaran logam berat pada produk pangan berdampak buruk terhadap kesehatan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi terkait perpindahan logam Pb dari setiap tahapan proses pengolahan gula kristal putih. Sampel diambil dari 4 wilayah kerja pabrik gula yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro. Tanah dan tanaman tebu diambil sampel secara tertelusur dari lokasi yang telah ditandai. Bahan alur proses dari pabrik gula berupa nira perahan pertama (NPP), nira mentah (NM), nira jernih (NJ), nira kental (NK), gula, ampas tebu, blotong dan tetes. Kandungan Pb dianalisis dengan spektrofotometer serapan atom. Faktor transfer ditentukan dengan membandingkan tingkat konsentrasi Pb dalam nira dengan tanah. Hasil penelitian menunjukkan adanya logam berat Pb dari tanah dapat terserap kedalam tanaman tebu. Nilai *transfer factor* logam Pb dari tanah ke nira tebu dari empat wilayah kerja pabrik gula berkisar antara 0,00-1,84. Kandungan Pb di tanah berkisar antara 1,53-10,38 mg/kg. Kandungan Pb dalam nira tebu berkisar antara <0,11–13,07 mg/kg. Rerata kandungan Pb dari NPP menjadi NJ relatif konstan jumlahnya dan terjadi peningkatan pada NK akibat pemekatan. Proses yang terjadi pada empat pabrik gula yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro dapat menekan kandungan cemaran logam Pb pada produk gula hingga <0,075 mg/kg.

Kata kunci: logam berat, Pb, tanah, tanaman tebu, nira tebu, gula kristal putih

### ABSTRACT

*The presence of heavy metals contamination in food products has negative impact on health. This study aims to obtain information related to the transfer of Pb metal from each stage of cane sugar processing. Samples were taken from 4 sugar factory work areas, namely PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru and PG Semboro. Soils and sugarcane plants were sampled traceably from the marked locations. The process flow materials from the sugar factories are in the form of first expressed juice (NPP), raw juice (NM), clear juice (NJ), thick juice (NK), sugar, bagasse, filter cake and molasses. The Pb content was analyzed with an atomic absorption spectrophotometer. The transfer factor is determined by comparing the level of Pb concentration in sugarcane juice with the soils. The results showed that the presence heavy metal Pb can be absorbed from soil into sugarcane plants. The value of transfer factor of the Pb metal from soils to sugarcane juice ranges from 0.00-1.84 for the four working areas of sugar factories. The Pb content in the soils range from 1.53 – 10.38 mg/kg. The Pb content in sugarcane juices range from 1.53-13.07 mg/kg. The average Pb content from NPP to NJ is relatively constant and there increase in NK due to thickening. The process that occurred at four sugarcane factories, namely PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru and*

*PG Semboro, cane reduce the content of Pb metals contamination in sugar products up to < 0.075 mg/kg.*

*Key words: heavy metal, lead, soils, sugarcane plant, sugarcane juice, plantation white sugar*

## PENDAHULUAN

Gula kristal putih (GKP) adalah gula konsumsi langsung untuk masyarakat di Indonesia. Kebutuhan gula konsumsi rumah tangga ini diperkirakan jumlahnya mencapai 2.860.667 ton pada tahun 2024 (Ditjenbun, 2025). Gula kristal putih ini diproduksi oleh pabrik gula dengan bahan baku berupa tebu. Gula sebagai produk pangan harus mendapat perhatian khusus mengenai keamanan pangan. Masalah keamanan pangan merupakan masalah terkait kesehatan masyarakat di seluruh dunia. Resiko kesehatan manusia terhadap paparan logam berat dari produk makanan telah menjadi perhatian serius saat ini (Mekasa *et al.*, 2024).

Keberadaan logam berat di tanah menjadi perhatian dalam produksi pertanian karena berdampak buruk terhadap keamanan pangan, daya jual, dan pertumbuhan tanaman akibat fitotoksisitas, dan kesehatan lingkungan organisme tanah (Asati *et al.*, 2016). Tanaman tebu dan produk gulanya dapat tercemar oleh logam toksik melalui air irigasi, lahan pertanian, bermacam-macam pupuk dan pestisida yang digunakan untuk budidayanya. Residu kimia pada tahapan proses dalam pengolahan tebu seperti pada proses ekstraksi, pemurnian nira dengan penambahan susu kapur, poli-elektrolit flokulan dan karbon dioksida memungkinkan terjadinya kontaminasi dengan logam berat berbahaya (Mekasa *et al.*, 2024). Bermacam-macam komponen mesin dan peralatan logam yang digunakan untuk proses pengolahan gula juga

memungkinkan mengkontaminasi produk gula. Hal ini menyebabkan produk gula kristal dapat terkontaminasi oleh unsur-unsur logam berat.

Logam berat dapat mencemari produk gula kristal putih melalui 2 hal yaitu sumber geogenik alami dan sumber antropogenik (Angon *et al.*, 2024). Sumber geogenik alami adalah kondisi mineral lahan dimana tanaman tebu dibudidayakan. Sumber antropogenik berasal dari perilaku manusia seperti praktik dalam budidaya tebu seperti penggunaan air irigasi dari sungai, penggunaan pupuk dan pestisida, proses pengolahan tebu, proses pengepakan, dan transportasi.

Timbal (Pb) adalah logam lunak, padat dan ulet. Timbal termasuk salah satu logam berat dengan toksisitas tinggi. Toksisitas Pb telah menjadi perhatian banyak pihak terutama di bidang kesehatan. Logam Pb dapat ditemukan di tanah, air maupun udara (Angon *et al.*, 2024). Peningkatan beberapa kegiatan industri terkait logam Pb dan penggunaan produk yang mengandung Pb seperti bahan kimia pertanian (pupuk kimia dan pestisida), baterai, minyak dan cat, pertambangan, bahan bakar minyak bumi dapat menyebabkan kontaminasi Pb pada lingkungan. Hal ini dapat mengakibatkan Pb memasuki rantai makanan.

Kadar timbal (Pb) dalam tanah dilaporkan sebesar 0,23 -12,90 mg/kg pada tanah bagian atas (*topsoil*) dan yang sebesar 0,01-1,30 mg/kg pada bawah tanah (*subsoil*) dimana tanah tersebut diairi dengan sumber irigasi sungai yang tercemar limbah industri kertas di Attarakhan, India

(Pandey *et al.*, 2016). Wang *et al.* (2018) melaporkan bahwa cemaran logam Pb di lahan tebu di China mencapai 151,57 mg/kg. Penggunaan pupuk kimia dalam meningkatkan kesuburan tanah, namun dapat menyebabkan akumulasi logam Pb di tanah sebesar 51.0 mg/kg (Bridhikitti *et al.*, 2023). Kondisi tersebut mengakibatkan adanya kadar Pb pada tebu sebesar 0,01-1,11 mg/kg dengan rata-rata kadar Pb sebesar 0,37 mg/kg.

Kandungan Pb pada batang tebu berkisar 0,122 – 4,32 mg/kg (Alvicar 2024). Penyerapan cemaran logam berat pada tebu yang ditanam di lahan yang dialiri limbah kota dan limbah medis telah dilaporkan oleh Munos *et al.* (2006) menyebutkan adanya logam berat Pb di dalam akar tanaman tebu sebesar  $7,9 \pm 2,1$  mg/kg, dan di batang tebu sebesar  $6,71 \pm 2,4$  mg/kg. Jumlah kandungan Pb di batang tebu berkisar 80-90% terhadap jumlah di akar tebu (Munoz *et al.*, 2006). Penelitian di Nigeria juga menunjukkan adanya cemaran Pb pada nira tebu sebesar 0,033 mg/L, yang mana tebu ini ditanam pada daerah beririgasi dan ditemukan adanya logam Pb dalam tanah topsoil dan air irigasi berturut-turut sebesar  $<0,010$  mg/kg dan  $<0,010$  mg/L (Adekola & Akinpelu, 2001).

Adanya cemaran logam berat pada tanaman akan berdampak pada produk pangan yang dihasilkan. Batasan cemaran Pb pada makanan telah dituangkan aturan di tingkat internasional, regional maupun nasional. Codex Alimentarius Commission (2022) mensyaratkan kandungan cemaran logam timbal (Pb) pada gula maksimal 0,1 mg/kg. Persyaratan kadar cemaran maksimal Pb untuk produk gula kristal putih dan rafinasi telah disetujui oleh negara Amerika Serikat dan Kanada. Sedangkan negara Turki mengusulkan ke

CODEX untuk produknya berupa gula putih, gula rafinasi, gula coklat dan gula mentah sebesar 0,2 mg/kg. Standar gula kristal putih (GKP) untuk cemaran Pb di Afrika Timur diusulkan maksimal 0,5 mg/kg.

Peraturan badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) nomor 9 tahun 2022 tentang persyaratan cemaran logam berat dalam pangan olahan menyebutkan bahwa kadar maksimal cemaran Pb pada produk gula kristal putih sebesar 2 mg/kg (BPOM, 2022). Syarat mutu gula kristal putih dalam standar Nasional Indonesia (SNI) untuk cemaran logam Pb maksimal 2 mg/kg (SNI, 2020). Industri gula harus mempersiapkan diri apabila batas maksimal cemaran Pb dalam produk gula Kristal putih dari 2,0 mg/kg menjadi 0,1 mg/kg mengikuti standar CODEX agar menghasilkan produk yang aman bagi kesehatan masyarakat. Tujuan penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara komprehensif kemungkinan adanya sumber-sumber cemaran Pb pada proses produksi gula.

## METODE

### Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juni-November 2024. Lokasi pengambilan sampel pada penelitian ini di 4 pabrik gula (PG) di lingkup PT Sinergi Gula Nusantara (SGN) yaitu PG Glenmore di Kabupaten Banyuwangi, PG Bungamayang di Lampung Utara, PG Pesantren Baru di Kediri dan PG Semboro di Kabupaten Jember. Lokasi analisis dilakukan di Laboratorium Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI) dan di Unit Laboratorium Terpadu, Institut Pertanian Bogor (IPB).

## Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel tanah, sampel tebu, nira tebu, nira perahan pertama (NPP), nira kental, gula kristal putih, ampas tebu, blotong dan tetes tebu. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis adalah asam sulfat, asam nitrat, larutan standar Pb 1000 mg/L, hidrogen peroksida, asam klorida, magnesium nitrat.

Alat utama yang digunakan adalah *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (Flame AAS) Shimadzu 7800 dan *Graphite Furnace* Shimadzu 7800 dilengkapi dengan hollow cathode lamp. Peralatan lainnya seperti erlenmeyer, tabung gelas untuk sampel, pipet, labu ukur, pengaduk, timbangan, alat untuk sampling tanah,

kamera, kantong plastik untuk sampel, penangas air.

## Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan di 4 pabrik gula (PG) di lingkup PT Sinergi Gula Nusantara (SGN) yaitu PG Glenmore di Kabupaten Banyuwangi, PG Bungamayang di Lampung Utara, PG Pesantren Baru di Kediri dan PG Semboro di Kabupaten Jember. Sampel yang diambil terdiri dari sampel tanah yang diambil di kebun tebu, dan sampel yang diambil dalam bahan alur proses di pabrik gula. Lokasi pengambilan sampel tanah dari 4 pabrik gula masing-masing dilakukan pada 5 kebun ditampilkan pada Tabel 1. Pengambilan sampel tanah dan sampel tanaman tebu secara inheren.

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel tanah untuk pengujian cemaran logam timbal  
*Table 1. Location of soils sampling for determining lead metal contamination*

No.	Nama Pabrik Gula <i>Name of Sugar Factory</i>	Lokasi sampling tanah <i>Location for soils sampling</i>
1	PG Glenmore	8,26725 °S – 8,351765 °S 113,98942 °T – 114,0916 °T
2	PG Bungamayang	4,473810 °S – 4,684460 °S 104,816206 °T – 104,97038 °T
3	PG Pesantren Baru	7,789107 °S – 7,945967 °S 112,023761 °T – 112,231125 °T
4	PG Semboro	8,204486 °S – 8,266340 °S 113,346350 °T – 113,470431 °T

## Pengambilan Sampel untuk Evaluasi Sumber Cemaran Pb yang berasal dari Lahan Tebu

Evaluasi sumber cemaran Pb yang berasal dari lahan tebu pada dasarnya mengkorelasikan antara kandungan Pb di tanah dengan kandungan Pb dalam nira tebu. Sampel tanah diambil dari lahan tebu dengan kedalaman 0-35 cm dari permukaan. Kandungan Pb dalam nira tebu

ditunjukkan dari kadar Pb dalam Nira Perahan Pertama (NPP). Pengambilan sampel NPP dalam penelitian ini dilakukan pada alur proses pabrik gula (PG) maupun beberapa sampel NPP / nira *press* dari *core sampler* atau gilingan contoh.

Ketika dilakukan *sampling* pada bahan alur proses, data asal tebu yang digiling pada saat pengambilan sampel tersebut dikumpulkan. Selanjutnya pengambilan sampel tanah dilakukan secara

*representatif* dari kebun-kebun tebu yang tebunya digiling pada saat itu. Untuk dapat lebih spesifik menghubungkan kandungan Pb di tanah dengan kandungan Pb di NPP, diambil beberapa sampel NPP/ nira *hidrolik press* dari *core sampler* kemudian ditelusur asal kebun tebunya untuk dilakukan pengambilan sampel tanah.

### **Pengambilan Sampel untuk Evaluasi Sumber Cemaran Pb pada Proses Produksi Gula**

Sampel yang diambil untuk evaluasi sumber cemaran Pb dalam alur proses pabrik gula adalah Nira Perahan Pertama (NPP), Nira Mentah (NM), Nira Jernih (NJ), Nira Kental (NK), produk Gula Kristal Putih (GKP), serta produk samping proses PG yaitu ampas tebu, blotong dan tetes. Pengambilan sampel bahan alur proses dilakukan selama 12 jam per hari. Pengambilan sampel NPP dan NM dilakukan setiap satu jam. Pengambilan sampel NJ, NK, ampas tebu, blotong dan tetes dilakukan setiap 2 jam. Sampel GKP diambil setiap gula turun dari masakan, sebelum proses pengepakan. Untuk setiap jenis sampel dikomposit dan dijadikan satu set sampel.

### **Analisis Sampel**

Metode yang digunakan dalam penentuan kandungan Pb dari sampel yang diambil, bervariasi tergantung dari jenis sampelnya.

### **Analisis Kandungan Pb dalam Sampel Tanah dan Blotong**

Untuk analisis kandungan Pb dalam sampel tanah dan blotong digunakan Metode US EPA 2007 Method 7000B.

### **Analisis Kandungan Pb dalam Sampel Nira dan Gula**

Analisis kandungan Pb dalam sampel nira dan gula digunakan kombinasi dua metode. Destruksi sampel nira dan gula pada prinsipnya menggunakan Metode ICUMSA GS2/3-23 (1994). Untuk destruksi sampel Nira Perahan Pertama, Nira Mentah dan Nira Jernih dilakukan sedikit modifikasi dari metode acuan yaitu penimbangan sampel dilakukan dua kali dari metode standar kemudian dilakukan pemekatan di atas penangas air pada suhu 90-95°C sampai kepekatan maksimal. Untuk sampel Nira Kental penimbangan sama dengan metode standar dan tetap dilakukan pemekatan. Hasil destruksi sampel nira dilakukan analisis dengan *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (Flame AAS) Shimadzu 7800.

Kandungan Pb hasil destruksi sampel gula dianalisis dengan Metode ICUMSA GS2-24 (1998) yang dikombinasikan dengan metode standar dari *Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry* (GF AAS) Shimadzu 7800. Prinsip analisis Pb dalam sampel nira dan gula dilakukan dengan pengabuan basah.

Preparasi sampel dilakukan dengan pengabuan basah menggunakan Prosedur Asam Nitrat-Hidrogen Peroksida. Hasil destruksi dari sampel nira dianalisis dengan *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (Flame AAS). Hasil destruksi dari sampel gula dianalisis menggunakan *Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry* (GF AAS). Magnesium nitrat digunakan sebagai pengubah matriks (*matrix modifier*). Kuantifikasi dengan kalibrasi langsung terhadap *aqueous standard* dicapai dengan menggunakan pengukuran luas puncak yang ditentukan pada panjang gelombang 283,3 nm.

Limit Deteksi (LD) Pb untuk sampel Nira Perahan Pertama, Nira Mentah dan Nira Jernih sebesar 0,11 mg/kg nira, LD untuk sampel Nira Kental sebesar 0,22 mg/kg Nira Kental, LD untuk sampel gula adalah 0,075 mg/kg gula.

### **Analisis Kandungan Pb dalam Tetes dan Ampas Tebu**

Pemilihan metode analisis kandungan Pb dalam tetes berdasarkan riset yang dilakukan oleh Zohri *et al.* (2022), sedangkan analisis kandungan Pb dalam ampas menggunakan dasar metode yang digunakan dalam riset yang dilakukan oleh Xie *et al.* (2014).

Prinsip metode analisis kandungan Pb dalam tetes dan ampas dalam kedua riset tersebut sama yaitu: (1) Sampel dikeringkan dalam oven, kemudian diabukan dalam tanur sampai terabukan sempurna. Abu yang dihasilkan selanjutnya dilarutkan dalam HCl dan diukur kandungan Pbnya dengan *Flame Atomic Absorption*

*Spectrometry (Flame AAS)*; (2) Limit deteksi untuk sampel tetes 0,13 mg/kg tetes dan limit deteksi untuk sampel ampas 0,63 mg/kg ampas.

### **Penentuan Faktor Transfer (*transfer factor*) (Damodharan & Reddy, 2014)**

Faktor transfer (*transfer factor* / TF) adalah parameter yang menggambarkan keberadaan hayati logam spesifik pada tanaman. Hal ini merupakan rasio atau perbandingan konsentrasi logam dalam bagian tanaman dan konsentrasi logam di dalam tanah. Kecenderungan relatif ini menunjukkan kemampuan tanaman untuk mengakumulasi logam berat pada spesies tanaman tertentu. Dengan demikian *factor transfer* tanah ke tanaman akan digunakan untuk mengevaluasi efisiensi tanaman dalam mengabsorpsi logam berat dari tanah. Faktor transfer diperoleh dari pembagian banyaknya unsur di tanaman dengan banyaknya unsur di tanah. TF dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\text{Transfer factor (TF)} = \frac{\text{Konsentrasi logam di ekstrak nira}}{\text{Konsentrasi logam di ekstrak tanah}}$$

### **Analisis Data**

Analisis data dilakukan secara statistik dari kumpulan data yang telah diperoleh untuk memperoleh gambaran rata-rata dari keseluruhan sampel yang diuji.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Korelasi antara Kandungan Logam Pb dalam Nira dengan Lokasi Lahan Tebu pada Wilayah Kerja PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro**

Kandungan Pb pada tanah, di nira yang mana sampel tebu diambil di lokasi tersebut untuk 4 wilayah kerja pabrik gula dan nilai *transfer factor* ditunjukkan pada Tabel 2. Kandungan Pb dalam tanah pada 4 wilayah kerja pabrik gula bervariasi antara 1,51 mg/kg hingga 10,38 mg/kg. Paling rendah kandungan Pb dalam tanah berada pada wilayah kerja PG Pesantren baru yaitu kurang dari 0,11 mg/kg. Kebun Afdeling 6 Petak 3142B Rayon 2 memiliki kandungan Pb dalam tanah paling tinggi yaitu 10,38 mg/kg. Namun demikian wilayah kerja PG Semboro secara umum memiliki lahan dengan kandungan Pb paling tinggi yaitu

antara 3,70 – 7,78 mg/kg dengan rata-rata 6,67 mg/kg. Wilayah kerja PG Glenmore memiliki lahan dengan kandungan Pb berkisar antara 3,42 – 9,45 mg/kg atau nomor dua setelah PG Semboro. Wilayah kerja PG Bungamayang secara rata-rata memiliki kandungan Pb dalam tanah yang sedang, namun ada satu petak lahan yang menunjukkan nilai paling tinggi yaitu 10,38 mg/kg.

Perbedaan kandungan Pb dalam tanah dapat disebabkan oleh 2 hal yaitu faktor geogenik dan faktor antropogenik

(Shetty *et al.*, 2025). Faktor geogenik berasal dari sifat alami mineral batuan dan tanah pada lokasi tersebut. Mineral tanah yang banyak mengandung logam berat terjadi akibat pelapukan batuan oleh cuaca dan juga akibat limpasan air hujan yang membawa senyawa-senyawa logam berat. Logam berat yang terdapat pada lahan pertanian dapat terdistribusi kembali oleh proses alami seperti adanya limpasan permukaan dan erosi tanah (Wu *et al.*, 2023).

Tabel 1. Kandungan Pb dalam sampel tanah dan nira di 4 wilayah kerja pabrik gula  
Table 2. Lead contents in soils and sugarcane juice at 4 working areas of sugar factories

No. Num.	Lokasi Pengambilan Sampel <i>Locations for sampling area</i>	Kandungan Pb (mg/kg) <i>Lead contents (mg/kg)</i>		Faktor transfer <i>Transfer factor</i>	
		Tanah <i>Soils</i>	Nira <i>Sugarcane juice</i>		
<b>A. Wilayah kerja PG Glenmore</b>					
1	HGU Glenmore	8,351765 °S 114,056372 °T	3,68	0,22 ± 0,08	0,06
2	Afdeling Jatirono	8,26725 °S 113,98942 °T	3,42	0,18 ± 0,06	0,05
3	Afdeling Kaliringin	8,32579 °S 114,0916 °T	9,45	0,89 ± 0,00	0,09
4	Afdeling Kalisugih	8,33072 °S 114,07284 °T	6,24	0,20 ± 0,00	0,03
5	Afdeling Dampit	8,29318 °S 114,07297 °T	8,65	0,43 ± 0,04	0,05
<b>B. Wilayah kerja PG Bungamayang</b>					
1	AFD 6 Petak 3142B Rayon 2	4,684460 °S 104,816206 °T	10,38	0,92 ± 0,14	0,09
2	AFD 7 Petak 028B. Rayon 3	4,49758 °S 104,97038 °T	3,75	< 0,11 *)	0,00
3	AFD 10 Petak 1108B. Rayon 4	4,55906 °S 104,83843 °T	4,03	0,21 ± 0,01	0,06
4	AFD 2 Petak 152. Rayon 1	4,628314 °S 104,818085 °T	4,92	< 0,11 *)	0,00
5	AFD 5 Petak 2097. Rayon 2	4,47609 °S 104,97222 °T	6,98	0,33 ± 0,00	0,04
<b>C. Wilayah kerja PG Pesantren Baru</b>					
1	Kebun Rejomulyo, Kec. Kota.	7,855785 °S 112,023761 °T	4,24	< 0,11 *)	0,00
4	Kebun Ngasem, Kec. Gurah	7,858003 °S 112,104540 °T	3,14	< 0,11 *)	0,00
5	Kbn. Tuguredjo, Kec. Ngasem	7,800200 °S 112,068019 °T	5,44	< 0,11 *)	0,00
9	HGU Djengkol, Kec. Ngancar	7,902772 °S 112,163413 °T	2,59	< 0,11 *)	0,00
10	HGU Sempu, Kec. Ngancar	7,945967 °S 112,231125 °T	1,53	< 0,11 *)	0,00
<b>D. Wilayah kerja PG Semboro</b>					
1	Kebun Rejoagung	8,204486 °S 113,417782 °T	7,78	2,94 ± 0,04	0,40
3	HGU Wringin Anom	8,204285 °S 113,417557 °T	7,75	13,07 ± 0,08	1,84
4	HGU Kebun Jombang	8,247668 °S 113,346350 °T	7,05	4,66 ± 0,19	0,73
8	Kebun Semboro	8,204490 °S 113,417733 °T	6,74	0,92 ± 0,12	0,15
10	Desa Wringin Telu, Puger	8,280952 °S 113,46709 °T	3,70	0,50 ± 0,03	0,14

Catatan: \*) limit deteksi untuk sampel di nira 0,11 mg/kg

Note: \*) limit of detection for sugarcane juice 0,11 mg/kg

Meskipun demikian, kisaran nilai rata-rata kandungan Pb dalam tanah sebesar 1,51 -10,38 mg/kg dari 4 wilayah kerja pabrik gula ini masih jauh dari batas maksimum persyaratan kandungan logam

Pb dalam tanah. Standar adanya logam Pb dalam tanah yaitu kurang dari 300 mg/kg (Alloway, 1995; Markus and McBratney, 2001). Persyaratan adanya cemaran logam Pb pada tanah pertanian tiap negara

memiliki kebijakan yang berbeda. Republik Latvia mensyaratkan batas maksimum cemaran Pb sebesar 13 - 23 mg/kg agar kualitas tanah pertanian dapat berkelanjutan

### **Kandungan Pb dalam nira tebu**

Kandungan Pb dalam nira tebu dari wilayah kerja empat pabrik gula berkisar antara  $<0,11 - 13,07$  mg/kg. Nilai rata-rata kandungan Pb dalam nira tebu paling rendah diperoleh di wilayah kerja PG Pesantren Baru yaitu  $< 0,11$  mg/kg, sedangkan nilai rata-rata kandungan Pb dalam nira tebu paling tinggi 13,07 mg/kg diperoleh dari kebun HGU Wringin Anom wilayah kerja PG Semboro. Nampak bahwa semakin rendah kandungan Pb di tanah, maka kandungan Pb dalam nira tebu juga rendah dan sebaliknya. Hal ini menunjukkan bahwa cemaran Pb di tanah dapat terserap oleh tanaman tebu.

Kandungan Pb dalam nira tebu yang kecil di PG Pesantren Baru disebabkan karena kandungan Pb dalam tanah juga kecil. Sistem pengairan di beberapa wilayah kerja PG Pesantren mengandalkan air hujan atau tadah hujan sehingga minim cemaran logam.

Hal yang berbeda terjadi pada wilayah kerja PG Semboro yang sistem pengairan menggunakan air sungai. Nilai rata-rata kandungan Pb dalam nira tebu sangat tinggi kemungkinan dapat disebabkan adanya sumber air irigasi dari sungai besar yaitu Sungai Bondoyudo. Kemungkinan sungai tersebut menjadi muara aliran buangan limbah dari daerah sepanjang aliran sungai. Cemaran Pb dimungkinkan berasal dari air. Bioakumulasi logam berat dapat dipengaruhi oleh beberapa jalur paparan (misalnya pupuk dan irigasi) dan dampak

(Anonymous, 2005). Batas maksimum kandungan Pb sebesar 70 mg/kg diberlakukan untuk tanah pertanian di Kanada.

geokimia tanah terhadap ketersediaannya bagi tanaman (Nnaji *et al.* 2023).

### **Transfers factor logam Pb dari tanah ke tanaman tebu**

Perpindahan unsur logam dari tanah ke tanaman dinyatakan dengan besarnya konsentrasi logam dalam tanaman dibagi banyaknya konsentrasi logam di dalam tanah di sebut *transfer factor* (TF). Besarnya nilai TF untuk logam Pb pada tanaman tebu di empat wilayah kerja pabrik gula ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai TF untuk logam Pb dari tanah ke tanaman tebu berkisar antara 0,00 hingga 1,84. Untuk wilayah kerja PG Pesantren Baru memiliki nilai TF paling rendah yaitu 0,00 dan wilayah kerja PG Semboro memiliki TF paling tinggi berkisar antara 0,14 hingga 1,84. Wilayah kerja PG Glenmore memiliki nilai TF urutan ke-dua setelah PG Semboro.

Nilai TF ini menunjukkan adanya serapan logam Pb oleh tanaman tebu dari tanah. Semakin tinggi nilai TF semakin tinggi pula serapan logam Pb oleh tanaman tebu. Nilai TF lebih dari 1 (satu) terjadi di kebun Wringin Anom di wilayah kerja PG Semboro. Tanaman tebu tidak hanya menyerap logam Pb tetapi juga terjadi akumulasi atau bioekstraksi. Hal ini sesuai dengan Bose *et al.*, (2008) yang menyatakan bahwa nilai  $TF > 1$  menunjukkan bahwa tanaman dapat mengakumulasi logam-logam dari tanah. Sedangkan  $TF < 1$  menunjukkan bahwa tanaman hanya menyerap tetapi tidak mengakumulasi unsur logam tersebut.

Perpindahan unsur logam dari tanah ke dalam tanaman menunjukkan bahwa

sifat atau karakter tanah seperti kandungan lempung dan pH dapat mempengaruhi kecepatan perpindahan unsur logam (Rashid *et al.*, 2023). Penyerapan logam Pb dikendalikan oleh kapasitas tukar kation (KTK), kondisi pH, ukuran partikel tanah, sifat alami akar dan keterbatasan sifat fisio-kimia lainnya (Rahman *et al.*, 2024).

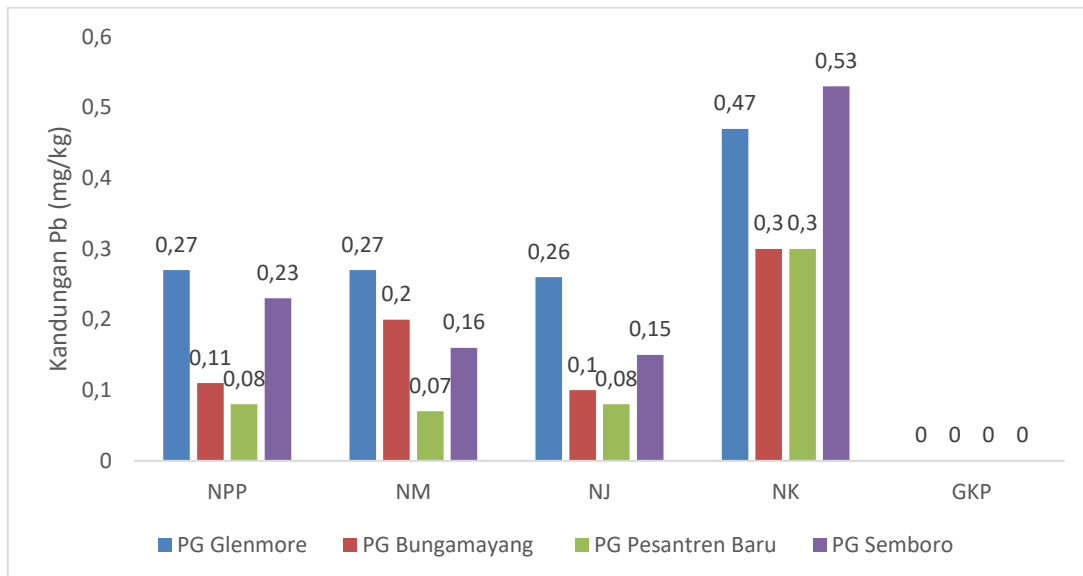
Rata-rata nilai TF yang tinggi pada tanaman tebu di wilayah PG Semboro dapat disebabkan karena logam Pb di tanah tersedia dan dapat dipertukarkan (*exchangeable*) untuk tanaman tebu juga tinggi (Nugoeirol and Alleoni, 2013). Penyerapan logam Pb dikendalikan oleh kapasitas tukar kation (KTK), kondisi pH, ukuran partikel tanah, sifat alami akar dan keterbatasan sifat fisio-kimia lainnya (Rahman *et al.*, 2024). Terjadinya biokonsentrasi atau *transfer factor* logam berat dari tanah ke tanaman disebabkan logam berat berada dalam bentuk terlarut dan juga dalam bentuk *exchangeable* sehingga mudah diakses dan masuk ke dalam tanaman (Shetty *et al.*, 2025).

Menurut Shetty *et al.* (2025), keberadaan logam berat dalam tanah dikelompokkan dalam 4 golongan yaitu (1) terlarut (dalam keadaan berair), (2) *exchangeable* (dalam komponen organik dan anorganik), (3) dalam struktur "*lattice*" dengan tanah, dan (4) *insoluble* (terjadi pengendapan menyatu dengan komponen tanah lainnya. logam berat dalam kondisi

terlarut dan *exchangeable* yang mampu masuk ke dalam jaringan tanaman. Alghobar and Suresha (2015) melaporkan kandungan unsur logam berat yang ada di tanah berkorelasi dengan kandungan unsur logam berat yang ada di tanaman tebu. Meskipun demikian respon akumulasi logam berat dalam tanaman tebu untuk tiap-tiap unsur berbeda-beda.

#### **Kondisi cemaran Pb dalam bahan alur proses dari 4 pabrik gula**

Adanya kemungkinan terjadinya cemaran Pb pada bahan alur proses pada 4 pabrik gula. Bahan alur proses dirunut mulai dari nira perahan pertama (NPP), nira mentah (NM), nira kental (NK), gula (GKP) dan tetes. NPP adalah nira yang dihasilkan dari proses pemerahan tebu di unit gilingan pertama. Nira mentah (NM) adalah nira campuran hasil pemerahan tebu pada seluruh unit gilingan biasanya terdiri dari 4 atau 5 unit gilingan yang tersusun secara seri. Pada nira mentah ini telah ditambahkan adanya air imbibisi, sedangkan pada NPP tidak ada air imbibisi. Nira jernih adalah nira hasil pemurnian nira mentah dengan penambahan bahan pembantu untuk pemurnian seperti susu kapur, gas sulfit, flokulan dan lainnya. Nira kental (NK) adalah nira hasil penguapan dari nira jernih sehingga menjadi cairan yang kental.



Gambar 1. Kondisi rerata kandungan Pb dalam bahan alur proses pada 4 pabrik gula  
*Figure 1. Condition of average lead contents in the flowing materials process on 4 sugar factories*

Rerata kandungan Pb dalam bahan alur proses pada PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro ditunjukkan pada Gambar 1. Kandungan Pb dalam NPP berkisar antara 0,08 – 0,27 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam NPP paling rendah sebesar 0,08 mg/kg diperoleh pada PG Pesantren Baru. Sementara rerata kandungan Pb dalam NPP paling tinggi sebesar 0,27 mg/kg diperoleh dari PG Glenmore.

Gambar 1. juga menunjukkan rerata kandungan Pb dalam Nira Mentah (NM) berkisar antara 0,07 – 0,27 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam NM paling rendah sebesar 0,07 mg/kg diperoleh pada PG Pesantren Baru. Sementara rerata kandungan Pb dalam NM paling tinggi sebesar 0,27 mg/kg diperoleh dari PG Glenmore.

Rerata kandungan Pb dalam Nira Jernih (NJ) berkisar antara 0,08 – 0,26 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam NJ paling rendah sebesar 0,08 mg/kg diperoleh pada PG Pesantren Baru. Sementara rerata

kandungan Pb dalam NJ paling tinggi sebesar 0,26 mg/kg diperoleh dari PG Glenmore.

Rerata kandungan Pb dalam Nira Kental (NK) berkisar antara 0,30 – 0,53 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam NK paling rendah sebesar 0,30 mg/kg diperoleh pada PG Pesantren Baru. Sementara rerata kandungan Pb dalam NK paling tinggi sebesar 0,53 mg/kg diperoleh dari PG Semboro.

PG Pesantren Baru memiliki bahan alur proses dengan kandungan Pb paling rendah dibandingkan 3 PG lainnya. Hal ini nampak dari kondisi kandungan Pb yang rendah di lahan pada wilayah kerja PG Pesantren Baru (Tabel 2). Sebaliknya di PG Glenmore cenderung memiliki bahan alur proses dengan kandungan Pb yang tinggi. Hal ini terkait juga dengan kandungan Pb yang tinggi di lahan pada wilayah kerja PG Glenmore. Demikian juga di PG Semboro memiliki bahan alur proses dengan kandungan yang cukup tinggi disebabkan adanya potensi yang tinggi untuk kadar Pb

pada bahan baku tebu (Tabel 2). Fakta ini menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara kondisi kandungan Pb di tanah atau lahan dengan di bahan alur proses.

### **Produk gula kristal putih (GKP) dan kemungkinan cemaran logam Pb**

Kandungan Pb pada Gula Kristal Putih < 0,075 mg/kg atau di bawah limit deteksi pada ke-empat PG yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro ditunjukkan pada Gambar 1. Rendahnya kandungan Pb dalam kristal gula ini membuktikan bahwa cemaran Pb lebih suka pada kondisi terlarut, bukan pada endapan atau fase padatan. Sebagaimana data yang diperoleh dari blotong (Tabel 3) pada fase endapan atau padatan juga menunjukkan kandungan Pb yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa proses yang terjadi pada pabrik gula dapat menekan kandungan logam Pb pada produk gulanya. Kandungan Pb < 0,075 mg/kg ini berada di bawah dari yang dipersyaratkan SNI GKP 2010 yaitu 2 mg/kg, dan juga berada di bawah ketentuan yang dipersyaratkan CODEX yaitu 0,10 mg/kg.

Logam berat Pb tidak hanya diserap tanaman tebu tetapi juga terikut dalam proses pembuatan gula. Kandungan Pb dalam gula kristal putih (GKP) pada penelitian ini sebesar < 0,075 mg/kg yaitu lebih rendah dari GKP yang diproduksi di Ethiopia dilaporkan sebesar 0,11-0,30 mg/kg (Engida *et al.*, 2013) dan 0,189 - 0,528 mg/kg (Mekassa *et al.*, 2024). Menurut Mekassa *et al.* (2024), faktor yang menyebabkan variasi kandungan logam berat pada gula adalah jenis gula, metode prosesing gula, varietas tebu, *pretreatment* sampel dan metode analisa. Faktor lain yang juga berpengaruh adalah lingkungan

tumbuh tanaman tebu, jenis tanah, air irigasi yang digunakan, aktivitas antropogenik dan polusi biosfer, penggunaan pupuk dan pestisida, herbisida selama budidaya tanaman tebu.

### **Jejak cemaran Pb di bahan sisa (ampas tebu dan blotong) dan tetes tebu**

Menelusuri jejak kandungan Pb dalam alur proses, perlu memperhatikan kandungan Pb dalam bahan sisa proses seperti ampas tebu, blotong dan tetes. Kandungan timbal (Pb) dalam ampas, blotong dan tetes dari 4 pabrik gula yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro ditunjukkan pada Tabel 3. Rerata kandungan Pb dalam ampas tebu berkisar antara 0,26 -1,96 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam ampas paling rendah sebesar 0,26 mg/kg terjadi pada PG Pesantren Baru, sementara PG Bungamayang memiliki rerata kandungan Pb dalam ampas paling tinggi yaitu sebesar 1,96 mg/kg. Rerata kandungan Pb dalam ampas di PG Bungamayang kemungkinan disebabkan proses defekasi pada ekstraksi nira mentah sehingga pengotor yang di dalamnya terkandung Pb tertinggal di ampas tebu.

Tabel 3. juga menunjukkan rerata kandungan Pb dalam blotong pada ke-empat pabrik gula yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro. Ke-empat PG tersebut memiliki kandungan Pb dalam blotong yang sama yaitu < 0,03 mg/kg atau dibawah limit deteksi. Blotong adalah komponen padatan dari sisa pemurnian nira. Kandungan Pb yang kecil yang terikut pada blotong dimungkinkan senyawa Pb dalam bentuk endapan adalah kecil. Namun demikian, Bridhikitti *et al.* (2023) melaporkan bahwa

kandungan Pb dalam blotong sebesar 29,53 mg/kg dari pabrik gula di Thailand.

Selain kandungan Pb dalam ampas dan blotong, Tabel 3. Juga menunjukkan rerata kandungan Pb dalam tetes yang berkisar antara 0,70 – 1,17 mg/kg. Rerata

kandungan Pb dalam tetes paling rendah sebesar 0,70 mg/kg diperoleh dari PG Pesantren. Sementara itu dari PG Glenmore diperoleh rerata kandungan Pb dalam tetes paling tinggi sebesar 1,17 mg/kg.

Tabel 3. Rerata kandungan logam Pb dalam ampas, blotong dan tetes pada 4 pabrik gula  
*Table 3. Average of lead contents in the sugarcane bagasse, filtercake and molasses for 4 sugarcane factories*

Pabrik gula <i>Sugarcane Factory</i>	Kandungan Pb (mg/kg) <i>Lead contents (mg/kg)</i>		
	Ampas <i>Sugarcane bagasse</i>	Blotong <i>Filtercake</i>	Tetes <i>Molasses</i>
PG Glenmore	0,41	< 0,03	1,17
PG Bungamayang	1,96	< 0,03	0,79
PG Pesantren Baru	0,26	< 0,03	0,70
PG Semboro	0,86	< 0,03	0,87

Catatan : Limit deteksi untuk blotong = 0,03 mg/kg

Kandungan Pb dalam tetes tebu di Mesir dilaporkan sekitar 6,40-9,46 mg/kg (Zohri et al., 2022). Adanya variasi kondisi kandungan logam Pb dalam tetes pada beberapa pabrik gula disebabkan karena sifat-sifat dan komposisi tanah dimana tanaman tebu dibudidayakan, nira, gula sehingga komposisi Pb di tetes berbeda-beda.

Keberadaan timbal dalam tetes ini menunjukkan adanya korelasi antara tingkat kelarutan senyawa Pb. Alur proses dari nira perahan pertama, nira mentah, nira jernih hingga menjadi nira kental (Gambar 4) menunjukkan konsistensi keberadaan cemaran Pb. Hal ini menunjukkan keberadaan logam Pb berada dalam bentuk cairan, bukan padatan. Sejalan dengan hal ini nampak bahwa kandungan Pb dalam blotong cenderung rendah. senyawa Pb yang terendapkan juga rendah yaitu di bawah limit deteksi atau < 0,03 mg/kg (Tabel 3).

Menurut Ahmed & Mahmood (2014) bentuk senyawa Pb yang larut adalah timbal asetat (timbal sub-asetat, timbal nitrat dan timbal klorida adalah bentuk senyawa Pb yang terlarut (Ahmed & Mahmood, 2014). Faktor yang menyebabkan tingkat kelarutan ini seperti pH dan suhu. Kondisi pH asam memiliki kecenderungan Pb terlarut lebih tinggi karena tingginya konsentrasi ion hidrogen membantu kelarutan senyawa. Suhu yang tinggi juga membuat kelarutan Pb meningkat, misalnya  $PbCl_2$  akan mudah larut pada suhu yang tinggi.

## KESIMPULAN

Logam berat Pb dari tanah dapat terserap kedalam tanaman tebu. Semakin banyak logam berat Pb di dalam tanah semakin banyak yang terserap ke dalam tanaman tebu. Perpindahan logam Pb dari dalam tanah ke dalam nira tebu dari empat wilayah kerja pabrik gula berkisar antara 0,00 hingga 1,84. Kandungan Pb di tanah berkisar antara 1,53-10,38 mg/kg.

Kandungan Pb dalam nira tebu berturut-turut berkisar antara <0,11 – 13,07 mg/kg.

Rerata kandungan Pb dalam bahan alur proses berkisar antara 0,08 – 0,27 mg/kg pada Nira Perahan Pertama (NPP); 0,07 – 0,27 mg/kg pada Nira Mentah; 0,08 – 0,26 mg/kg pada Nira Jernih; dan 0,30 – 0,53 mg/kg pada Nira Kental. Rerata kandungan Pb dari NPP menjadi Nira Jernih relatif konstan jumlahnya dan terjadi peningkatan pada Nira Kental akibat pemekatan. Kandungan Pb di GKP sama untuk empat pabrik gula tersebut yaitu < 0,075 mg/kg atau di bawah limit deteksi. Rerata kandungan Pb pada ampas tebu dan tetes dari empat pabrik gula berturut-turut antara 0,26 – 1,96 mg/kg dan 0,70 – 1,17 mg/kg. Sementara itu, kandungan Pb di blotong < 0,03 mg/kg.

Proses yang terjadi pada empat pabrik gula yaitu PG Glenmore, PG Bungamayang, PG Pesantren Baru dan PG Semboro mengolah fase cair (nira) menjadi fase padatan (gula kristal) dapat menekan kandungan cemaran logam Pb pada produk gulanya hingga < 0,075 mg/kg. Kandungan Pb < 0,075 mg/kg ini berada di bawah nilai dari yang dipersyaratkan SNI GKP 2010 yaitu 2 mg/kg, dan juga berada di bawah ketentuan yang dipersyaratkan CODEX yaitu 0,10 mg/kg.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh PT Sinergi Gula Nusantara (SGN). Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT SGN dan jajaran manajemen di PG Glenmore di Banyuwangi, PG Pesantren Baru di Kediri, PG Semboro di Jember, PG Bunga Mayang di Lampung atas dukungannya dalam melakukan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adekola, F.A. & Akinpelu, A.A. (2001) Some trace elements in juice and bagasse of two varieties of sugarcane, location soil and irrigation water from Bacita Sugar Estate, Nigeria. *Bioscience Research Communications*, 13(2): 1-6.
- Ahmed, G.M & Mahmood, A.S. (2014) Effect of lead acetate on some biochemical factors in blood of rats. *International Journal of Current Research*. 6(01): 4338-4340.
- Alghobar, M.A. & Suresha, S. (2015) Evaluation of Nutrients and Trace Metals and Their Enrichment Factors in Soil and Sugarcane Crop Irrigated with Wastewater. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 3: 46-56.
- Apagu, H. (2019) Assessment of heavy metals concentrations in sugarcane (leaves and juice) and soils and their effect on sucrose content in Savannah Sugar Company Limited, Numan, Adamawa State, Nigeria. Dissertation. Faculty of Life Sciences, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria.
- Alloway, B.J. (1995) Heavy metal in soils di dalam Eviati dan Sulaiman (2009) *Petunjuk Teknis Edisi 2: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk*. Balai Penelitian Tanah).
- Alcívar, M.; Vinueza, E.; Pernía, B.; Montero, X.A.; Gallardo, A. (2024). Contamination by cadmium and lead in sugarcane and its derived products in Ecuador. *Agriculture*. 14, 2121. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122121>
- Angon, P.B., Islam, M.S., Shreejana, K.C., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S.A., (2024) Sources, effects and present perspectives of

- heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon* 10. e28357
- Arike, A.O., Anuoluwapo, O.M., Titilola, K.O. & Abolanle, K.A.A. (2020) Assessment of heavy metals in NPK-treated and untreated sugarcane juice cultivated in Papalanto, Ogun State, Nigeria. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS)*.5(2) : 2454-6194.
- Asati, A., Pichhode, M., & Nikhi, K. (2016) Effect of heavy metals on plants: An overview. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)*. 5(3): 56-68.
- Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), (2022). nomor 9 tahun 2022. Persyaratan cemaran logam berat dalam pangan olahan.
- Ditjenbun, (2025). Taksasi akhir giling 2018-2024. Data primer diolah.
- Bridhikitti, A., Kaewsuk, J., Karaket, N., Somchat, K., Friend, R., Sallach, B., Chong, J.P.J., & Redeker, K.R. (2023) Sources and magnitude of heavy metals in sugarcane plantation soils with different agricultural practices and their implications on sustainable waste-to-foods strategy in the sugar-ethanol industry. *Sustainability*, 15(14816): 1-19.
- Bose, S., Vedamati, J., Rai, V., & Ramanathan, A.L. (2008). Metal uptake and transport by *Typha angustata* L. grown on metal contaminated waste amended soil: An implication of phytoremediation. *Geoderma*. 145(1-2): 136-142.
- Codex Alimentarius Commission (CAC), (2022). Maximum Levels for Lead in Certain Food Categories. CX/CF 22/15/7-Add.1.
- Damodharan, U. & Reddy, M.V. (2014) Uptake of toxic trace metals (Cd, Pb) and micro nutrients (Cu, Zn, Mn) by sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) irrigated with treated effluents of sugar industry. *Archives of Environmental Protection*. 40(1): 13 – 22.
- Engida, E., Bultosa, G., & Bussa, N. (2013) Physicochemical quality of Ethiopian plantation white sugar from three sugar factories. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 3(7):128-133
- Gaiti, M.D. (2020) Determination of selected heavy metals in sugarcane (*Saccharum* sp) grown along Ngong Tributary of Nairobi River. *Thesis*. Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology. Kenya.
- Jurgens, B.C., Parkhurst, D.L., & Belitz, K. (2019). Assessing the lead solubility potential of untreated groundwater of the United States. *Environmental Science Technology*. 53: 3095–3103.
- Kumar, A., Pinto, M.M.S.C., Chaturvedi, A.K., Shabnam, A.A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D.K., Malyan, S.K., Kumar, S.S., Khan, S.A. & Yadav, K.K. (2020) Review. Lead Toxicity: Health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(2179): 1-33
- Mekassa, B., Etana, E., & Merga, L.B. (2024). Proximate analysis, levels of trace heavy metals and associated human health risk assessments of Ethiopian white sugars. *Journal of Agriculture and Food Research*. 16 (101086):1-14.
- Munoz, S.I.S., Oliveira, A.S., Trevilato, T.M.B., Bocio, A., Takayanagui, A.M.M & Domingo, J.L. (2006)

- Metal levels in sugar cane (*Saccharum* spp.) samples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brazil. *Environmental International*. 3(1): 52-57
- Nnaji, N.D., Onyeaka, H., Miri, T., & Ugwa, C. (2023) Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*. 5:125
- Nogueiro, R.C. & Alleoni, L.R.F. (2013) Sequential extraction and speciation of Ba, Cu, Ni, Pb and Zn in soil contaminated with automotive industry waste. *Chemical Speciation and Bioavailability*. 25(1):34-42.
- Pandey, B., Suthar, S., & Singh, V. (2016). Accumulation and health risk of heavy metals in sugarcane irrigated with industrial effluent in some rural areas of Uttarakhand, India. *Process Safety and Environmental Protection*. 102: 655–666.
- Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P., & Pinelli, E. (2011) Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 213:113-137.
- Rahman, S., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M.J., Saeed, M., Ahmad, I. & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon* 10. e27724
- Rashid, A., Schutte, B.J., Ulery, A., Deyholos, M.K., Soum Sanogo, S., Lehnhoff, E.A. & Beck, L. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Review. Agronomy*. 13: 1521.
- Ronda, F., Sanza, M.D., Gomez, M & Sancho, D. (2001) Direct determination of arsenic, cadmium, cobalt, copper, chromium, lead, tin and zinc in white beet sugar using graphite furnace atomic absorption spectrophotometry. *Sugar Industry*. 126:208-212.
- Smart, M.O., Fawole, O.A., Adesida, O.A. & Olunloyo, A.A (2019) Assessment of heavy metals in soils and sugarcane around cement factories of Ewekoro Area, South West Nigeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 10(9): 12-21.
- Standar Nasional Indonesia (SNI), (2020) Nomor 3140-3:2020 tentang Gula kristal putih.
- Shetty, B.R., Jagadeesha, P.B., & Salmataj, S.A., (2025) Heavy metal contamination and its impact on the food chain: exposure, bioaccumulation, and risk assessment, *CyTA - Journal of Food*, 23(1):1-19. 2438726, DOI: 10.1080/19476337.2024.2438726
- Wang, X.F, Deng, C., Yin, J., & Tang, X. (2018) Toxic heavy metal contamination assessment and speciation in sugarcane soil. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 108. 042059
- Wu, Y., Zhou, L., Meng, Y., Lin, Q., & Fei, Y. (2023) Influential topographic factor identification of soil heavy metals using geodetector: The effects of DEM resolution and pollution sources. *Remote Sensing*. 15, 4067: 1-21.
- Xie, J., Weng, Q., Ye, G., Luo, S., Zhu, R., Zhang, A., Chen, X. & Lin, C. (2014). Bioethanol production from sugarcane grown in heavy metal-contaminated soils. *BioResources* 9(2): 2509-2502

Zohri, A.E.A., Soliman, M.F., Ibrahim,  
O.M. & Aziz, A.M.A. (2022).  
Reducing heavy metal content in

sugarcane molasses and its effect  
on ethanol fermentation efficiency.  
*Egyptian Sugar Journal* 18:60-67