

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**FOTOSZINTETIKUS RENDSZEREK
BIOKOMPOZITOKBAN**

Hajdu Kata

Témavezető: Dr. Nagy László

Fizika Doktori Iskola

Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet

Természettudományi és Informatikai Kar

Szegedi Tudományegyetem

2014

Szeged

Bevezetés

A természet által évmilliók alatt kifejlesztett és tökéletesített élő rendszerek utánozhatatlan pontossággal képesek elvégezni a létfenntartó folyamataikat. Működésük a biológiai szerveződés bármely szintjén rendkívül specifikus, érzékeny és hatékony. Számos kutatás foglalkozik a biológiai anyagok jobb megismerésével, hiszen az egyes biológiai mechanizmusokat felfedezve és megértve nem csak a természet kreativitására lehet rácsodálkozni, hanem új ötletek és felhasználási lehetőségek tárháza is megnyílik előttünk.

Vitathatatlan, hogy a földi élet kialakulásában és jelenlegi formájának fenntartásában a fény különösen fontos szerepet játszik. Az élő szervezetekben több folyamat is kapcsolódik a fényenergia átalakításához, mint például a látás, a növények morfológiai szabályozásáért felelős fitokrómrendszer működése, de talán az egyik legfontosabb a fotoszintézis folyamata. A fényenergia kémiai energiává alakítása nélkül nem jöhetett volna létre a földi élet jelenlegi formája. A földi bioszféra kialakulásának és fenntartásának is alapja a napenergia, amelynek leghatékonyabb átalakítását a fotoszintetizáló szervezetek végzik.

A fotoszintézis igen összetett folyamat. Máig nem ismerjük minden részletét azoknak a lépéseknek, melyek végül a fény energiájának felhasználásával lehetővé teszik szerves anyag szervesetlenből való előállítását. A fotoszintézis-kutatások során egész növényi vagy bakteriális sejteket és ezekből kinyert sejtalkotókat, sőt, molekulákat egyaránt vizsgálnak. Ezek a biológiai rendszerek azonban csak természetes környezetükben működnek nagy hatékonysággal, a külső változásokra igen érzékenyen reagálnak. Ha mesterséges körülmények között szeretnénk őket vizsgálni, megfelelő környezetet kell számukra biztosítani.

Napjainkban különös figyelem fordul az ún. (bio)kompozit anyagokra, melyekben lehetséges olyan jól szabályozott környezetet biztosítani a vizsgálni kívánt biológiai anyagnak, amely mellett idegen környezetben is jól megőrzi aktivitását. Általában egy „biokompatibilis” (biológiai anyagot nem károsító) szerves vagy szervesetlen hordozón rögzítik a választott sejtet, sejtrészletet, vagy biomolekulát. Az így létrehozott összetett rendszerek a rögzített (immobilizált) anyagtól és hordozótól függően számos területen felhasználásra kerülhetnek,

többek között az orvostudományban, a talaj-, és víztisztításban, a bioelektronikában és különféle bioszenzorok kifejlesztésében.

Munkám során fénnel gerjeszthető biokompozit anyagok előállításával és karakterizálásával foglalkoztam. A hibrid anyagok „biológiai komponensei” különböző fotoszintetikus rendszerek (egész sejtek és tisztított fehérje-komplexek), a szervetlen hordozó komponensek pedig szén alapú (szén nanocső) vagy szilícium származékok (szilikagél, porózus szilícium) voltak. Kezdetben egész növényi sejteket rögzítettem szilikagélben és az így létrejött kompozit fotoszintetikus aktivitását jellemeztem (Université de Namur, FUNDP, Prof. Bao Lian Su laboratóriuma). A biokompozitokkal kapcsolatos munkát Szegeden is tudtam folytatni a Szegedi Tudományegyetem Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézetében, Dr. Nagy László témavezetésével. Kutatócsoportunk elsősorban bíorbaktériumokból tisztított fotoszintetikus reakciócentrum fehérjék (RC) felhasználásával készít nanokompozitokat, és azok szerkezeti és működési paramétereit jellemzi, illetve a lehetséges gyakorlati alkalmazásokat vizsgálja.

A *Rhodobacter (Rb.) sphaeroides* bíorbaktérium RC-a egyike a legjobban tanulmányozott fehérje-komplexeknek. Közel 100%-os hatékonysággal alakítja át a fényenergiát kémiai energiává fényindukált redox folyamatok által. Minden egyes elnyelt foton gerjeszti a fehérje-komplex egy speciális klorofill dimerjét. Ez a fotoszintézis első lépése, amely minimális energiavesztéssel történik. A fehérje az izolálást és tisztítást követően is hosszú ideig képes megőrizni a fotokémiai/-fizikai aktivitását. Előnyös tulajdonságaiból adódóan kiváló jelölt a fényenergia hasznosítás céljából történő tudományos kutatásokra. Vezető, félvezető hordozóanyaggal kialakított biokompozitban lehetőség nyílik az igen gyors - fs-ms-os - elektronátmenetek felhasználására különféle redox reakciókban.

A létrehozott bio-nanokompozitoknak elsősorban az optikai és az elektrokémiai tulajdonságait vizsgáltam.

Munkám során célul tűztem ki

1. *Arabidopsis thaliana* (lúdfű) egész növényi sejtek rögzítését szilícium alapú hibrid gélben szol-gél módszerrel, valamint a kompozit alapvető fotokémiai/-fizikai folyamatainak meghatározását.
2. Bio-nanokompozitok készítését *Rhodobacter sphaeroides* bíorbaktérium törzsből izolált és tisztított fotoszintetikus reakciócentrum fehérje (RC) vezető vagy félvezető hordozó anyag felületén történő fizikai és kémiai kötése révén.
 - 2.1. A fotoszintetikus reakciócentrum fehérje kémiai rögzítését aminocsoporttal funkcionizált szén nanocső (CNT) felületén. A létrehozott kompozitok szerkezeti karakterizálását (AFM, SEM), és fotoaktivitásuknak meghatározását flashfotolízis kísérletekkel.
 - 2.2. A fotoszintetikus reakciócentrum fehérjének mind kémiai, mind fizikai úton való rögzítését porózus szilícium felületéhez, a kompozitok szerkezeti meghatározását (SEM, EDX), a különböző kötések hatékonyságának kimutatását (Fourier Transzformációs Infravörös Spektroszkópia), és a RC fotokémiai/-fizikai aktivitásának meghatározását a különböző kötési eljárásokat követően (flashfotolízis kísérletek).

Anyagok és módszerek

Mintaelőkészítés, preparatív eljárások

Növényi sejt kultúra

Szuszpenzióban nevelt, *Arabidopsis thaliana* levelekből származó sejt kultúrát használtam. L-MM1, *Landberg erecta* típusú sejteket neveltem Murashige és Skoog tápoldatban (4,43 g/l, pH 5.7). Kiegészítő tápanyagként szacharózt (30 g/l), kinetint és 0,5 µg/ml NAA-t (α-naftalén ecetsav) használtam.

Fotoszintetikus reakciócentrum preparálása

Rb. sphaeroides R-26 sejtek fotoheterotróf körülmények között nevelkedtek. A RC-ok preparálása során 0,45% LDAO (N,N-dimetil-dodecilamin-N-oxid, Fluka) detergenst tartalmazó TRIS-pufferrel oldottuk ki a fehérjéket, amiket aztán ammónium-szulfátos kicsapással, majd DEAE Sephacell (Sigma) anioncserélő oszlopkromatográfiával különítettük.

Egyfalú szén nanocső (SWCNT) preparálása

A nagynyomású szénmonoxid atmoszférában készült (HiPco) szén nanocsövek tisztítása nedves oxidációs módszerrel történt, a következők szerint: 100 mg nyers HiPco SWCNT-t oxidáltak 60 ml 30%-os H₂O₂ és 110 ml 22%-os HCl elegyével. Az oldatot keverés mellett 70 °C-on, 9 órán át folyamatos reflux alatt tartották. Ezt követően szobahőmérsékletűre hűtötték, majd a nanocsöveket leszűrték, és desztillált vízzel 7-es pH eléréséig mosták. Végül 120 °C-on, 30 percig szárították.

Porózus szilícium (PSi) preparálása

A porózus szilícium minták p-típusú bór-dópolt 500-550 µm vastagságú, 0,002-0,004 Ω·cm fajlagos ellenállású és (100)-ás krisztallográfiás orientációjú lapokból nedves elektrokémiai maratásos eljárással készültek. A mikrokavitációs szerkezetben magas és alacsony porozitású rétegek váltakoznak (HL)_{x5} HH (LH)_{x5} elrendezésben, ahol H a magas, L az alacsony porozitású réteget jelöli. Minden réteg optikai vastagsága λ/4 (az általam használt minták esetében λ=700 nm), míg a közepén elhelyezkedő egymást követő két magas porozitású rétegnél λ/2. Az első réteg magas porozitású, így biztosított a jó penetráció a makromolekulák számára.

Kompozitok előállítása

Növényi sejtek rögzítése

A növényi sejteket vízmentes szol-gél módszerrel rögzítettem szilika mátrixban MTGS (metil-triglicerol szilán) segítségével. A gyantát (Acros) savas vízzel pH 0,5-1-re (37% HCl, Acros), majd pH 2-re állítottam be (HCl 1 M, Sigma), és -4 °C-ra hűtöttem le. Közvetlenül a hűtést követően összekevertem a nátrium-szilikátot és a gyantát tartalmazó oldatokat, és szűrőpapíron (VWR 417) szűrtem át. Ezt követően tiszta szol állapotú szilikát oldatot kaptam. A kompozit létrehozásához nátrium szilikát (a fent említett recept alapján), MTGS, MS 1x, MS 10x, KOH és a felnevelt sejt kultúra oldata szükséges. A preparáció folyamán fontos a pH és az ozmotikus nyomás pontos beállítása.

Reakciócentrum/szén nanocső kompozit előállítása

A RC-ot glutáraldehid (GTA) homobifunkcionális keresztkötőszerezrel kötöttem a SWCNT-hez. 50 µl GTA-et adtam 800 µl SWCNT szuszpenzióhoz, majd 10 percig 400 rpm.-en centrifugáltam. A nem kötött GTA-et dializálással távolítottam el (20 perc, foszfát puffer, pH 6,5). Ezt követően 100 µl RC-t ($c=64\text{ }\mu\text{M}$) adtam a szuszpenzióhoz, majd két órán át foszfát pufferben dializáltam (pH 7.0). A nem kötött RC-okat mosási sorozattal (pH 7.0, 0.03% LDAO) és centrifugálással távolítottam el a szuszpenzióból. Az így kapott szuszpenziót üveglapra szárítottam.

Reakciócentrum/porózus szilícium kompozit előállítása

A RC immobilizálása a PSi felületén két különböző protokollal történt. Első esetben kémiai, egy három lépéses kötési eljárással rögzítettem a RC-ot. Az első lépés a PSi felszín szilanizálása volt 3-aminopropil-trietoxiszilánnal (APTES). A RC-ot glutáraldehid (GTA) homobifunkcionális amin csoport célzott keresztkötőszerezrel rögzítettem a szilanizált PSi lapon.

A második módszer során a RC egy 12-mer peptid (szekvenciája SPGLSLVSHMQT) segítségével kapcsolódik a PSi-hez. Ez a peptid specifikus, igen erősen kötődik a p^+ -Si felületéhez, és egy erősen hidrofób felületet hoz létre. Az eljárás első lépésében a szilícium lapot sósavval deoxidáltam, majd 20 µM-os peptid-PBST (PBS-puffer, 0,1% Tween 20) oldatban 2 órán át inkubáltam. A nem kötött peptidet PBST-vel távolítottam el a felszínről.

Új eredmények

Tudományos eredményeim alapján a következő megállapításokat teszem:

1. *Arabidopsis thaliana* (lúdfű) egész növényi sejteket sikerrel rögzítettem szilícium alapú hibrid gélben, szol-gél módszerrel. A növényi sejtek a kötési eljárást követően is megőrizték aktivitásukat, ahogyan azt a fotoszintetikus oxigénfejlesztő képességük is mutatta. (Meunier és mtsai., Langmuir, 2010)

2. Bio-nanokompozitokat készítettem *Rhodobacter sphaeroides* bíborbaktérium törzsből izolált és tisztított fotoszintetikus reakciócentrum fehérje (RC) vezető és félvezető hordozó anyagok felületén történő rögzítése révén. A RC-okat kémiai és fizikai módszerrel kötöttem a hordozó felületre.

2.1. A fotoszintetikus reakciócentrum fehérjét kémiai úton, glutáraldehid keresztkötő vegyület alkalmazásával egyfalú amin-csoporttal funkcionalizált szén nanocső (SWCNT) felületéhez kötöttem. (Boldog és mtsai., Physica Status Solidi B, 2013)

a) A szerkezeti vizsgálatok (AFM, SEM) azt mutatták, hogy a RC egy rétegben kötődött a szén nanocsőhöz.

b) A flashfotolízis kísérletek alapján az immobilizált RC-ok a kötést követően is megtartották fotoaktivitásukat.

c) Fénygerjesztést követően keletkezett oxidált klorofill dimer (P⁺) életideje jelentősen megnőtt a komplexekben ($\tau=1200$ ms és 3100 ms detergens micellában, egyfalú szén nanocsőhöz kötve).

d) Az élettartam növekedése magyarázható azzal is, hogy a szén nanocső környezetében a RC-on belüli töltéspár stabilizálódott, de korábbi vizsgálatainkból arra is következtethetünk, hogy a RC és a szén nanocső között közvetlen redoxkapcsolat valósult meg.

2.2. A fotoszintetikus reakciócentrum fehérjét kémiai úton, glutáraldehid keresztkötő vegyület alkalmazásával, valamint specifikus peptid segítségével

szilanizált porózus szilícium felületéhez kötöttem. (Hajdu és mtsai., Langmuir, 2012; Hajdu és mtsai., Nanoscale Research Letters, 2012)

a) A szerkezetvizsgálati és optikai reflexiómérések (SEM, EDX) azt mutatták, hogy a RC mindkét esetben kötődött a porózus szilíciumhoz.

b) A kötődés leírható volt a reflexiós spektrumra jellemző módus eltolódásának telítési jellegű kinetikájával, ami azt mutatja, hogy a RC beépült a porózus szilícium fotonikai rendszerébe.

c) A telítődés maximumának a feléhez mindkét esetben kb. 3 μM RC koncentráció volt szükséges, de a reflexiós spektrum módusa nagyobb mértékben tolódott el a peptid alkalmazásakor ($\Delta\lambda_{\text{max}} = 59(\pm 5)$ és $38(\pm 8)$ nm a peptid és a glutáraldehid alkalmazásakor).

d) A flashfotolízis kísérletek eredményei azt mutatják, hogy a RC a porózus szilíciumhoz történő rögzítés után is aktív maradt. A fénygerjesztést követően keletkezett oxidált klorofill dimer (P^+) életidejének időbeli lecsengése a peptiddel kezelt mintában egykomponensű ($\tau = 27$ ms), míg a glutáraldehiddel rögzített mintában kétkomponensű ($\tau_1 = 14$ ms, $\tau_2 = 230$ ms).

e) A sorozatos fénygerjesztés után mérhető volt a citokróm oxidáció, ami terbutrinnal gátolható volt. Ez arra utal, hogy a kötődés után a RC donor és akceptor oldala ezen kofaktorok számára hozzáférhető, és a RC a környezetében levő kofaktorokkal redoxkapcsolatban maradt.

Közlemények

a, A disszertáció alapjául szolgáló közlemények

- 1, Meunier, C. F., Rooke, J. C., Hajdu, K., Cutsem, P. V., Alexandre, P. C., Léonard, A., Su, B. L. (2010) Insight into cellular response of plant cells confined within silica-based matrices, *Langmuir*, 26, 6568–6575. IF: 4,19
- 2, Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Cloitre, T., Zimányi, L., Tenger, K., Khoroshyy, P., Palestino, G., Agarwal, V., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Porous silicon/photosynthetic reaction center hybrid nanostructure, *Langmuir*, 28, 32, 11866–11873. IF: 4,19
- 3, Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Zimányi, L., Agarwal, V., Palestino, G., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Light-harvesting bio-nanomaterial using porous silicon and photosynthetic reaction center, *Nanoscale Research Letters*, 7:400. IF: 2,52
- 4, Boldog, P., Hajdu, K., Magyar, M., Hideg, É., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Nagy, K., Váró, Gy., Forró, L., Nagy, L. (2013) Carbon nanotubes quench singlet oxygen generated by photosynthetic reaction centers, *Physica Status Solidi B*, 12, 2539–2543. IF: 1,49

b, Egyéb közlemények

- 1, Hajdu, K., Szabó, T., Magyar, M., Bencsik G., Németh, Z., Nagy, K., Magrez, A., Forró, L., Váró, Gy., Hernádi, K., Nagy, L. (2011) Photosynthetic reaction center protein in nano structures, *Phys. Status Solidi B*, 1–4, / DOI 10.1002/pssb.201100046. IF: 1,49
- 2, Magyar, M., Hajdu, K., Szabó, T., Hernádi, K., Dombi, A., Horváth, E., Forró, L. Nagy, L. (2011) Long term stabilization of reaction center protein photochemistry by carbon nanotubes, *Phys. Status Solidi B*, 248, No.11, 2454–2457, DOI 10.1002/pssb.201100051. IF: 1,49
- 3, Szabó, T., Bencsik, G., Magyar, M., Visy, Cs., Gingl, Z., Nagy, K., Váró, Gy., Hajdu, K., Kozák, G., Nagy, L. (2013) Photosynthetic reaction centre/ITO hybrid nanostructure, *Materials Science and Engineering C*, 33, 769-773. IF: 2,59

- 4, Magyar, M., Hajdu, K., Szabó, T., Endródi, B., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Forró, L., Visy, Cs., Nagy, L. (2013) Sensing hydrogen peroxide by carbon nanotube/horseradish peroxidase bio-nanocomposite, Phys. Status Solidi B, 12, 2559–2563. IF: 1,49

c, Referált újságban megjelent konferencia absztraktok

- 1, Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Zimányi, L., Agarwal, V., Palestino, G., Leza, D. S., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2011) Porous silicon/photosynthetic reaction center hybrid nanostructure, 2011. Eur Biophys J., 40(1), 35–241, 518.
- 2, Magyar, M., Hajdu, K., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Nagy, K., Váró, Gy., Forró, L., Nagy, L. (2011) Photosynthetic reaction center/carbon nanotube hybrid nanostructures, 2011 Eur Biophys J., 40 (1), 35–241, 526.

d, Meghívott előadások

1. Hajdu K. (2011) Photosynthetic reaction center/porous silicon hybrid nanostructure, SH_7_2_20 workshop, Szeged, Magyarország, 2011. szeptember 28-30.
2. Hajdu K. (2012) Porous silicon-photosynthetic reaction centers nanostructure, Photosynthetic proteins for technological applications: biosensors and biochips (PHOTOTECH), Joint Working Groups Meeting, Bukarest, Románia, 2012. május 11-12.
3. Hajdu K. (2013) Detection of singlet oxygen generated by reaction centre, (PHOTOTECH) First Plenary Workshop COST Action TD1102, Antwerpen, Belgium, 2012. június 10-12.
4. Hajdu K. (2013) Detection of singlet oxygen generated by reaction center, SNSF Swiss National Science Foundation Valorization Meeting, Szeged, Magyarország, 2013. június 5-8.
5. Hajdu K. (2013) Nanotube as functional matrix for bacterial photosynthetic reaction centers, Bionanotechnology - Recent Advances, Satellite meeting to the 9th European Biophysics Congress EBSA2013, Sesimbra, Portugália, 2013. július 10-13.
6. Hajdu K., Márquez León J., Cloitre T., Martin M., Agarwal V., Nagy L., Palestino G., Gergely C., Zimányi L. (2013) Optical and electronic properties

of biomolecule-functionalized porous silicon photonic structures, IMRC International Materials Research Congress, Cancun, Mexikó, 2013. augusztus 11-15.

7. Ramarkrishnan S. K., Estephan E., Martin M., Cloitre T., Hajdu K., Nagy L., Zimányi L., Palestino G., Agarwal V., Gergely C. (2013) Comprehensive study on porous silicon microcavities' functionalization with peptides for biosensing, IMRC International Materials Research Congress, Cancun, Mexikó, 2013. augusztus 11-15.

GERGELY Csilla
Tél. : 04 67 14 32 48
Fax. : 04 67 14 37 60
Csilla.Gergely@univ-montp2.fr

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott, Gergely Csilla, professzor a Montpellier-i Tudományegyetemen Franciaországban, nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.2. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkekben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Cloitre, T., Zimányi, L., Tenger, K., Khoroshyy, P., Palestino, G., Agarwal, V., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Porous silicon/photosynthetic reaction center hybrid nanostructure, Langmuir, 28, 32, 11866–11873.

Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Zimányi, Z., Agarwal, V., Palestino, G., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Light-harvesting bio-nanomaterial using porous silicon and photosynthetic reaction center, Nanoscale Research Letters, 7, 400.

Montpellier, 2014/01/14



Dr. Gergely Csilla

Professzor
Biofotonika
Université Montpellier 2

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.1. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Boldog, P., Hajdu, K., Magyar, M., Hideg, É., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Nagy, K., Váró, Gy., Forró, L., Nagy, L. (2013) Carbon nanotubes quench singlet oxygen generated by photosynthetic reaction centers, Physica Status Solidi B, 12, 2539–2543.

Pécs, 2014. január 14.



Dr. Hideg Éva
egyetemi tanár
PTE TTK Biológiai Intézet
Növénybiológiai Tanszék

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.1. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Boldog, P., Hajdu, K., Magyar, M., Hideg, É., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Nagy, K., Váró, Gy., Forró, L., Nagy, L. (2013) Carbon nanotubes quench singlet oxygen generated by photosynthetic reaction centers, Physica Status Solidi B, 12, 2539–2543.

Dr. Horváth Endre



Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.2. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Cloitre, T., Zimányi, L., Tenger, K., Khoroshyy, P., Palestino, G., Agarwal, V., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Porous silicon/photosynthetic reaction center hybrid nanostructure, Langmuir, 28, 32, 11866–11873.

Dr. Zimányi László

Dr. Tenger Katalin

Dr. Hernádi Klára

Németh Zoltán

Dr. Nagy László

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.2. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Hajdu, K., Gergely, Cs., Martin, M., Zimányi, Z., Agarwal, V., Palestino, G., Hernádi, K., Németh, Z., Nagy, L. (2012) Light-harvesting bio-nanomaterial using porous silicon and photosynthetic reaction center, Nanoscale Research Letters, 7, 400.

Dr. Zimányi László

Dr. Hernádi Klára

Németh Zoltán

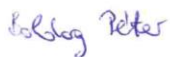
Dr. Nagy László

Társszerzői nyilatkozat

Alulírott nyilatkozom, hogy Hajdu Kata "Fotoszintetikus rendszerek biokompozitokban" című doktori értekezésének 2.1. tézispontjában szereplő, az alábbi cikkben közösen publikált eredmények elérésében a jelölt szerepe meghatározó volt. Ezeket az eredményeket korábban nem használtam tudományos fokozat megszerzésére, és ezt a jövőben sem teszem.

Boldog, P., Hajdu, K., Magyar, M., Hideg, É., Hernádi, K., Horváth, E., Magrez, A., Nagy, K., Váró, Gy., Forró, L., Nagy, L. (2013) Carbon nanotubes quench singlet oxygen generated by photosynthetic reaction centers, Physica Status Solidi B, 12, 2539–2543.

Boldog Péter



Magyar Melinda



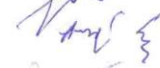
Dr. Hernádi Klára



Dr. Nagy Krisztina



Dr. Váró György



Dr. Nagy László

