

DOI: <https://doi.org/10.21009/JRSKT.101.02>

Analisis Kandungan Logam dan Ftalat pada Komponen Eletronik menggunakan XRF dan Py/GC-MS

Ayu Zakiyah Lestari^{1,*}, Nabilah Maulida²

¹Departemen Quality Assurance, PT. Panasonic Manufacturing Indonesia, Jl. Raya Bogor, Jakarta, 13710, Indonesia

² Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, 13220, Jakarta, Indonesia

*Email: ayu.lestari@id.panasonic.com

Received: 7 May 2024
Revised: 19 May 2024
Accepted: 1 June 2024
Online: 15 June 2024
Published: 30 June 2024

Jurnal Riset Sains dan Kimia Terapan
p-ISSN: 2302 - 8467
e-ISSN: 2303 – 0720



Abstrak

Perkembangan elektronik pada bidang industri mempengaruhi kehidupan sehari-hari. Penggunaannya yang berlebihan dapat meningkatkan resiko berbahaya pada penggunaannya. Salah satu faktor bahaya pada komponen elektronik yang digunakan adalah terdapatnya logam dan ftalat. RoHS merupakan regulasi Uni Eropa yang mengatur pembatasan penggunaan zat-zat berbahaya seperti Pb, Hg, Cd, dan Cr⁶⁺, serta PBB, PBDE, DIBP, DBP, BBP, dan DEHP dalam produk-produk elektronik dan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan zat-zat berbahaya yang diatur oleh RoHS pada sampel komponen elektronik. Metode yang digunakan adalah skrining awal menggunakan XRF dan penetapan kadar ftalat dengan Py/GC-MS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel tidak mengandung logam berat (Cd, Hg, Cr), DIBP, BBP, dan turunan Br. Kandungan Pb, DBP, dan DEHP yang terdeteksi memiliki konsentrasi rendah dan tidak melebihi batas maksimum penggunaan ftalat yang ditetapkan oleh RoHS, sehingga part elektronik tersebut dapat digunakan dalam produksi.

Kata kunci: elektronik, ftalat, logam, Py-GC-MS, RoHS, XRF

Abstract

The development of electronics in the industrial sector affects daily life. Its excessive use can increase the risk of harm to its users. One of the hazardous factors in the electronic components used is the presence of metals and flattates. RoHS is a European Union regulation that regulates restrictions on the use of hazardous substances such as Pb, Hg, Cd, and Cr⁶⁺, as well as PBB, PBDE, DIBP, DBP, BBP, and DEHP in electronic and electrical products. This study aims to determine the content of RoHS-regulated hazardous substances in electronic component samples. The methods used were preliminary screening using XRF and determination of phthalate levels by Py/GC-MS. The results showed that the samples did not contain heavy metals (Cd,

Hg, Cr), DIBP, BBP, and Br derivatives. The detected Pb, DBP, and DEHP contents had low concentrations and did not exceed the maximum limit of phthalate use set by RoHS, so the electronic parts could be used in production.

Keywords: *electronics, metals, phthalates, Py-GC-MS, RoHS, XRF*

Pendahuluan

Komponen elektronik memainkan peran penting dalam kehidupan sehari-hari (Franjić & Marappan, 2022). Perkembangan elektronik yang secara signifikan memengaruhi berbagai aspek rutinitas harian dan fungsi sosial (Deejay & Henne, 2023). Komputer elektronik modern, yang disebut-sebut sebagai salah satu penemuan terbesar sejak mesin uap, telah merevolusi tidak hanya ilmu pengetahuan fisik dan teknik, tetapi juga humaniora, profesi, dan bisnis, yang memungkinkan manusia untuk mengontrol informasi. Dalam setiap elektronik yang dikembangkan terdapat berbagai macam logam didalamnya (Bansal, 2023). Jenis jenis logam yang umum ditemukan dalam komponen elektronik yaitu tembaga, timbal, timah, emas, perak, dan aluminium (Murali et al., 2021). Masing masing dari logam tersebut, memiliki peran nya sendiri dalam komponen elektronik. Namun, keberadaan logam berat dan flatat dalam komponen elektronik menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan yang signifikan (Zhang et al., 2019). Selain itu, paparan logam-logam ini pada masa sebelum kelahiran bayi dapat menyebabkan masalah kesehatan mental pada anak-anak, termasuk masalah depresi, gangguan pemusatan perhatian/hiperaktif (Lozano et al., 2022).

Melihat resiko dari bahaya penggunaan logam dan flatat dalam komponen elektronik, RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) regulasi Uni Eropa membatasi penggunaan bahan-bahan berbahaya dalam produk elektronik dan listrik dari mulai produksi hingga pembuangan dan daur ulang limbah (Natsch et al., 2023). Regulasi RoHS 2002/95/EC pertama kali diterapkan pada tahun 2006. Zat-zat berbahaya yang diberlakukan oleh RoHS 1 meliputi timbal (Pb), merkuri (Hg), kadmium (Cd), kromium VI (Cr^{6+}), bifenil polibrominasi (PBB), dan difenil polibrominasi eter (PBDE) (Ohgaki et al., 2019). Pada tahun 2011, Uni Eropa mengeluarkan RoHS 2 yang kemudian mengalami perbaikan menjadi RoHS 3 (2015/863/EU). Pembaruan ini bertujuan untuk meningkatkan regulasi zat berbahaya pada peralatan listrik dan elektronik, yang mencerminkan pemahaman yang terus berkembang mengenai zat beracun dan dampaknya terhadap kesehatan dan lingkungan. Empat jenis senyawa ftalat yaitu di-2-etilheksil ftalat (DEHP), butil benzil ftalat (BBP), dibutil ftalat (DBP) dan diisobutil ftalat (DIBP, ditambahkan sebagai senyawa yang dibatasi ke dalam Petunjuk RoHS yang berlaku pada tahun 2019 (da Costa et al., 2023). Berikut merupakan batas maksimum zat kimia berbahaya berdasarkan Petunjuk RoHS.

Tabel 1. Batas Maksimum Zat Kimia Berbahaya Berdasarkan Petunjuk RoHS

Bahan Kimia Berbahaya	Batas Maksimum
Pb	1000 ppm
Hg	1000 ppm
Cd	100 ppm
Cr^{6+}	1000 ppm
PBB	1000 ppm
PBDE	1000 ppm
DIBP	1000 ppm
DEHP	1000 ppm
BBP	1000 ppm
DBP	1000 ppm

Dalam industri elektronik, logam berat sering digunakan dalam proses manufaktur produk (Sahoo & Nanda, 2023). Logam seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), kromium (Cr), dan merkuri (Hg) umumnya ditemukan pada berbagai komponen elektronik, seperti solder, lampu, plat logam, spring, kontak listrik, dan sebagainya (Tolkou et al., 2023). Paparan berlebihan terhadap logam-logam ini dapat menyebabkan toksisitas yang berpotensi merugikan kesehatan manusia, seperti kanker (Kumar et al., 2023), gangguan pada sistem saraf, reproduksi, ginjal, kardiovaskular, serta disfungsi sistem kekebalan tubuh (Abd Elnabi et al., 2023).

Ftalat terklasifikasi sebagai bahan berbahaya karena dampak buruknya terhadap sistem reproduksi, dugaan gangguan endokrin, serta peningkatan risiko kanker (Arrigo et al., 2023). Zat ini juga berpotensi toksik terhadap lingkungan perairan dan tanah (Gaur & Siddique, 2023). Struktur dasar ftalat adalah asam benzena dikarboksilat yang memiliki dua rantai samping berupa alkil, benzil, fenil, benzil, fenil, sikloalkil atau alkoksi (Naz et al., 2022). Ester asam ftalat biasanya ditambahkan ke dalam bahan polimer sebagai zat pengatur (pemlastis) untuk meningkatkan fleksibilitas dan daya tahan suatu bahan dalam berbagai produk industri dan konsumen, termasuk plastik, karet, perekat, selulosa, resin, perangkat medis, elektronik, mainan anak-anak, cat, tekstil, dan sebagainya (Muscat et al., 2023). Selain itu, senyawa turunan Br seperti PBB dan PBDE, yang berfungsi sebagai bahan tahan api dalam berbagai produk plastik, peralatan listrik, peralatan elektronik, tekstil, karpet, dan berbagai perabotan rumah tangga, juga termasuk dalam kategori bahan berbahaya. Paparan terhadap senyawa ini dapat mengakibatkan gangguan pada sistem kekebalan tubuh, sistem saraf, dan sistem endokrin manusia, serta menimbulkan masalah hormonal dan perkembangan pada manusia (Ahn & Jeung, 2023). Dengan resiko bahaya yang tinggi maka diperlukan suatu metode untuk mengidentifikasi dan mengukur kandungan zat berbahaya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengukur kandungan zat berbahaya berdasarkan Petunjuk RoHS pada sampel part elektronik. Dilakukan skrining awal terhadap kandungan logam berat dan senyawa turunan Br menggunakan spektrometer fluoresensi sinar-X (XRF), serta penetapan kadar ftalat menggunakan kromatografi gas pirolisis-spektrometri massa (Py/GC-MS). Teknik analisis XRF merupakan metode analisis non-destruktif yang cepat, memerlukan sedikit persiapan, dan mudah dalam pengoperasiannya (Frydrych & Jurowski, 2023). Sementara itu, Py-GC/MS memungkinkan untuk memperoleh informasi tentang komposisi bahan plastik, baik yang bersifat volatil maupun semi-volatil. Keunggulan teknik ini adalah tidak memerlukan persiapan sampel seperti ekstraksi dan pengenceran, memungkinkan analisis langsung terhadap sampel, serta mampu mengidentifikasi sampel dalam jumlah massa yang sangat kecil (Arigò et al., 2023).

Metode

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini mencakup X-Ray Fluorescence (XRF), Pyrolysis–Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Py-GC/MS), neraca analitik, cutter, pinset, cangkir sampel, dan alas potong. Bahan kimia yang digunakan termasuk aseton, *Certified Reference Material* (CRM), serta *Reference Material* (RM) ester ftalat yang terdiri dari lembaran polietilena (PE) dengan konsentrasi 0, 100, dan 1000 ppm sebagai standar uji ftalat. Sampel yang digunakan adalah sebuah komponen elektronik berbahan plastik (isolasi kabel listrik) yang diperoleh dari Unit Bisnis di PT. Panasonic Manufacturing Indonesia.

Skrining Awal

Pada tahap ini, sampel dianalisis menggunakan instrumen XRF. Sebelumnya, mesin XRF telah menjalani proses pemeriksaan standar menggunakan *Certified Reference Material* (CRM) untuk plastik dan logam, diikuti dengan pemeriksaan sampel menggunakan plat logam. Setelah memastikan bahwa XRF telah siap digunakan, sampel kemudian diuji.

Penetapan Kadar Ftalat, PBB, dan PBDE

Sampel dan standar RM berupa lembaran polietilena (PE) (Blank, 100, 1000) dipotong kemudian ditimbang masing-masing sekitar 0,50 mg dan 0,80 mg. Setelah itu, sampel dimasukkan ke dalam sampel *cup*. Kemudian sampel *cup* ditutup menggunakan wool kuarsa bebas ftalat untuk mencegah kebocoran sampel selama proses pengujian berlangsung. Semua *cup* yang berisi sampel ditempatkan dalam tray sampel pada autosampler. Sampel kemudian dianalisis untuk mengukur kandungan ester ftalat (BBP, DBP, DIBP, dan DEHP) menggunakan metode Py/GC-MS. Total waktu pengujian untuk setiap sampel adalah 45 menit.

Hasil dan Pembahasan

Skrining Awal

Analisis XRF adalah salah satu teknik analisis yang paling umum digunakan dalam memperoleh informasi kualitatif dan kuantitatif tentang komposisi bahan berdasarkan distribusi energi dan intensitas radiasi karakteristik yang dipancarkan oleh bahan saat terkena sinar-X. Teknik ini mampu mendeteksi konsentrasi bahan hingga satuan part per million (ppm) hingga persen (%).

Tabel 2. Hasil Skrining Awal Menggunakan XRF

Elemen	Konsentrasi	Sigma	Satuan
Cd	0,0	2,9	ppm
Pb	23,1	3,3	ppm
Hg	0,0	1,3	ppm
Zn	0,899	0,005	%
Fe	0,187	0,003	%
Ca	2,876	0,041	%
S	0,688	0,044	%
K	0,064	0,013	%
Cu	0,005	0,001	%

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan instrumen X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi elemen Pb, Hg, Cd, Cr, dan Br dalam sampel secara cepat tanpa merusak sampel tersebut. Dari Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa sampel tidak mengandung logam Cd, Hg, Cr, dan Br, namun terdapat kandungan Pb dengan konsentrasi sebesar 23,1 ppm. Konsentrasi unsur ini masih berada di bawah standar RoHS, sehingga tidak diperlukan uji lanjut.

Penetapan Kadar Ftalat

Berdasarkan hasil pengujian awal yang menunjukkan tidak adanya kandungan Br pada sampel part elektronik, sehingga pada tahap ini hanya dilakukan penentuan kadar ester ftalat (DIBP, DBP, BBP, dan DEHP) menggunakan kromatografi gas pirolisis-spektrometri massa (Py/GC-MS) karena sebagian besar ester ftalat memiliki berat molekul tinggi, tidak stabil, volatilitas rendah, titik didih yang tinggi dan tidak mudah larut dalam air. Pada suhu pirolisis rendah 300°C, zat aditif plastik organik seperti pmlastis dan bahan tahan api ini terdeteksi lemah bahkan tidak terdeteksi maka volatilitasnya perlu ditingkatkan dengan menganalisis pada suhu yang lebih tinggi yaitu mendekati suhu *flash pyrolysis* (Yuan et al., 2022).

Py/GC-MS merupakan teknik analisis cepat untuk mengidentifikasi senyawa yang melibatkan penguraian sampel secara termal pada suhu tinggi (250-700°C) dimana sampel dipanaskan hingga terdekomposisi menjadi molekul-molekul yang lebih kecil, lalu dipisahkan dengan kromatografi gas dan diidentifikasi dengan spektrometri massa (Wądrzyk et al., 2021). Helium digunakan sebagai gas pembawa yang sangat baik untuk pengujian GC-MS karena bersifat inert, tidak reaktif, memiliki kecepatan difusi yang tinggi dan kompatibel dengan detektor massa. Pada pengujian ftalat, material referensi RM lembar PE 100 ppm digunakan untuk membandingkan rasio signal-to-noise (S/N) antara

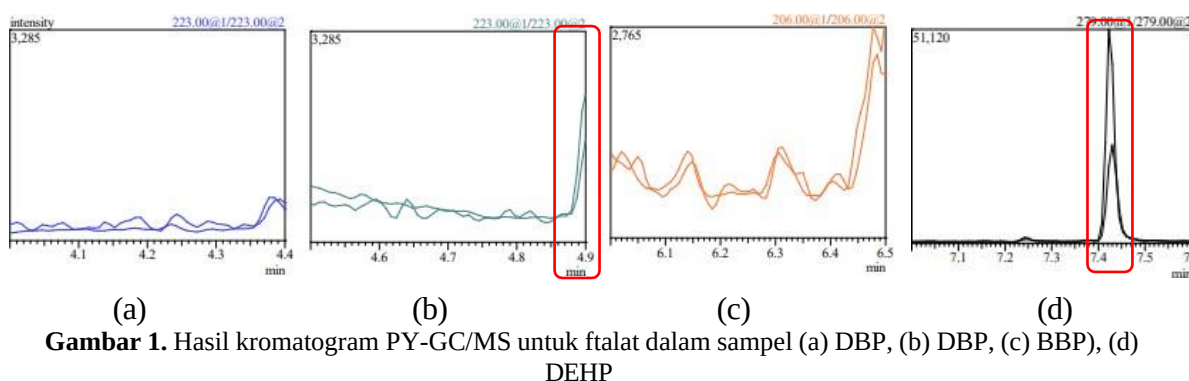
analisis dan mode pemindaian ion, mengonfirmasi tingkat pemulihan, pengulangan, dan menghitung batas deteksi metode Sementara, lembar PE 1000 ppm digunakan untuk kalibrasi satu titik.

Hasil pengujian standar ditunjukkan pada Tabel 3 memberikan informasi berupa waktu retensi setiap senyawa ftalat untuk identifikasi dan kuantifikasi. Senyawa dengan berat molekul yang lebih besar memiliki waktu retensi yang lebih lama. Analisis kualitatif dilakukan dengan cara membandingkan waktu retensi antara sampel dengan standar berkonsentrasi 1000 ppm untuk mengetahui ada atau tidaknya kandungan empat ester ftalat tersebut.

Tabel 3. Tabel hasil Pengujian Ftalat pada Standar (1000 ppm)

Ftalat	Waktu Retensi	Ion Kuantifikasi (m/z)
DIBP (1,2-bis(2-methylpropyl) benzene-1,2-dicarboxylate)	4,321	223,00
DBP (1,2-dibutyl benzene-1,2 dicarboxylate)	4,868	223,00
BBP (1-benzyl 2-butyl benzene- 1,2-dicarboxylate)	6,537	206,00
DEHP (1,2-bis(2-ethylhexyl) benzene-1,2-dicarboxylate)	7,436	279,00

Gambar 1 menunjukkan bahwa kromatogram senyawa ftalat dalam sampel part elektronik. Terdapat puncak tunggal pada waktu retensi yang hampir sama dengan referensi/standar yaitu 4,903 dan 7,430 yang ditampilkan pada gambar 1(b) dan 1(d). Hal ini menandakan bahwa sampel yang diujikan mengandung DBP dan DEHP. Dilihat dari tinggi puncaknya, puncak kromatogram sampel mempunyai intensitas yang lebih rendah dibandingkan dengan standar yang menunjukkan jumlah atau konsentrasi senyawa target (DBP dan DEHP) yang terdapat pada sampel lebih rendah daripada standar. Sementara senyawa DIBP dan BBP tidak terkandung dalam sampel tersebut dimana tidak adanya puncak tunggal pada waktu retensi 4,321 dan 6,537 seperti yang terlihat pada gambar 1(a) dan 1(c).



Konsentrasi ester ftalat dalam sampel diukur secara langsung dengan Py-GC/MS. Pada tabel 4 menampilkan konsentrasi setiap ftalat. Ion kuantifikasi dari setiap ester ftalat dicantumkan pada tabel tersebut diantaranya puncak massa pada m/z 223 (DIBP), m/z 223 (DBP), m/z 206 (BBP), dan m/z 279 (DEHP).

Tabel 4. Tabel Hasil Kuantitatif Pengujian Ftalat pada Sampel

Ftalat	Waktu Retensi	Ion Kuantifikasi (m/z)	Konsentrasi (mg/kg)
DIBP	-	223,00	N.D. (Ref)
DBP	4,903	223,00	22,600
BBP	-	206,00	N.D. (Ref)
DEHP	7,430	279,00	221,969

Didapatkan konsentrasi DBP dan DEHP yang terdapat dalam sampel sebesar 22,600 dan 221,969 mg/kg. Konsentrasi kedua senyawa ftalat ini tidak melebihi batas maksimum Petunjuk RoHS 2015/863 yang memaparkan bahwa persyaratan maksimum konsentrasi ftalat (DIBP, DBP, BBP, dan DEHP) dalam produk elektronik adalah 1000 ppm.

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel part elektronik yang diuji dapat digunakan dalam produk karena telah memenuhi persyaratan RoHS. Diperoleh bahwa sampel tidak mengandung logam berat (Cd, Hg, Cr), DIBP, BBP, dan senyawa bromin. Kandungan Pb, DBP, dan DEHP pada sampel juga memiliki konsentrasi rendah dan tidak melebihi batas maksimum penggunaan ftalat yang ditetapkan oleh RoHS 3 (Petunjuk UE 2015/863).

Daftar Pustaka

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhailifa, S. A., Elmasry, S., Mouhamed, M. S., Shalamesh, E. M., Alhoriény, N. A., Abd Elaty, A. E., Elgendy, I. M., Etman, A. E., Saad, K. E., Tsigkou, K., Ali, S. S., Kornaros, M., & Mahmoud, Y. A.-G. . (2023). Toxicity of Heavy Metals and Recent Advances in Their Removal: A Review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Ahn, C., & Jeung, E.-B. (2023). Endocrine-Disrupting Chemicals and Disease Endpoints. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5342. <https://doi.org/10.3390/ijms24065342>
- Arigò, A., Famigliini, G., Marittimo, N., Agostini, M., Renzoni, C., Palma, P., & Cappiello, A. (2023). Extractive-liquid sampling electron ionization-mass spectrometry (E-LEI-MS): a new powerful combination for direct analysis. *Scientific Reports*, 13(1), 6429. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33647-5>
- Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G., & Faggio, C. (2023). Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Phthalates and Their Effects on Human Health: Focus on Erythrocytes and the Reproductive System*, 270, 109645–109645. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>
- Bansal, P. (2023). Metal extraction by selective sulfidation of compounds is beneficial for recycling. *MRS Bulletin*, 48(5), 440–440. <https://doi.org/10.1557/s43577-023-00528-1>
- da Costa, J. M., Kato, L. S., Galvan, D., Lelis, C. A., Saraiva, T., & Conte-Junior, C. A. (2023). Occurrence of phthalates in different food matrices: A systematic review of the main sources of contamination and potential risks. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2043–2080. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13140>
- Deejay, A., & Henne, K. (2023). Creating a New Normal? Technosocial Relations, Mundane Governance and Pandemic-Related Disruption in Everyday Life. *Sociology*, 58(3), 699–716. <https://doi.org/10.1177/00380385231205135>
- Franjić, S., & Marappan, R. (2022). Role of Electronic Components in Computing. *International Journal of Mathematical, Engineering, Biological and Applied Computing*, 1(1), 47–48. <https://doi.org/10.31586/ijmebac.2022.336>

- Frydrych, A., & Jurowski, K. (2023). Portable X-ray fluorescence (pXRF) as a powerful and trending analytical tool for in situ food samples analysis: A comprehensive review of application - State of the art. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117165. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117165>
- Gaur, K., & Siddique, Y. H. (2023). Phthalate-induced Toxicity and its Mitigation by Natural Plant Products. *Current Traditional Medicine*, 10. <https://doi.org/10.2174/0122150838268882231006094411>
- Kumar, A., Kumar, V., Pandita, S., Singh, S., Bhardwaj, R., Varol, M., & Rodrigo-Comino, J. (2023). A global meta-analysis of toxic metals in continental surface water bodies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109964–109964. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109964>
- Lozano, M., Broberg, K., Soler-Blasco, R., Murcia, M., Riutort-Mayol, G., Ballester, F., Esplugues, A., Manyes, L., Escrivá, L., Correcher, J. F., Peiró, J., Casas, M., Guxens, M., Irizar, A., Lertxundi, N., & Llop, S. (2022). Prenatal metals exposure and pre-adolescents' emotional and behavioral problems. *Environmental Health Perspectives. Supplements*, 2022(1). <https://doi.org/10.1289/isee.2022.p-1010>
- Murali, A., Sarswat, P. K., Benedict, J., Plummer, M. J., Shine, A. E., & Free, M. L. (2021). Determination of metallic and polymeric contents in electronic waste materials and evaluation of their hydrometallurgical recovery potential. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 2295–2308. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03285-3>
- Muscat, M., Sinagra, E., & Lia, F. (2023). Presence of Phthalate Esters Used as Common Plasticisers in Maltese Shoreline Sand. *Environments*, 10(6), 94–94. <https://doi.org/10.3390/environments10060094>
- Natsch, A., Adamsson, G., & Rocha, V. (2023). ECHA ARN documents: chemical grouping without a toxicological rationale. *Archives of Toxicology*, 97(5), 1433–1437. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03479-3>
- Naz, Z., Shrestha, R., Moin, S. T., & Monticelli, L. (2022). Interaction of Phthalates with Lipid Bilayer Membranes. *The Journal of Physical Chemistry*, 126(25), 4679–4688. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c02007>
- Ohgaki, M., Takeguchi, Y., Okawa, S., & Namiki, K. (2019). Screening analysis of RoHS directive hazardous substances (phthalate esters and bromodiphenyl ethers) by novel mass spectrometry using soft ionization. *Royal Society Open Science*, 6(2), 181469. <https://doi.org/10.1098/rsos.181469>
- Sahoo, P. K., & Nanda, M. K. (2023). A modified partitioning algorithm for classification of e-waste. *Journal of Statistics and Management Systems*, 26(1), 53–65. <https://doi.org/10.47974/jsms-947>
- Tolkou, A. K., Toubanaki, D. K., & Kyzas, G. Z. (2023). Detection of Arsenic, Chromium, Cadmium, Lead, and Mercury in Fish: Effects on the Sustainable and Healthy Development of Aquatic Life and Human Consumers. *Sustainability*, 15(23), 16242. <https://doi.org/10.3390/su152316242>
- Wądrzyk, M., Plata, M., Zaborowska, K., Janus, R., & Lewandowski, M. (2021). Py-GC-MS Study on Catalytic Pyrolysis of Biocrude Obtained via HTL of Fruit Pomace. *Energies*, 14(21), 7288. <https://doi.org/10.3390/en14217288>
- Yuan, Z., Huang, Q., Wang, Z., Wang, H., Luo, J., Zhu, N., Cao, X., & Lou, Z. (2022). Medium-Low Temperature Conditions Induce the Formation of Environmentally Persistent Free Radicals in Microplastics with Conjugated Aromatic-Ring Structures during Sewage Sludge Pyrolysis. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 16209–16220. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04453>
- Zhang, S., Guo, A., Fan, T.-T., Rong, Z., & Niu, Y. (2019). Phthalates in residential and agricultural soils from an electronic waste-polluted region in South China: distribution, compositional profile

and sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 12227–12236.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04669-2>