

Válasz dr. Posta József, az MTA kémia tudományok doktorának bírálói véleményére

Szeretném kifejezni őszinte köszönetemet dr. Posta József professzor úrnak, amiért idejét és szakmai tapasztalatát dolgozatom átolvasására és bírálatára fordította. Nagyra értékelem elismerő megjegyzéseit, amellyel az elvégzett munkát méltatta. Köszönöm továbbá azokat a gondosan megfogalmazott kritikai észrevételeket, amelyek a további kutatás szempontjából segítségemre lehetnek.

Köszönöm a Bíráló általános, formai és tartalmi kritikai észrevételeit. A jelzett hiányosságokra (nem megfelelően alapos rövidítések jegyzéke, táblázatok ill. ábrák nem megfelelő ill. hiányos feliratozása, elütések ill. esetenként nem megfelelő szóhasználat) vonatkozó észrevételei jogosak és megalapozottak. Megalapozottnak tartom az 'Összegzés' terjedelmére vonatkozó megjegyzését, itt ugyanis tételelesen valamennyi elvégzett kísérletes munka megemlíítésre került.

Az 'Észrevételekre' a következőképpen szeretnék reflektálni:

1.

Az analitikai kémiában egy módszer validálása olyan gyakorlati lépésekhez kapcsolódik, amelyek végrehajtásával választ kapunk az új módszer pontosságára, precizitására, érzékenységre, kimutatási határára, zavartűrésére, méréstartományára, linearitására. A dolgozat adataiból csak közvetett információt kapunk a bevezetett módszer validálási adatairól. Felmerül a kérdés, hogy milyen statisztikai adatokból, milyen referencia-módszertani kritériumok alapján tekinthetjük a *Vibrio fischeri* biolumineszcenciás módszert validáltnak. Az belátható, hogy egy szervetlen és szerveskémiai alkotókat felhasználó analitikai módszer validálása jóval egyszerűbb, mint élő organizmus viselkedésére épülő technika, ahogy ez jelen esetben történik. De a környezeti kockázat objektív feltárása megköveteli, hogy ez a vizsgáló módszer is megbízható és összevethető legyen más független eljárásokkal.

Ökotoxikológiai tesztek esetében a szakirodalom akkor beszél validálásról, ha a biológiai mutatókat (ezeket nevezzük a teszt végpontjainak) valamilyen más típusú, leggyakrabban analitikai méréssorozat eredményeivel összevetve sikerül alátámasztani a biológiai paraméterek megbízhatóságát (pl. Lopes et al. 2025). Dolgozatomban én is elsősorban ezt a megközelítést alkalmaztam. Amennyiben szabványok bevezetéséről van szó, értelmezés szerint a validálás, elsősorban a pontosság mint minőségbiztosítási követelmény érdekében, laboratóriumközi összemérést is magában foglal (Spielmann és Liebsch 2001, Pastorino és Barceló 2025).

Hivatkozások

Lopes, A. R., González-Durruthy, M., Cordeiro, M. N. D., Moura, A. S., Rial, R., Ruso, J. M., ... & Martins, C. D. M. G. (2025). Computational and spectrofluorimetric validation on glyphosate interactions with zebrafish acetylcholinesterase: Mechanistic and ecotoxicological implications. *Toxicology in Vitro*, 106130.

Pastorino, P., & Barceló, D. (2025). Green analytical chemistry methods for ecotoxicological studies: Challenges and recommendations. *Green Analytical Chemistry*, 13, 100266.

Spielmann, H., & Liebsch, M. (2001). Lessons learned from validation of in vitro toxicity test: from failure to acceptance into regulatory practice. *Toxicology in Vitro*, 15(4-5), 585-590.

2.

Az ökotoxicitás vizsgálatát az is bonyolítja, hogy a PM felületén kötődött toxikus anyagok nem csak a *Vibrio fischeri*-re hatnak, hanem egymásra is hatással vannak. Még komplexebbé teszi az ökotoxikus hatást, hogy a porszemcsék felületén két jól elkülöníthető vegyületcsoport van jelen, a toxikus fémvegyületek és a szerves komponensek fő alkotói a policiklusos aromás szénhidrogének (PAH-ok). A szerves és szervetlen komponenseknek az élettani hatása, hatásmechanizmusa is alapvetően eltérő. Az ökotoxikus hatást még tovább terheli az a tény is, hogy a fémionok arányainak változásával a toxicitás mértéke akár additív, antagonistikus és szinergikus is lehet.

A felvetéssel teljes mértékben egyetértek. Önmagában a fémionok együttes jelenléte is jelentős bizonytalanságot okozhat; a toxicitást befolyásoló additív, antagonistikus vagy szinergikus hatásuk nemcsak a jelenlevő fémionok fajtájától és arányaitól függ, hanem egyes környezeti paraméterek is meghatározhatják, például a közeg pH-ja (Fulladosa et al. 2025) vagy a hőmérséklete (Liang et al. 2025). A PM-hez kötődő potenciálisan toxikus komponensek közül valóban leggyakrabban nehézfémeket és PAH-okat azonosítunk, ugyanakkor egyes vizsgálatokból más toxikus komponensek, pl. műanyaglágyítók (ftalátok) jelenléte is bizonyossá vált (Alves et al. 2022).

A *Vibrio fischeri* biolumineszcencia gátlásán alapuló ökotoxikológiai tesztnek – hasonlóan gyakorlatilag valamennyi ökotoxikológiai vizsgálatához – éppen az az előnye, hogy a mintában levő valamennyi szennyező biológiailag felvehető frakcióinak az együttes hatását tudja kimutatni.

Hivatkozások

Fulladosa, E., Murat, J. C., Martínez, M., & Villaescusa, I. (2005). Patterns of metals and arsenic poisoning in *Vibrio fischeri* bacteria. *Chemosphere*, 60(1), 43-48.

Liang, B., Zhong, Z., Zhang, L., & Sun, D. (2025). Focus on the toxicology of deep-sea mining: Biototoxicity of heavy metals to *Vibrio fischeri* released from disturbed surface sediments of the western Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. *Marine Environmental Research*, 107769.

3.

A Jelölt részletesen vizsgálja a PAH-ok szerkezete és az ökotoxikus hatás közötti összefüggést. A dolgozatban viszont nem esik szó a fémszennyezők vegyérték- és kötésiállapotainak szerepéről. Az elmúlt időszak egyik nagy kihívása az analitikában a speciációs analitika, amely szerint az élettani hatás nem a fém összes koncentrációjától függ, hanem az elem módosulatok koncentrációjától, koncentrációarányaitól.

Köszönöm a probléma felvetését. Egyedi szennyezők (pl. antimon, króm, arzén, vanádium) vegyérték-függő előfordulásával, toxicitásával egyre több szakirodalmat lehet találni, amelyek például azt is taglalják, egyes mintákban milyen részarányban fordulnak elő a különböző elem módosulatok, előfordulásuk milyen környezeti viszonyoktól függ, illetve különböző nehézfémek (pld. Fe vs. Cr vagy Mn vs. Cr) egymás előfordulását, állapotát milyen mértékben módosíthatják. Han et al. (2025) minderről kitűnő review-jellegű cikket közölt.

Annak ellenére, hogy szilárd fázisú mintákban az adott nehézfémek elem módosulatai különböző arányban lehetnek jelen, ami természetesen a minta (öko)toxicitását is jelentős mértékben befolyásolja, a releváns cikkek jelentős része ezt a szempontot elhanyagolni látszik (pl. Lee et al. 2026; Rahat et al. 2025; Wang et al. 2026). Relevánsnak azt a cikket tekintem, amely (1) recens, azaz 2024-ben, ill. ezután jelent meg; (2) olyan szakfolyóiratban jelent meg, amely profiljába jellemzően beletartozik a levegőszennyezés, légköri szálló por összetétele és (3) a cikk témája egy konkrét földrajzi terület/probléma jellemzése, hasonlóan megjelent cikkeink jelentős részéhez.

A speciációs vizsgálatokat az is indokolná, hogy a tanulmányok számos esetben éppen olyan nehézfémeket detektáltak PM mintákban, amelyek esetében meghatározó lehet az elem módosulat jellege (pl. As vagy Cr taiwani mintákban, Sun et al. 2025; As, Cr, Sn Delhiből származó mintákban, Srivastava et al. 2025).

Hivatkozások

- Han, Q., Fu, G., Liu, K., Adnan, M., Liu, S., Wang, M., ... & Wang, M. (2025). Chemical speciation and transformation of heavy metals in soil and groundwater: Implications for ecotoxicology and remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 119858.
- Lee, S. J., Lee, H. Y., Cho, I. G., Kim, S. J., Lee, J. Y., Shin, H. J., ... & Choi, S. D. (2026). Pollution characteristics of PM_{2.5} and PM_{1.0} at urban and background sites in South Korea: Focusing on health risks of PAHs and heavy metals. *Atmospheric Environment*, 121857.
- Rahat, M. M. R., Rumman, R., Ferdousi, F. K., Zhao, S., Siddique, M. A. B., Zhang, G., ... & Habib, A. (2025). Heavy metals in atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in Dhaka, Bangladesh: Source apportionment and associated health risks. *Environmental Research*, 271, 121071.
- Srivastava, D., Alam, M. S., Rooney, D. J., Crilley, L. R., Kramer, L., Saksakulkrai, S., ... & Bloss, W. J. (2025). The influence of local and regional sources on concentrations of fine particulate matter in Delhi. *Atmospheric Pollution Research*, 16(7), 102476.
- Sun, S. S. E., Huang, Y. T., Chen, M. J., Huang, X. R., Huang, S. H., Liao, W. Y., & Chou, C. C. K. (2025). Observation-based investigation reveals major sources of heavy metals associated with fine particulate matter (PM_{2.5}) in an East Asian urban area. *Atmospheric Environment: X*, 27, 100342.
- Wang, X., Singh, R. P., Eiche, E., Jiang, F., Pippal, P. S., Kumar, R., ... & Norra, S. (2026). Cross-regional characteristics, chemical composition, and source contributions of

atmospheric particulate matter in Germany and India. *Science of the Total Environment*, 1014, 181386.

4.

Az értekezésben aeroszolok változó szemcseméretű frakciói kerültek vizsgálatra. Kérdés, hogy a Jelölt milyen módszerrel különítette el a PM_{2,5} vagy PM₁₀ frakciókat a nagyobb szemcseméretű szemcséktől, tekintettel a gyűjtött minták kis tömegére.

A dolgozat alapjául szolgáló munkák olyan, számos esetben nemzetközi team együttműködésében valósultak meg, ahol a mintavételt a team meghatározott tagja végezte. Az ökotoxikológiai mérések ilyen módon 'hozott' anyagból történtek. Az egyes munkákban megjelölt mintavevő eszközök, pl. a TCR TECORA PM₁₀ mintavevője (Vicente et al. 2022), a Digitel DHA-80 mintavevő (Kiss et al. 2021) vagy a MCV, CAV-A/mb modell) (Alves et al. 2021) műszaki paraméterei szerint az eszközök rendelkeznek PM₁₀, PM_{2.5} ill. PM₁ mintavételezésére kialakított bemenetekkel, azaz méretfrakcionált mintákkal dolgoztam.

A Pannon Egyetemen alkalmazott Kálmán mintavevő műszaki specifikációi szerint rendelkezik PM₁₀-es és PM_{2.5}-ös előleválasztóval.

5.

Hiányolom a dolgozatban az Anyag és módszer fejezetet, ahol össze lehetett volna foglalni a Jelölt által használt előkészítési módszereket, mérőeszközöket

Köszönöm az észrevételt. Egyetértek azzal, hogy célszerű és elsősorban informatív lett volna, ha a szabvány pusztán hivatkozása mellett pontosan ismertetem a *Vibrio fischeri* kinetikus teszt elvégzésének lépéseit. A hagyományos 'Anyag és módszer' fejezet azért hiányzik, mert az elvégzett munkák meghatározó lépése volt a mintavétel jellemzése, tekintve hogy a mintavételt több team, különböző helyszíneken, többféle mintavevővel végezte. Ezeket elsősorban a könnyebb értelmezhetőség okán, az adott munka leírásánál ismertettem.

Kérdések

1.

A disszertációban részletezett teszt protokollja több ponton laboratórium-specifikus eszközökre és szoftverre épül. Milyen mértékben tekinthető a módszer más laboratóriumok által reprodukálhatónak, és milyen megoldásokat tartana szükségesnek a teszt jövőbeli szabványosítása céljából?

Válasz

A módszer az ISO 21338:2010: water quality – kinetic determination of the inhibitory effects of sediment, other solids and colored samples on the light emission of *Vibrio fischeri* szabvány kiegészítése, a mintaelőkészítés pontos és reprodukálható leírásával. A mintaelőkészítés (azaz kvarc filteren vett szálló por minták 'feldolgozása' elsőként részletesen szerepel a 2012-ben leközölt 'Direct contact test for estimating the ecotoxicity of aerosol samples, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 33(2), 284-287) publikációban, ill. az ezt követő munkákban is

részletesen megtalálható (megadjuk az alkalmazandó eszközöket, a szuszpenzió hígításának a módját). Ennek alapján véleményem szerint a módszert igénybe venni kívánó kutatócsoportok el tudják végezni a mérést.

2015-ben készült egy körvizsgálat, a Vibrio teszt 'hagyományos' és kinetikus változatát összevetve (Järvistö et al. 2016). A körvizsgálatot a Finn Környezetvédelmi Intézet szervezte, ebben a következő szervezetek vettek részt:

Finnország:

Finland Aboatox Oy, Turku (forgalmazó)

Finnish Environment Institute, Jyväskylä

Hidex Oy, vizsgálólaboratórium

KCL Kymen Laboratorio Oy, vizsgálólaboratórium

Metropolilab Oy, vizsgálólaboratórium

Ramboll Finland Oy, Ramboll Analytics, Lahti, vizsgálólaboratórium

University of Eastern Finland

Észtország:

National Institute of Chemical Physics and Biophysics

Szabványosításhoz laboratóriumközi körvizsgálat lenne indokolt, független partnerek bevonásával. A recens szakirodalom átnézése azt mutatja, hogy jelenleg aktívan a tesztet az észt National Institute of Chemical Physics and Biophysics (Nemzeti Fizikai Kémiai és Biofizikai Intézet) foglalkozik, név szerint dr. Anne Kahru (Blinova et al., 2025, Drenkova-Tuhtan et al. 2024, Sihtmäe et al. 2022, 2024). Véleményem szerint egy laboratóriumok közötti 'összemérés' nehezen kivitelezhető, potenciális partner mindössze dr. Kahru lehetne.

Hivatkozások

- Blinova, I., Lukjanova, A., Kahru, A., Aruoja, V., & Heinlaan, M. (2025). Aqueous Eluates of Foamed Plastic Consumer Products may Induce High Toxicity to Aquatic Biota. <https://www.preprints.org/manuscript/202512.0637>
- Drenkova-Tuhtan, A., Sihtmäe, M., Uke, K., Vija, H., Oppmann, M., Prieschl, J., ... & Kahru, A. (2024). Synthesis and ecotoxicity screening of reusable, magnetically harvestable metal oxide/hydroxide nanocomposites for safe and sustainable removal and recovery of phosphorus from wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 444, 141287.
- Järvistö, J., Päivi Meriläinen, P., Björklöf, K. (2016) Interlaboratory Proficiency Test 14/2015. Bacterial toxicity test. Reports of the Finnish Environment Institute 30| 2016.
- Sihtmäe, M., Silm, E., Kriis, K., Kahru, A., & Kanger, T. (2022). Aminocatalysts are More Environmentally Friendly than Hydrogen-Bonding Catalysts. *ChemSusChem*, 15(16), e202201045.
- Sihtmäe, M., Laanoja, J., Blinova, I., Kahru, A., & Kasemets, K. (2024). Toxicity of Silver–Chitosan Nanocomposites to Aquatic Microcrustaceans *Daphnia magna* and *Thamnocephalus platyurus* and Naturally Luminescent Bacteria *Vibrio fischeri*. *Nanomaterials*, 14(14), 1193.

2.

A dolgozat bemutatja a direkt kontakt teszt és különböző extrakciós eljárások eredményeinek összevetését. Mennyire tekinthetők ezek az összehasonlítások kvantitatív értelemben meggyőzőnek, és indokoltnak tartja-e, hogy a direkt kontakt módszer kiváltsa a hosszadalmasabb, munkaigényes extrakciós eljárásokat?

Válasz

Minden esetben ugyanazon mintára végeztem el a különböző extrakciók vs. direkt kontakt teszt összevetését (devecseri iszapömlésből származó porminták; budapesti és K-pusztáról származó téli ill. nyári aeroszol minták valamint dízel üzemű gépjármű emissziójából nyert minta). A számított EC₅₀ értékek a toxicitás pontos számszerűsített mutatói, egyértelmű különbséget mutatnak adott minta esetében a különböző eljárások között.

Valószínűleg ennél teljesebb képet kaphatnánk, ha a direkt kontakt teszt vs. szerves oldószerek alkalmazásával készült minták összevetését más jellegű, szintén szilárd közegből vett mintákon (talaj, üledék) is elvégeznénk. Ebben az esetben feltétlenül javasolt lenne egy szélesebb körű analitikai mérőssor elvégzése is.

Üledékminták esetében a szakirodalomban megtalálható hivatkozások jelentős része a Microtox által kifejlesztett 'Solid Phase Test' eljárást (SPT) alkalmazza, ez módszertanában, sőt az elvi megközelítésben is jelentősen eltér az általam javasolt kinetikus módszertől. Az SPT ugyanis egy híg üledéksuszpenzióval dolgozik, amelyből a kontaktidő leteltével szűréssel eltávolítják a lebegő részecskéket, a biolumineszcencia leolvasása a tiszta vizes fázisban történik. A módszer egyik alapvető hátránya több szerző szerint az, hogy ilyen módon eltávolítják azokat a tesztbaktériumokat is, amelyek a szemcséken megtapadhat, így ellenőrizhetetlen mértékben csökken a vizes fázisban maradó baktériumok mennyisége. Ennek ellenére ez a 'kvázi' direkt kontakt teszt is jó korrelációt mutatott többféle szennyező komponenssel, így például gyógyszermaradványokkal (de Castro-Català et al. 2016), vagy nehézfémekkel (Garcia-Ordiales et al. 2019).

Amennyiben a célfüggvény annak a kockázatnak a becslése, amit a levegőszennyezés az ökoszisztémákra jelenthet (azaz nem-humán hatásviselők), általában indokoltnak tartom a direkt kontakt tesztek alkalmazását. Ivask et al. (2001) szerint is ezek a tesztek azok, amelyek különböző extraktumokkal összevetve alkalmasabbak arra, hogy a szennyezett mintában levő toxikus komponensek biológiailag felvehető frakcióját becsüljék és jobban reprezentálják a természetben előforduló expozíciós mechanizmusokat.

Környezeti relevancia szempontjából érdemes lehet összevetni a direkt kontakt ill. vizes extraktumot alkalmazó tesztek. Környezeti relevancia alatt jelen esetben azt értem, hogy egy esetleges hatásviselő milyen formában találkozhat a szennyező, előreláthatólag toxikus anyagot tartalmazó mátrixszal.

Több olyan munka is található, amely ugyanazon minták esetében alkalmazott *Vibrio fischeri* tesztet, vizes kivonat ill. direkt kontakt teszt összevetésével. Davoren et al. (2005) a Microtox konvencionális és SPT változatát alkalmazta üledékminták toxicitásának rangsorolására, eredményei szerint az SPT változat alkalmas volt toxicitás kimutatására, míg a konvencionális verzió nem mutatott ki toxicitást. Hasonló megállapításra jutott Coz et al. (2008) valamint

Klimkowicz-Pawlas et al. (2019). Mi is végeztünk hasonló összevetést a Kis-Balaton Vízhőmérsékletvédelmi Rendszer II. Üteméről származó mintákon (Paulovits et al. 2012). Minden egyes mintavételi pont esetében 3 különböző üledékfázist vizsgáltunk: teljes üledéket, vizes kivonatot és pórúsvizet. A direkt kontakt teszt (teljes üledék) minden esetben lényegesen magasabb toxicitást jelzett, és a szennyezés várható eloszlásáról is pontos képet adott.

Hivatkozások

- Coz, A., Rodríguez-Obeso, O., Alonso-Santurde, R., Álvarez-Guerra, M., Andrés, A., Viguri, J. R., ... & Kalogerakis, N. (2008). Toxicity bioassays in core sediments from the Bay of Santander, northern Spain. *Environmental Research*, 106(3), 304-312.
- Davoren, M., Shúilleabháinn, S.N., O' Halloran, J., Hartl, M.G.J., Sheehan, D. et al. (2005). A Test Battery Approach for the Ecotoxicological Evaluation of Estuarine Sediments. *Ecotoxicology*, 14, 741-755.
- de Castro-Català, N., Kuzmanovic, M., Roig, N., Sierra, J., Ginebreda, A., Barcelo, D., ... & Muñoz, I. (2016). Ecotoxicity of sediments in rivers: Invertebrate community, toxicity bioassays and the toxic unit approach as complementary assessment tools. *Science of the Total Environment*, 540, 297-306.
- Garcia-Ordiales, E., Roqueñí, N., Rico, J. M., Cienfuegos, P., Alvarez, R., & Ordoñez, A. (2019). Assessment of the toxicity toward *Vibrio fischeri* in sediments of a mining impacted estuary in the north of Spain. *Science of the Total Environment*, 660, 826-833.
- Ivask, A., Hakkila, K., & Virta, M. (2001) Detection of organomercurials with whole-cell bacterial sensors, *Analytical Chemistry*, 73(21), 5168-5171.
- Klimkowicz-Pawlas, A., Maliszewska-Kordybach, B., & Smreczak, B. (2019). Triad-based screening risk assessment of the agricultural area exposed to the long-term PAHs contamination. *Environmental Geochemistry and Health*, 41, 1369-1385.
- Paulovits, G., Kováts, N., Ács, A., Ferincz, Á., Kovács, A. et al. (2012). Ecotoxicological characterisation of sedimentation in the Kis-Balaton Water Protection System. *Acta Biologica Hungarica*, 63, 268-276.

3.

Melyek ennek a direkt kontakt módszer általános bevezetésének a legfontosabb korlátozó tényezői, és milyen irányban tartaná szükségesnek a további fejlesztését (pl. érzékenység, specifitás, pontosság stb.)?

Válasz

A szakirodalomban szereplő munkák alapján elmondható, hogy a biolumineszcens baktérium tesztet szűk körben alkalmazzák légköri szálló por vizsgálatára. 2020 után, saját munkáinkon kívül, elhanyagolható számú publikáció jelent meg, ezek viszont többnyire saját fejlesztések. Így például Yang et al. (2025) gázfázisú minták vizsgálatára dolgozott ki egy *Vibrio* biolumineszcenciát alkalmazó rendszert.

Ez a 'kereslet' beszűkülését mutatja, bár a tesztet továbbra is előszeretettel alkalmazzák, pl. adott terület szennyezettségének minősítésére (Liang et al. 2025) vagy egyedi szennyezők vizsgálatára. Ez utóbbiak esetében a mikro- és nanoműanyagok környezeti kockázatának jellemzése számos, a tesztet alkalmazó recens publikációt eredményezett (Leistenschneider et al. 2026, Tzamaria et al. 2025).

Legfontosabb korlátozó tényezőnek az igény, ill. esetleges együttműködő partnerek hiányát tekintem. Aktív 'marketinget' jelenleg is folytatunk, azaz megpróbáljuk célzottan kijánni a mérés, együttműködést olyan potenciális partnereknek, akik légköri szálló por ökototoxicitásának minősítésére a *Vibrio* teszt konvencionális protokollját, vagy ennek valamilyen verzióját alkalmazzák.

Az érzékenységet tekintve elsősorban PAHok vizsgálatát tartom fontosnak. A dolgozatban hivatkozott tanulmányok (El-Alawi et al. 2002; Hirmann et al. 2007) szerint a tesztrendszer általánosságban érzékeny ezekre a szerves komponensekre. A beltéri főzés során keletkezett emisszió jellegzetességeit vizsgáló munkánkban ugyanakkor azt tapasztaltuk, hogy míg a kis molekulású PAHok nem mutattak korrelációt az ökototoxicitással, a nagy molekulású PAHok igen (Alves et al. 2021). Az irodalomban egyedi PAHokra *Vibrio* EC₅₀ értékek gyakorlatilag alig állnak rendelkezésre, El-Alawi et al. például 12 olyan PAH EC₅₀ értékét adja meg, amelyek nem teljes mértékben tartalmazzák az általunk általában vizsgált 16 EPA PAH-ot (a munkában szerepelnek acenafén, antracén, fenantrén, naftalin és pirén). A tanulmányok általában komplex mátrix, PAH-okkal szennyezett üledék- és vagy talajminták vizsgálatát tárgyalják (pl. Hwang et al. 2021, Wang et al. 2024). Célzott vizsgálatokat javasolnék végezni egyedi PAH-ok ill. ezek kombinációi ökototoxicitásának megállapítására, szilárd fázisú mátrixból.

Tekintettel arra, hogy a műanyagok felhasználása és értelemszerűen ezek hulladékként történő megjelenése növekvő tendenciát mutat, további irány lehet a műanyagok égetésekor a légkörbe kerülő, potenciálisan toxikus vegyületek, pld. polibrómozott-difenil-éterek (PBDE), biszfenolok vizsgálata. Ezek közvetlen *Vibrio*-ra gyakorolt toxicitása nem ismert.

A specifitás vizsgálatához, amellet, hogy nagyszámú komponenssel végzünk méréseket, informatívnak tartanám ezek hatásmechanizmusának meghatározását. Erre viszont jelen pillanatban laboratóriumunk nincsen felkészülve.

Hivatkozások

- El-Alawi, Y. S., McConkey, B. J., Dixon, D. G., & Greenberg, B. M. (2002). Measurement of short-and long-term toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons using luminescent bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 51(1), 12-21.
- Hirmann, D., Loibner, A. P., Braun, R., & Szolar, O. H. (2007). Applicability of the bioluminescence inhibition test in the 96-well microplate format for PAH-solutions and elutriates of PAH-contaminated soils. *Chemosphere*, 67(6), 1236-1242.
- Hwang, K., Lee, J., Kwon, I., Park, S. Y., Yoon, S. J., Lee, J., ... & Khim, J. S. (2021). Large-scale sediment toxicity assessment over the 15,000 km of coastline in the Yellow and Bohai seas, East Asia. *Science of the Total Environment*, 792, 148371.
- Leistenschneider, D., Cachot, J., Eyheraguibel, B., Calvès, I., Lavergne, É., Balluais, G., ... & Meistertzheim, A. L. (2026). Manuscript Title: Chemical and toxicological fingerprints of polyethylene primary microplastics deployed along nine European rivers. *Journal of Hazardous Materials*, 141055.

- Liang, B., Zhong, Z., Zhang, L., & Sun, D. (2025). Focus on the toxicology of deep-sea mining: Biotoxicity of heavy metals to *Vibrio fischeri* released from disturbed surface sediments of the western Clarion-Clipperton Zone, Pacific Ocean. *Marine Environmental Research*, 107769.
- Tzamaria, A., Dailianis, S., Velona, M., Beobide, A. S., Eleftherianos, A., Triantafyllidis, V., & Antonopoulou, M. (2025). Physicochemical transformation and toxic potential of polyethylene terephthalate (PET) fragments exposed to natural daylight. *Chemical Engineering Journal Advances*, 22, 100763.
- Yang, G., Wang, L., Gu, W., Gu, J., Fan, D., Liang, M., ... & Wang, Z. (2024). Soil ecological risk assessment of ten industrial areas in China based on the TRIAD and VIKOR methods. *Ecological Indicators*, 166, 112270.
- Yang, S., Shao, Z., Jin, L. N., Chen, L., Zhang, X., Fang, M., ... & Chen, J. (2025). Distinct baseline toxicity of volatile organic compounds (VOCs) in gaseous and liquid phases: Mixture effects and potential molecular mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 485, 136890.

4.

Az értekezésben leírtak szerint a lumineszcenciás mérések eredményeit korrigálni kell, ha színes (vörös iszap) és/vagy zavaros oldatok esetén. Mi ennek a korrekciónak az alapelve?

Válasz

A *Vibrio fischeri* tesztorganizmus alkalmazását leíró első szabvány az MSZ EN ISO 11348-1:2000: Víztisztaság. Vízminták gátló hatásának meghatározása a *Vibrio fischeri* fénykibocsátására (lumineszcenciabaktérium-teszt). Ezzel a szabvánnyal, illetve az ezzel kompatibilis ToxAlert100® készülékkel a Flash rendszer bevezetése előtt dolgoztunk. A mérési elv a következő: alkalmazunk egy abszolút kontrollt, ez a baktériumkithez mellékelt ún. standard tengervíz (a tesztbaktériumok természetes közege az óceán). Ehhez adjuk hozzá a baktériumszuszpenziót, majd az expozíciós idő leteltével megmérjük a biolumineszcencia szintjét. Ehhez képest a minta, ill. az ebből készített hígítási sor lehet színes és/vagy tartalmazhat lebegő, szuszpendált komponenseket. Ezek a faktorok önmagukban, tényleges toxikus anyag jelenléte nélkül csökkentik a készülék által mért lumineszcenciát.

A Flash rendszer (ISO 21338:2010) ezzel szemben nem egy abszolút kontrollhoz, hanem az adott minta toxikus hatás bekövetkezése előtti állapothoz számítja a toxicitást. A mintához a készülék hozzáadagolja a baktériumszuszpenziót, ezt nevezzük 0. időpillanatnak. A baktériumok ekkor már túlestek a reszuszpenzió fázisán, azaz tökéletesen aktívak és működőképesek. A fénykibocsátást ugyanakkor még nem befolyásolja a minta esetlegesen toxikus jellege. Ehhez az állapothoz viszonyítjuk a beállított expozíciós idő leteltkor bekövetkezett állapotot.

A korrekciós faktor alkalmazására azért van szükség, mert vizsgálataink szerint a baktériumok viselkedése, aktivitása, azaz lumineszcenciája időben változik. Az alábbi ábra egy ilyen mérést mutat be, azaz párhuzamosan 3 kontroll mérést végeztünk 100 perc maximális expozíciós időtartammal. Látható, hogy a baktériumok fénykibocsátása, azaz aktivitása időben változik (ehhez hasonló ábra szerepel a dolgozat 26. oldalán).

A korrekciós faktor tehát azt az aktivitás-változást veszi figyelembe, amelyet a tesztbaktériumok az idő elteltével természetesen mutatnak. Gyors változás először a 20-40 perc

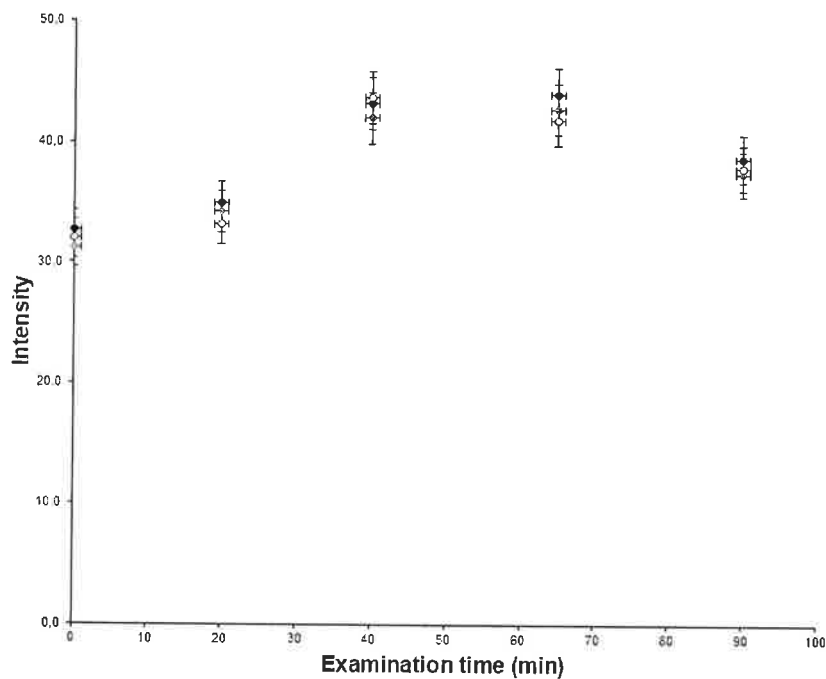
expozíciós idő alatt következik be, azaz abban az intervallumban, amelybe az általunk rendszeresen alkalmazott 30 perces expozíció is esik.

A korrekciós faktor (KF) számítása: $KF = IC_{30}/IC_0$, ahol

IC_{30} = a kontrollban mért lumineszcencia-intenzitás 30 perc expozíció után, RLU-ban kifejezve

IC_0 = a kontrollban mért kezdeti lumineszcencia-intenzitás, RLU-ban kifejezve.

Feltételezve, hogy a baktériumok aktivitása, 'életciklusa' hasonlóan változik a minták esetében is, a toxikus hatástól függetlenül, ezt a korrekciós faktort extrapoláljuk a minták esetében.



• Control sample #1 ♦ Control sample #2 ○ Control sample #3

C = a