

A FOSZFORÉN ELŐÁLLÍTÁSA ÉS FELÜLETI REDOXI REAKCIÓI

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

DEÁK CORA

TÉMAVEZETŐK:
PROF. DR. KUKOVECZ ÁKOS
PROF. DR. VAJTAI RÓBERT



KÖRNYEZETTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA
SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
ALKALMAZOTT ÉS KÖRNYEZETI KÉMIAI TANSZÉK

SZEGED
2024

ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A nanotechnológia az elmúlt évtizedekben jelentős, a tudomány és a technika valamennyi területén meghatározó szerepet betöltő szakterületté vált. A nanoanyagok egyik leghíresebb képviselője, a grafén felfedezése új forradalmat indított el a kapcsolódó kutatási területeken, ami hozzájárult a katalízis, a szenzorika és a vezeték nélküli internet fejlesztéséhez, de jelen van a gyógyszeriparban, sejterápiában, élelmiszerbiztonságban, víztisztításban, mikroelektronikai eszközökben, kozmetikában, textiliparban, optikai készülékekben, energiatárolásban is –mondhatni, mindenhol körülvesz minket.

A grafén előállítása először grafitrétegek ragasztószalagos elválasztásával történt. Mára a hasonló megközelítéssel felfedezett egyéb kétdimenziós (2D) anyagok előállítása, jellemzése és felhasználása is jelentőssé vált. Ilyen például doktori munkám tárgya, a foszforén is, ami a feketefoszfor réteges allotróp módosulata.

A foszforén tulajdonságai jól kihasználhatók. Nagy fajlagos felülete – mely főként funkcionális módosításokra alkalmas – kiváló a gyógyszer szállítás szempontjából, a nanofelületek fejlesztésében, illetve a nagy fajlagos felület kimagasló reakcióképessége miatt szenzorok hangolásában is előnyös. Alkalmazása elsődlegesen a mintát alkotó egyedi rétegek számától függ. A foszforén nagy potenciált mutat a biokatalízisben, fotokatalízisben, valamint heterogén és homogén katalízisben is. Az orvostudományban a foszforén alkalmazhatóságát a gyógyszer szállítástól kezdve az implantátumokon keresztül a fototerápiáig sok területen vizsgálják. Bioszenzorként, immunoglobulin, mioglobulin detektálásra, valamint gyógyszerhordozóként is alkalmazzák.

A szakirodalom feldolgozása alapján látható, hogy habár a foszforén alkalmazási potenciálja jelentős és sok új lehetőséget hordoz magában, elterjedését két fő probléma akadályozza, úgymint a 2D-s szerkezet precíz kialakítása, illetve a felület könnyű oxidálhatósága. Doktori munkám során, amelyben a feketefoszfor különböző oldószerekben történő delaminálásnak hatékonyságát és a termékek redoxi viselkedését vizsgáltam, ezen problémák megoldására kerestem a választ. Foglalkoztam a kialakult delaminált réteg oxidációjával, valamint a folyamat visszafordításának és megakadályozásának lehetőségeivel is. Konkrét céljaim a következő pontokban foglalhatók össze:

- Oldószerhatás vizsgálata a folyadékfázisú ultrahangos delaminálás foszforénszintézisben. A víz hatásainak megfigyelése a foszforén lapok

kialakulására a különböző víz-oldószer elegyekben, és a különböző oldószerekben előállított foszforén vizsgálata a végbemenő oxidációs folyamat behatóbb megismerése céljából. Olyan delamináló folyadék keresése, amely környezetbarát és a megfelelő hatásfokot lehet vele elérni a foszforén lapok minőségének, valamint a delaminálás idejének tekintetében is.

- Vizes közegű delaminálással előállított foszforén lapok oxidációját és az oxidáció folyamatának követését Raman-spektroszkópiával lehet jellemezni.
- A foszforén védelme az oxidációtól inert hexagonális bór-nitrid lapok segítségével, a részben oxidált anyag oxidáltsági szintjének megőrzése, valamint a kapcsolódó redoxi folyamatok valós idejű követése.
- A levegőn oxidálódott foszforén redukálhatóságának vizsgálata hidrazinnal, valamint az oxidációs–redukációs folyamat ciklikus ismételhetségének vizsgálata.

Úgy gondolom, hogy e célok elérése segítheti a műszaki-tudományos közösséget abban, hogy valós, mindennapi körülmények között is használható eszközöket készítsünk foszforén alapon. Emellett a célok eléréséhez vezető út módszertana átvihető lehet más 2D anyagok kutatására is, ezzel kiterjesztve kutatómunkám alkalmazhatóságát egy szélesebb tudományos területre.

KÍSÉRLETI RÉSZ

Kísérleteimet három fő csoportba lehet osztani, melyekbe a delaminálás, a felületi redoxi viselkedés vizsgálata, valamint a passziválás tartozik. A három folyamat első lépése (delaminálás) megegyezett, de változó oldószerekben történt meg (acetonban és különböző arányú IPA-víz elegyekben). Második lépésként végigkísértem a tömbfázisból való delaminálódást, végül a kapott rétegek levegő hatására mutatott érzékenységét, illetve redukcióját és teljeskörű védelmét vizsgáltam. Az oxidációs passziválás h-BN fedéssel történt meg, az oxidáció redukciós visszafordítását pedig hidrazin-hidrát oldattal végeztem.

A feketefoszfor kristályokat a HQ+Graphene forgalmazótól (Grotingen, Hollandia) szereztem be, és sötét falú, szeptumos kupakkal lezárt üvegcsében tároltam. A sötét üvegben való tárolás fő oka az anyag fény hatásától való megvédése volt. A szeptumos kupak használata azért volt szükséges, mivel segítségével argon gáz (illetve egy esetben oxigén) volt biztosítható az üvegcsében. Az argon gázzal történő átmosás áramlási sebessége 1 ml/perc volt.

A feketefoszfor kristály delaminálása izopropanol (IPA) és desztillált víz (MilliQ- MQ) meghatározott összetételű elegyével történt. A MQ víz elektromos vezetőképessége szobahőmérsékleten (24,5 °C) 3,17 μ S volt. Meghatározott mennyiségű (4 mg) feketefoszfor kristályt mértem be az üvegcsébe, amihez 10 mL oldószer elegyet adtam. Az IPA-víz arány volt változó a kísérletsorozat során: 0, 30, 70, 100 v/v% IPA összetételű elegyeket vizsgáltam. Az így előkészített mintákat tartalmazó üvegcséket szeptumos kupakkal zártam le, amin keresztül argon gázzal öblítettem őket 1 ml/perc áramlási sebességgel 5 percen át, annak érdekében, hogy oxigénmentes környezetet biztosítsak a további lépésekhez és így megelőzzem a foszfor oxidációját a delaminálási folyamat közben. A minta delaminálását ultrahangos (UH) fürdőben végeztem (120 W, 35 kHz), ahol kavitáció alakult ki a delamináló folyadékban. Így az oldószer molekulái be tudnak jutni a minta rétegei közé, amik ennek hatására szétesnek, vagyis delaminálódnak. A folyamat 6 órán keresztül ment végbe, a hőmérsékletet az UH fürdőben folyamatos víz áramoltatással 22 °C-ra szabályoztam. A sikeres delaminálás indikátora a szuszpenzió színe, ami szürkésbarna volt. A 6 órás szonikálás után a mintákat állni hagytam, így a gravitáció hatására a nagyobb részecskék leülepedtek, míg a kisebbeket, a felülúszókat elválasztottam egy másik üvegcsébe, amit további centrifugálás követett. A centrifugális erő hatására a lapok teljesen különváltak. A centrifugálás 4000 fordulatszámon (rpm) történt 15 percen át, ami 1792 G erővel egyezik meg.

A foszforén felületi oxidációjának és redukciójának vizsgálatokor a kimért tömegű (4 mg) mintát üvegcsébe helyeztem és 10 ml acetont adtam hozzá. Az üveg teteje szeptumos kupakkal lett lezárva, hogy argongázzal történő atmoszással inert atmoszférát biztosítsak. Az atmoszáss folyamata 5 percig tartott, majd a delaminálás UH fürdőben ment végbe adott paraméterekkel 22 °C-on 20 órán keresztül. A delaminálás eredménye egy szürkésbarna szuszpenzió lett. A minta 24 órán át történő ülepedése közben a szuszpenzió színe barnássárgává változott. A felülúszó elválasztása után a kiülepedett frakciót újabb aceton mennyiséggel delamináltam, amit centrifugálás követett. A két delaminálás után kapott szuszpenziót egyesítettem, majd centrifugálás történt 2000 és 4000 fordulatszám (448 és 1792 G) 30 percen keresztül. A szuszpenzió oxidálódását oxigéngázzal értem el: az üvegcsébe oxigéngázt áramoltattam be 10 percen át 1 ml/perc sebességgel. A levegőn hagyott foszforén lapok, melyeket szilícium lapra cseppentettem a Raman-spektroszkópia vizsgálatokhoz, az idő elteltével oxidálódtak.

A h-BN felületvédelmi kísérletekben a feketefoszfot a már leírt módon aceton hozzáadásával delamináltam. A hexagonális bór-nitridet folyadék fázisú delaminálással aceton hozzáadásával végeztem el. A feketefoszfot kristályból és a h-BN porból 4-4 mg lett bemérve egy üvegcsébe. A bemért aceton mennyisége mindkét anyag esetében 10 ml volt. Amíg a foszfot tartalmazó üvegecske át lett mosva argon gázzal, az alapján ahogyan korábban is elvégeztem, a h-BN levegőn lett delaminálva, mivel nem érzékeny a levegőre. Delaminálás UH fürdőben, 22°C-on 20 órán át végeztem, a hőmérsékletét a kádon folyamatosan átfolyó vízzel tudtam szabályozni. Az UH kezelés után kapott szuszpenzió színe különböző volt: a BP szürkésbarna, míg a h-BN fehér, ami az ülepités után sem változott. A minták centrifugálása 4000 fordulatszám (4000 G) 20 percen keresztül. Mindkét esetben a felülúszót használtam, míg a leülepedett részt aceton hozzáadásával újra tudtam delaminálni az UH fürdőben.

Oxidált foszforénfelületek redukciójához hidrazin-hidrátot (50%) használtam. A redukció kétféle módon történt: az egyik módszer szerint a hidrazin oldatot az oxidált foszforén felületére cseppentettem a szilícium lapon, majd a felületet száradni hagytam. A másik módszer során a szuszpenzióhoz adtam hozzá, abban az esetben, amikor oxidált szuszpenzióm volt. Ebben az esetben UV-látható spektroszkópiával mértem meg az oxidált mintát.

A foszforén és h-BN lapok jellemzését különböző mérésekkel végeztem: dinamikus fényszórás (DLS), zéta-potenciál mérés (ζ -potenciál), atomerő mikroszkóp (AFM), Raman-spektroszkópia, ultraibolya-látható (UV-Vis) spektroszkópia, transzmissziós

elektronmikroszkópia (TEM), pásztázó elektronmikroszkópia (SEM), röntgen-fotoelektron spektroszkópia (XPS), röntgendiffraktometria (XRD) és elektromos ellenállásmérés (feszültség-áramerősség karakterisztika, I-V görbe). Közülük kiemelten fontos volt a Raman-spektroszkópia, mivel a delaminálás sikerességét leggyorsabban ezzel lehet megvizsgálni. A legérzékenyebb a rétegszám változásra az A_{2g} Raman-mód, amely monoréteges foszforénben akár $2,0\text{ cm}^{-1}$ -el tud mozdulni a tömbfázishoz képest. A Raman-spektroszkópia másik előnye, hogy az A_{1g} és A_{2g} csúcsok intenzitásaránya korrelált az oxidáció fokával: redukált mintákban az arány nagy (0,6 körüli), oxidált mintákban pedig 0,5 alá csökken.

Tapasztalataim értelmezéséhez olyan elméleti kémiai számítások eredményeit is felhasználtam, amiket együttműködő partnerünk végzett.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1 A foszforén feketefoszfór alapú, folyadékfázisú, környezetbarát oldószerben történő ultrahangos delaminálással kapcsolatos eredmények

T1.1 Az irodalomban elsőként használtam IPA-víz elegyet foszforén feketefoszforból kiinduló folyadékfázisú delaminálásra. Bizonyítottam, hogy a szakirodalomban megtalálható véleményekkel szemben a delaminálási folyamat nem csak szerves oldószerekben valósítható meg, valamint, hogy a víz jelenléte nem erősíti fel lényegesen a foszforén oxidációját előállítás közben.

T1.2 Megmutattam, hogy a 30 v/v% IPA tartalmú IPA-víz elegy jelenti az optimális delamináló folyadék a foszforén feketefoszforból kiinduló környezetbarát oldószeres folyadékfázisú előállítására. Az így előállítható termék átlagos hidrodinamikai átmérője 118 nm, polidiszperzitási indexe 0,3, zéta potenciálja -32 mV, és nagy arányban tartalmaz foszforén monorétegeket.

T2 Szilárd hordozóra felvitt foszforén oxidatív degradációjának hidrazin-hidrátos visszafordításával kapcsolatos eredmények

T2.1 Az irodalomban elsőként redukáltam kevés rétegből álló oxidált foszforént úgy, hogy a minta szilárd hordozón volt, a redukciós reakciót pedig szobahőmérsékleten, előkezelést vagy speciális reakciókörülményeket egyáltalán nem igénylő cseppreakcióként valósítottam meg. XPS mérések szerint a delaminálás után oxidált mintában 39% volt az elemi foszfor részaránya, ami redukcióval a másfélszeresére, 57%-ra volt javítható.

T2.2 Bizonyítottam, hogy a T2.1 pontban kidolgozott redukciós módszer alkalmas a felületen rögzített foszforén ismételt regenerálására is. Megmutattam, hogy egy foszforén minta legalább ötször oxidálható levegőn és redukálható hidrazin-hidrát oldat cseppentéssel úgy, hogy mindannyiszor visszanyerhető a redukált állapotra jellemző Raman A_{1g}/A_{2g} csúcsintenzitás-arány. Bizonyítottam azt is, hogy a foszforén oxidált és redukált állapotaira jellemző I–V karakterisztikák legalább három cikluson keresztül reprodukálhatók ugyanannak a mintának a levegős oxidációjával és hidrazin-hidrátos redukációjával.

T2.3 Bizonyítottam, hogy a T2.2 pontban említett öt oxidáció–redukció ciklus alatt a foszforén rétegvastagsága nem változik meg. Ez azt mutatja, hogy nem oxidatív rétegbontást, majd ezt követően mindig új, friss foszforén felületet látunk a kísérletben, hanem ténylegesen ugyanazt a foszforén réteget oxidáljuk és redukáljuk ismételtén. Megmutattam azt is, hogy az oxidáció és a redukció sebessége az első teljes ciklust követően állandónak tekinthető. A foszforén oxidációjához átlagosan 41, redukációjához pedig 76 percre volt szükség az adott reakciókörülmények között.

T3 Szilárd hordozóra felvitt foszforén oxidatív degradációjának megakadályozásával kapcsolatos eredmények

T3.1 Elsőként mutattam meg, hogy egy szilárd hordozón rögzített foszforén lap szobalevegőn történő teljes oxidációja úgy is megakadályozható hexagonális bór-nitrid lapokkal történő fedéssel, ha a h-BN felvitele nem irányítottan, azaz mechanikai úton történik. A fedést folyadékfázisú ultrahangos delaminálással előállított h-BN rétegekből készített szuszpenzióval a friss foszforén felületre cseppentésével megvalósítva az eljárás termelékenysége lényegesen javítható. Ugyanakkor tény, hogy irányítatlan fedéssel a teljes védelmet még nem sikerült elérni. Bár a Raman A_{1g}/A_{2g} csúcsintenzitás-arány több órán keresztül is állandó volt (nem csökkent a kiindulási, friss foszforénre jellemző értékhez képest), XPS mérések tanúsága szerint a foszforén + h-BN szendvics szerkezetben sem 100%, csak 81% volt az elemi foszfor aránya. A maradék 19%-ot oxidált foszfor speciesek tették ki.

T3.2 Bizonyítottam, hogy egy szilárd hordozón rögzített foszforén lap szobalevegőn történő oxidációja szabályozottan megállítható folyadékfázisú ultrahangos delaminálással előállított h-BN rétegekből készített szuszpenzió felcseppentésével. A folyamathoz megvárjuk, hogy a friss foszforén szobalevegőn történő oxidációja miatt a Raman A_{1g}/A_{2g} csúcsintenzitás-arány egy kívánt értékre csökkenjen. Ezen a ponton a felületet 2D h-BN szuszpenzióval fedve további csúcsintenzitás-arány csökkenés, azaz további oxidáció már nem következik be.

T3.3 Elméleti kémiai számítási eredményeket felhasználva értelmezni tudtam a h-BN és a foszforén oxidációs érzékenysége közötti jelentős különbséget. A lapok szélein kialakuló, foszforén és h-BN lapokat összekötni képes oxidkötések lehetőségének megtalálása révén sikerült magyarázatot találni arra, hogy miért nem képesek az oxigén molekulák a foszforén + h-BN szendvics rendszer rétegei közé behatolva folytatni a foszforén oxidációt egy passzívált rendszerben.

AZ EREDMÉNYEK KÖRNYEZETTUDOMÁNYI VONATKOZÁSAI ÉS GYAKORLATI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Doktori kutatómunkám eredményei elsősorban alapkutatás jellegűek, közvetlen gyakorlati alkalmazásuk nincs. Mivel azonban a foszforén a jövő 2D anyagaira épülő alkalmazások egyik fontos alkotója lehet, ezért megfigyeléseim távlatilag biztosan segíteni fogják a foszforén alapú mikroelektronika és a szenzorika fejlődését.

Munkám legfontosabb eredményének azt tartom, hogy módszert javasoltam a szilárd felületre rögzített és ott oxidatív degradációt szenvedő foszforén redukciós szerkezetének redukcióval történő visszaállítására, és megmutattam, hogy a folyamat legalább ötször ismételhető is. Ezzel a megközelítéssel lehetőség nyílik foszforén aktív áramköri elemek (pl. szenzor vagy FET) élettartamának hosszabbítására anélkül, hogy meg kellene oldani az eszköz környezetének folyamatos oxigénmentesítését. Érdekes alkalmazási potenciált látok a részlegesen oxidált foszforén h-BN bevonással történő stabilizálásában is. Így hangolható elektromos tulajdonságú foszforén alapú eszközöket lehetne készíteni úgy, hogy a különböző tiltott sáv szélességű aktív elemek készítésének kémiai és fizikai lépései is teljesen azonosak, az egyetlen különbség a friss foszforén levegőexpozíciójának ideje lenne.

Az eredmények legfontosabb környezettudományi kapcsolódási pontját az jelenti, hogy a fentiek szerint a foszforén alapú eszközök élettartama meghosszabbítható lesz, ezért ritkábban kell majd cserélni őket. Zöld kémiai szempontból kedvező még a folyadékfázisú ultrahangos delaminálási eljárásokban szokásos szerves oldószerek kiválthatósága vízzel, illetve nagy víztartalmú IPA-víz eleggyel.

A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ALAPJÁN KÉPEZŐ KÖZLEMÉNYEK

1. Hexagonal Boron Nitride Nanosheets Protect Exfoliated Black Phosphorus Layers from Ambient Oxidation

Bartus P. Cora, Hegedűs T., Oliveira E. F., Berkesi D., Szamosvölgyi Á., Kónya Z., Vajtai R., Kukovecz Á.

ADVANCED MATERIALS INTERFACES, 2022, Q1, (2196-7350 2196-7350): 9
24 Paper 2200857. 8 p.

DOI: 10.1002/admi.202200857

IF: 5,4

Független hivatkozás: -

2. Exfoliation of black phosphorus in isopropanol-water cosolvents

Bartus P. Cora, Hegedűs T., Kozma G., Berkesi D., Szent I., Vajtai R., Kónya Z., Kukovecz Á.

JOURNAL OF MOLECULAR STRUCTURE, 2022, Q2, (0022-2860 1872-8014):
1260 Paper 132862. 5 p.

DOI: 10.1016/j.molstruc.2022.132862

IF: 3,84

Független hivatkozás: 1

3. In situ regeneration of oxidized phosphorene by hydrazine

Bartus P. Cora, Kozma G., Sebők D., Szamosvölgyi Á., Sági A., Vajtai R., Kónya Z., Kukovecz Á.

(benyújtás alatt lévő kézirat)

A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KONFERENCIA MEGJELENÉSEK

1. Functionalized few-layer black phosphorus for potential gas sensing applications

Bartus P. Cora, Gomez P. Juan, Kónya Z., Kukovecz Á.

SIWAN 8: 8th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience, Szeged, 2018A

2. HOPG mikromechanikai hámlásának vizsgálata

Bartus P. Cora, Gomez P. Juan, Kónya Z., Kukovecz Á.

Magyar Mikroszkópos Konferencia, 2019 (előadás)

3. A feketefoszfor ismételt oxidációjának és redukciójának hatása a szerkezetre

Bartus P. Cora, Gomez P. Juan, Kónya Z., Kukovecz Á.

XLII. Kémiai Előadói Napok, 2020 (előadás)

4. A feketefoszfor ismételt oxidációja és redukciója

Bartus P. Cora, Gomez P. Juan, Kónya Z., Kukovecz Á.

10. Környezetkémiai Szimpóziuma, 2021 (előadás)

EGYÉB KÖZLEMÉNYEK

1. Oxidation of cysteinate anions immobilized in the interlamellar space of CaAl-Layered Double Hydroxide

Timár Z., **Bartus P. Cora**, Kónya Z., Kukovecz Á., Sipos P., Varga G., Palinko I.

MATERIALS, 2021, Q2, (1996-1944): 14 5 Paper 1202. 10 p.

DOI: 10.3390/ma14051202

IF: 3,75

Független hivatkozás: 1

2. C 60 Br 24 /SWCNT: A Highly Sensitive Medium to Detect H₂S via Inhomogeneous Carrier Doping

Zhou J., Bagheri M., Järvinen Topias, **Bartus P. Cora**, Kukovecz Á., Komsa Hannu-Pekka, Kordás K.

ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES, 2021, Q1, (1944-8244 1944-8252): 13 49 pp 59067-59075

DOI: 10.1021/acsami.1c16807

IF: 10,38

Független hivatkozás: 2

3. Electronic work function modulation of phosphorene by thermal oxidation

Gomez P. Juan, **Bartus P. Cora**, Szamosvölgyi Á., Sági A., Kónya Z., Kukovecz Á.

2D MATERIALS, 2022, Q1, (2053-1583): 9 1 Paper 015003. 7 p.

DOI: 10.1088/2053-1583/ac2f21

IF: 5,44

Független hivatkozás: 2

4. Dangling-to-Interstitial Oxygen Transition and Its Modifications of the Electronic Structure in Few-Layer Phosphorene

Gomez P. Juan, Correa J.D., **Bartus P. Cora**, Kónya Z., Kukovecz Á.

JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C, 2020, Q1, (1932-7447 1932-7455): 124
44 pp 24066-24072

DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c06542

IF: 4,13

Független hivatkozás: 3

5. Resolving a structural issue in cerium-nickel-based oxide: a single compound or a two-phase system

Kojcinovic J., Tatar D., Saric S., **Bartus P. Cora**, Mavric A., Arcon I., Jaglicic Z., Mellin M., Einert M., Altomare A., Caliendo R., Kukovecz Á., Hofmann J. P., Djerdj I.

DALTON TRANSACTIONS, 2023, Q1

DOI: 10.1039/d3dt03280a

IF: 3,5

Független hivatkozás: -

6. Comparison of advanced oxidation processes in the decomposition of diuron and monuron - efficiency, intermediates, electrical energy per order and the effect of various matrices

Farkas J., Nafradi M., Hlogyik T., **Bartus P. Cora**, Schrantz K., Hernadi K., Alapi T. ENVIRONMENTAL SCIENCE-WATER RESEARCH & TECHNOLOGY, 2018, Q1, (2053-1400 2053-1419): 4 9 pp 1345-1360

DOI: 10.1039/C8EW00202A

IF: 4,4

Független hivatkozás: 19

7. Solar-driven removal of selected organics with binary ZnO based nanomaterials from aquatic

Szabolcs Bognár, Dušica Jovanović, Predrag Putnik, Vesna Despotovic, Tamara Ivetic, Branimir Bajac, Elvira Đurđić, Nina Finčur, Ivana Maksimovic, Marina Putnik Delic, Nemanja Banić, Ivana Jagodić, **Bartus P. Cora**, Kozma G., Daniela Sojic Merkulov.

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING, 2024, Q1,

DOI: 10.1016/j.jece.2024.112016

IF: 13,3

Független hivatkozás: -

8. Banana Peel Extract-Derived ZnO Nanopowder: Transforming Solar Water

Dušica Jovanović, Szabolcs Bognár, Vesna Despotovic, Nina Finčur, Sandra Jaksic, Predrag Putnik, Cora Deák, Gábor Kozma, 5,4Branko Kordic, Daniela Sojic Merkulov.

FOODS, 2024, Q1,

DOI: foods-3145767

IF: 4,7

Független hivatkozás: -

TUDOMÁNYMETRIAI ADATOK

Összes referált közlemény: 10

ebből az értekezéshez kapcsolódik: 2

Összesített impakt faktor: 58,84

ebből az értekezéshez kapcsolódik: 9,24

Összes független hivatkozás: 28

ebből az értekezéshez kapcsolódik: 1