

**SVEU ILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO-MATEMATI KI FAKULTET**  
**BIOLOŠKI ODSJEK**

**ANTIBAKTERIJSKO DJELOVANJE FULERENA**

**SEMINARSKI RAD**

Svjetlana Deki

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentor: prof.dr.sc. Jasna Hrenovi

Zagreb, 2011.

## SADRŽAJ

1	Uvod.....	2
2	Fulereni.....	3
2.1	Otkri e fulerena.....	3
2.2	Struktura i kemijska svojstva fulerena .....	4
2.3	Primjena fulerena .....	6
2.4	Proizvodnja fulerena .....	7
3	Antibakterijska svojstva fulerena .....	8
3.1	Djelovanje fulerena na bakterije .....	8
3.1.1	Utjecaj inicijalnog otapala i oblika agregiraju ih estica.....	8
3.1.2	Utjecaj naboja fulerena.....	9
3.1.3	Utjecaj na rast bakterija .....	10
3.1.4	Utjecaj na stani nu membranu .....	11
3.1.5	Utjecaj na membranski potencijal bakterijske stanice .....	11
3.2	Odgovor bakterija na spojeve fulerena.....	12
3.3	Mehanizam antibakterijskog djelovanja.....	13
4	Zaklju ak.....	14
5	Literatura .....	15
6	Sažetak .....	17
7	Summary .....	17

# 1 Uvod

Ugljik je jedna od najčešćih supstanci na Zemlji, osim najpoznatijih formi ugljika (grafit i dijamant), postoji i treća, odnosno, fulereni. Fulereni kao grupa spojeva zahvaljujući i svojim novootkrivenim svojstvima imaju brojne primjene u industriji, s porastom njihove upotrebe raste njihov prodor u okoliš i utjecaj na razne sastavnice ekosustava.

U ovom radu će se osvrnuti na grafit i fulerena, njihova svojstva, primjenu i detaljnije na njihov antibakterijski učinak, jer su bakterije baza svakog ekosustava.

## 2 Fulereni

### 2.1 Otkri e fulerena

Harold W. Kroto, Robert F. Curl i Richard E. Smalley su otkrili tu novu formu ugljika 1985. godine. Pokus je bio usmjeren na simuliranje postanka ugljika u atmosferi ugljikom bogatog crvenog diva. Cilj istraživanja je bio istražiti mogućnost formiranja dugih molekula ugljika iz pare ugljika u prisutnosti atoma vodika i dušika. Pokus je bio uspješan, s još jednim neekvivalentnim produktom- fulerenom  $C_{60}$ , za to otkri e su navedeni znanstvenici 1996. dobili Nobelovu nagradu za kemiju (Yadav i sur, 2008).

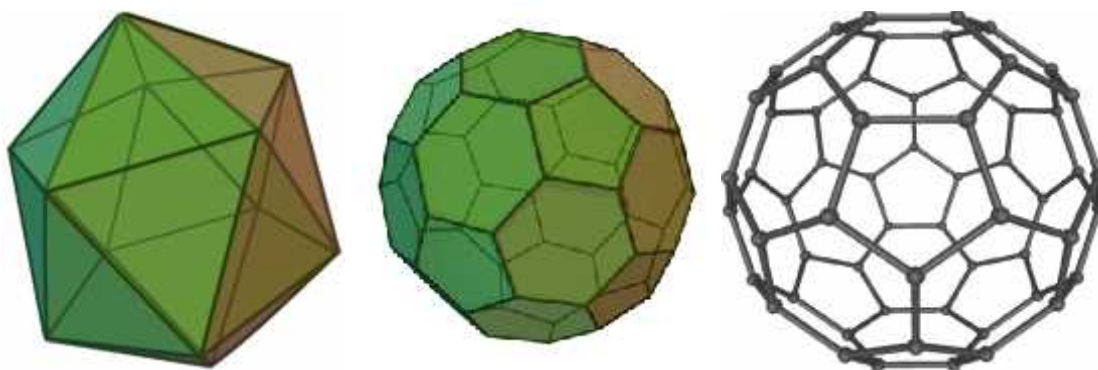
Samo ime tog spoja potje e od tada poznatog arhitekta Richarda Buckminstera Fullera, koji je popularizirao oblik geodetske kupole (Slika 1) . Njemu u čast je ta grupa spojeva dobila ime fulereni, a osobito oblik  $C_{60}$ , koji se naziva buckminsterfuleren.



Slika 1. Richard Buckminster Fuller i geodetska kupola (izvor: <http://relationary.files.wordpress.com/2007/08/image.jpg>)

## 2.2 Struktura i kemijska svojstva fulerena

Fulereni su grupa kemijskih spojeva, koji imaju kružni oblik sa šupljinom u unutrašnjosti, sastoje se obično od 12 pentagonalnih prstena i različitog broja heksagonalnih prstena (20 kod  $C_{60}$ ), koji čine bazu njihove ikosaedarske simetrije (Yadav i sur, 2008). Struktura im nalikuje na zakrivljeni ikosaedar s ugljikovim atomima na svakom vrhu (Slika 2).

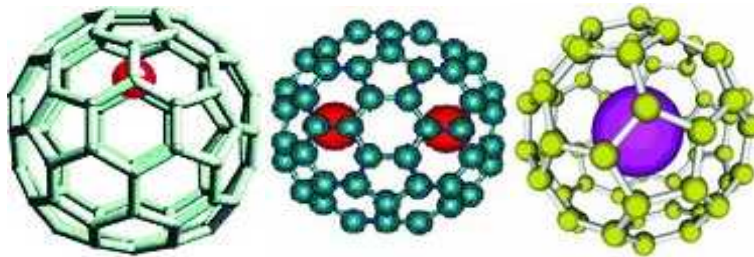


Slika 2. a) Pravilni ikosaedar b) zakrivljeni ikosaedar c) Buckminsterfuleren (izvor: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Icosahedron.svg>; <http://math.ucr.edu/home/baez/week79.html>; <http://en.wikipedia.org/wiki/File:C60a.png>)

Svaki ugljikov atom je povezan s tri druga atoma ugljika i posjeduje  $sp^2$  hibridizaciju. U  $C_{60}$  molekuli postoje dvije različite dužine veze, veze 6:6 se mogu smatrati dvostrukim vezama i kraće su nego 6:5 veze.  $C_{60}$  nije superaromatski spoj, jer nastoji izbjeći dvostruke veze u pentagonalnim prstenima, što rezultira lošom delokalizacijom elektrona. Kao rezultat svega toga  $C_{60}$  se ponaša kao aleken kojemu nedostaju elektroni i kao takav spremno reagira s elektron bogatim spojevima (Yadav i sur, 2008). Jedna od zanimljivih svojstava  $C_{60}$  molekule je njezina visoka simetrija, postoje 120 centara simetrije oko kojih se molekula može rotirati, to čini tu molekulu jednom od najsimetričnijih molekula (Yadav i sur, 2008). Fulereni se otapaju u organskim otapalima kao što su benzen, toluen, kloroform, viši fulereni (iznad  $C_{60}$ ) imaju derivate, koji su općenito topljiviji, ali skuplji za proizvesti (Holister i sur, 2003).

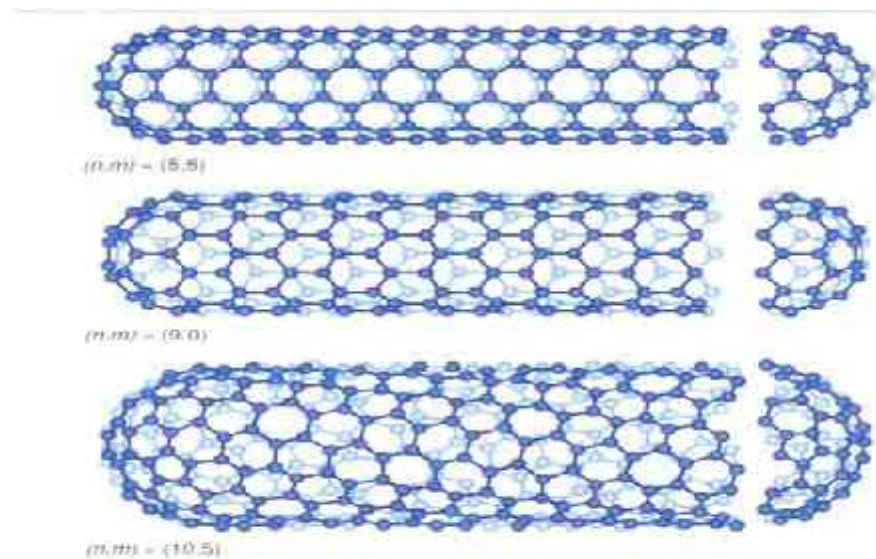
Funkcionalizacija je proces, kojim se različite kemijske grupe mogu pri vrstiti na ugljikove atome fulerena, tim procesom se dobivaju derivati fulerena s mnogobrojnim svojstvima (Holister i sur, 2003).

Posebnu vrstu fulerena predstavljaju endoedarski fulereni, to su fulereni koji unutar svog kaveza imaju atom nekog drugog elementa, kao npr. metalofulereni koji unutar svoje strukture imaju atom metala (Cveti anin i sur, 2006), (Slika 3). Endoedarski fulereni održavaju svoju strukturu stabilnom tako da izmjenjuju elektrone između atoma metala i atoma ugljika, time se mijenjaju elektronska i magnetska svojstva fulerena (Holister i sur, 2003).  $C_{60}$  endoedarski fulereni su manje topljivi i osjetljivi na zrak, ali su relativno jeftini za proizvesti. Funkcionalizacija je omogućila bolju topljivost i stabilnost u zraku (Holister i sur, 2003). Osim spomenutih endoedarskih metalofulerena, postoje i nemetalni (Cveti anin i sur, 2006). Pored endoedarskih fulerena, postoje i egzoedarski, koji se dobivaju procesom funkcionalizacije i predstavljaju jednu od najotpornijih vrsta fulerena (Thakral i sur, 2006).



Slika 3. Endoedarski fulereni se označavaju oznakom @, lijevo od te oznake je simbol elementa unutar kaveza a)  $La@C_{82}$  b)  $La_2@C_{80}$  c)  $N@C_{60}$  (izvor: <http://www.ifw-dresden.de/institutes/iff/research/Carbon/fullerenes/endoedrad>)

Uglji ne nanocijevi su još jedna struktura koju fulereni mogu tvoriti, to su zapravo smotani listovi grafita, kojima su dodani pentagoni da se dobije zakrivljenost, unutar tih cijevi se tako mogu nalaziti razni atomi metala. Uglji ne nanocijevi spadaju pod jednu od najvrših i najžilavijih poznatih vlakana i posjeduju izvanredna elektronska svojstva o kojima će kasnije biti riječi (Yadav i sur, 2008), (Slika 4).



Slika 4. Uglji ne nanocijevi razli itog oblika (izvor: <http://www.personal.reading.ac.uk/~scsharip/tubes.htm>)

## 2.3 Primjena fullerena

Kuglice fullerena su međusobno povezane slabim van der Waalsovima silama, isto kao i slojevi grafita, zbog tog svojstva bi se mogli koristiti kao lubrikanti, osim toga imaju veliki potencijal kao katalizatori. Fulereni imaju interesantna električna svojstva, što im otvara vrata za primjenu u elektroničkoj industriji, od uređaja za pohranu podataka do solarnih ćelija. Materijali bazirani na fulerenima imaju važna optička svojstva, jer fulereni imaju veoma nelinearnu optičku odgovor (npr. njihova se svojstva mijenjaju kada su izloženi svjetlosti) kao takvi mogu imati razne primjene u telekomunikaciji. Istraživanja su pokazala da fulereni i njihovi derivati mogu postići superkonduktivnost, koriste se i u kvantnoj mehanici (Holister i sur, 2003).

Osim navedenih svojstava fulereni su učinkoviti u uklanjanju slobodnih radikala, koji oštećuju živo tkivo, to je dovelo do prijedloga za upotrebu u kozmetičkoj industriji, također su u mogućnosti spriječiti štetu živim sustavima kod nekih bolesti, koja je uzrokovana slobodnim radikalima, istraživanje na štatorima je već pokazalo rezultate. Unutar optičkih fullerena lijekovi se mogu prenositi do određenog mjesta u organizmu, gdje su potrebni.

Unutar fulerena se mogu zarobiti različiti elementi (endogeni fulereni), kao što su inertni plemeniti elementi, takve spojeve možemo koristiti u magnetskoj rezonanci (MRI) (Holister i sur, 2003).

Velika C<sub>60</sub> molekule je slična kao i kod mnogih biološki aktivnih molekula, uključujući i lijekove kao Prozac i steroidne hormone, to fulerenima daje potencijal da se stvori širok niz biološki aktivnih varijanti. Fulereni blokiraju vezanje HIV proteaze na aktivno mjesto, jer imaju visoku fizičku i kemijsku afinitet prema aktivnim mjestima i na taj način ometaju djelovanje tog enzima. Postoje i lijekovi kojima se tretira AIDS isto tako ciljaju HIV proteazu, ali svi imaju slično djelovanje, pa se u nekoj mjeri već razvila otpornost, dok kod fulerena to nije slučaj, jer oni ciljaju HIV proteazu na drugačiji način (Holister i sur, 2003).

## **2.4 Proizvodnja fulerena**

Fulereni se prirodnim putem (požari i munje) proizvode u malim količinama. No, na umjetan način su prvi puta sasvim slučajno proizvedeni u laboratoriju i nastaloj isparavanjem grafita pomoću lasera. Postoje različite metode dobivanja fulerena, jedna od najranijih je bila pomoću lučnog pražnjenja koristeći grafitne elektrode, kasnije se prešlo na proizvodnju u plamenu benzena, zatim pirolizom, a također se neki aromatski spojevi mogu koristiti za proizvodnju fulerena (Holister i sur, 2003).



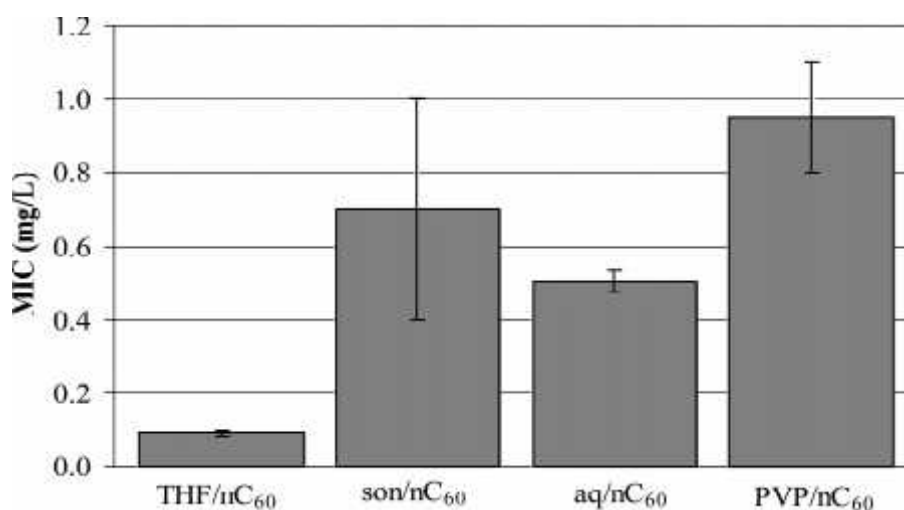
### 3 Antibakterijska svojstva fulerena

U krutom obliku  $C_{60}$ , s topljivosti manjoj od 9-10 mg/L, je skoro netopljiv u vodi i kao takav ne pokazuje nikakvu antibakterijsku aktivnost (Lyon i sur, 2006). Da bi iskazivao antibakterijska svojstva fulerena se moraju otopiti u vodi. To se postiže na taj način da se npr.  $C_{60}$  prah otapa u nekom organskom otapalu (npr. benzen, kloroform, toluen) uz dodavanje vode i postepeno micanje tog inicijalnog otapala. Molekule  $C_{60}$  agregiraju stvarajući i nakupine okružene molekulama vode, koje ih stabiliziraju. Dobivene vodene suspenzije fulerena (FWS) se označavaju s formulom  $nC_{60}$  (Lyon i sur, 2006).

#### 3.1 Djelovanje fulerena na bakterije

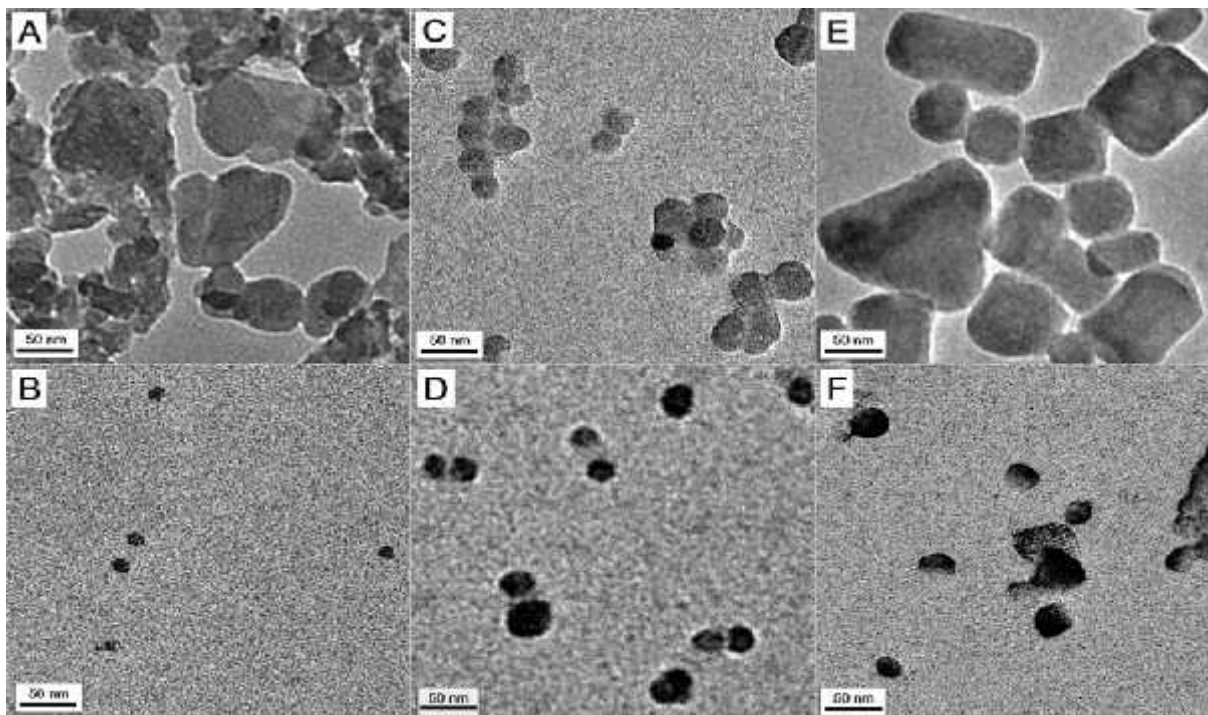
##### 3.1.1 Utjecaj inicijalnog otapala i oblika agregiraju ih estica

Prema Lyonu i suradnicima (2006) na antibakterijsku aktivnost uvelike utječe inicijalno organsko otapalo, koje je u tragovima ostalo pri pripremi vodenih suspenzija fulerena. Oni su koristili otopine fulerena pripremljene pomoću tetrahidrofurana (THF/ $nC_{60}$ ), toluena i toluen (toluen/ $nC_{60}$ ), koriste i otapaju i agens (PVP/ $nC_{60}$ ) i miješaju i prah  $C_{60}$  u vodi (aq/ $nC_{60}$ ). Sve četiri pripremljene otopine su pokazale antibakterijsku aktivnost prema Gram pozitivnoj bakteriji *Bacillus subtilis*, u ovoj je poveznici antibakterijska aktivnost kod otopine s tetrahidrofuranom, jer se minimalna inhibitorna koncentracija smanjila (MIC), (Slika 5).



Slika 5. Minimalne inhibitorne koncentracije za razne otopine fulerena (izvor: Lyon Y.D., Adams K.L., Falkner C.J., Alvarez J.J.P. (2006): Antibacterial Activity of fullerene Water Suspensions: Effects of Preparation Method and Particle Size. Environmental Science & Technology, 40, 4360-4366)

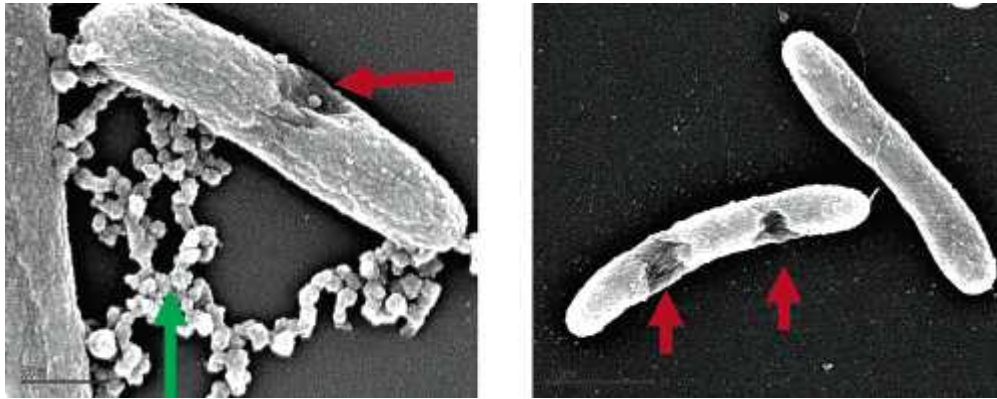
Lyon i suradnici (2006) su tako er doveli u korelaciju veli inu agregiraju ih estica nC<sub>60</sub> i površine tih estica koja može biti pravilna ili amorfna (Slika 6). Zaklju ili su da manje estice amorfne strukture iskazuju ve u antibakterijsku aktivnost.



Slika 6. TEM snimke agregiraju ih estica nC<sub>60</sub>: a) velike aq/C<sub>60</sub> b) male aq/C<sub>60</sub> c) velike son/C<sub>60</sub> d) male son/C<sub>60</sub> e) velike THF/nC<sub>60</sub> f) male THF/nC<sub>60</sub> (izvor: Lyon Y.D., Adams K.L., Falkner C.J., Alvarez J.J.P. (2006): Antibacterial Activity of fullerene Water Suspensions: Effects of Preparation Method and Particle Size. *Environmental Science & Technology*, 40, 4360-4366)

### 3.1.2 Utjecaj naboja fullerena

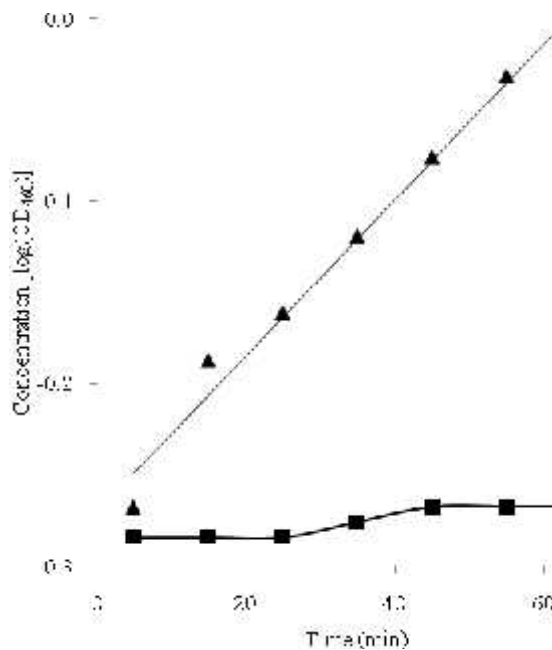
Tang i suradnici (2007) su prou avali utjecaj, koji pozitivno nabijeni C<sub>60</sub>-NH<sub>2</sub>, neutralan C<sub>60</sub> i C<sub>60</sub>-OH i negativno nabijeni C<sub>60</sub>-COOH imaju na bakterije. Otkrili su da, generalno gledaju i, negativno nabijeni i neutralni fulereni imaju najmanji utjecaj na bakterije, posebno Gram negativne kao što je *Escherichia coli*, dok kationski spojevi fullerena, poput C<sub>60</sub>-NH<sub>2</sub>, pokazuju visoku antibakterijsku aktivnost (Slika 7), zbog negativnih naboja na samoj bakterijskoj površini, koji su odgovorni za snažnu adsorpciju pozitivnih estica i njihovu interakciju s površinom stanice.



Slika 7. SEM snimke bakterije *Shewanella oneidensis* uslijed izlaganja pozitivno nabijenom spoju  $C_{60}-NH_2$  (izvor: Tang J.Y., Ashcroft M.J., Chen D., Min G., Kim C., Murkhejee B., Larabell C., Keasling D.J., Chen F.F., (2007): Charge-Associated Effects of Fullerene Derivatives on Microbial Structural Integrity and Central Metabolism. Nano Letters, 7, 754-760)

### 3.1.3 Utjecaj na rast bakterija

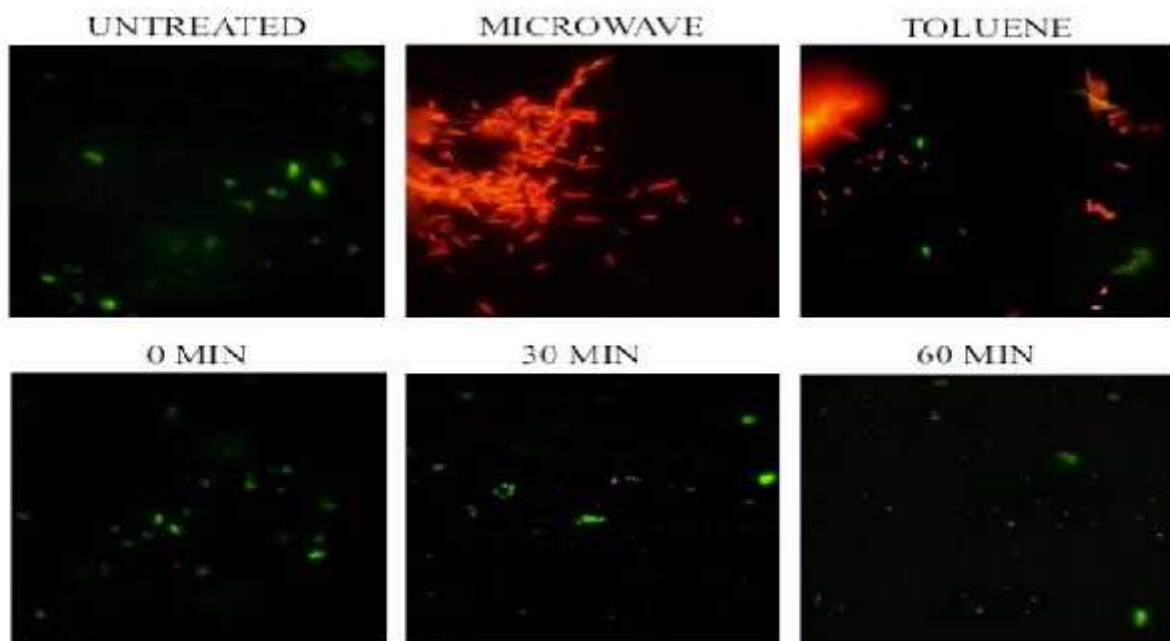
Aquino i suradnici (2010) su u svojim istraživanjima dokazali da je rast bakterija snažno inhibiran pri koncentraciji  $nC_{60}$  od 1.0 mg/L u usporedbi s kontrolnom kulturom (Slika 8).



Slika 8. Utjecaj fulerena na rast *E.coli*, kontrolne bakterije, bakterije izložene koncentraciji  $nC_{60}$  od 1.0 mg/L (izvor: Aquino A., Chan J., Giolma K., Loh M., (2010): The Effect of a Fullerene Water Suspension on the Growth, Cell Viability, and Membrane Integrity of *Escherichia coli* B23. Journal of Experimental Microbiology and Immunology, 14, 13-20)

### 3.1.4 Utjecaj na stani nu membranu

Antibakterijsko djelovanje fulerena nije posljedica djelovanja na stani nu membranu, prema Aquinu i suradnicima (2010), agregiraju e estice  $nC_{60}$  ne mogu prodrijeti kroz lipidni dvosloj ili to mogu napraviti bez da u ine pretjeranu štetu, koja bi uzrokovala smrt stanice. Svoju teoriju su potvrdili fluorescentnim bojenjem stanica, koje su bile izložene fulerenu, mikrovalnom zra enju i toluenu, jedino kod fulerena nije uo ena perforacija stanica (Slika 9).

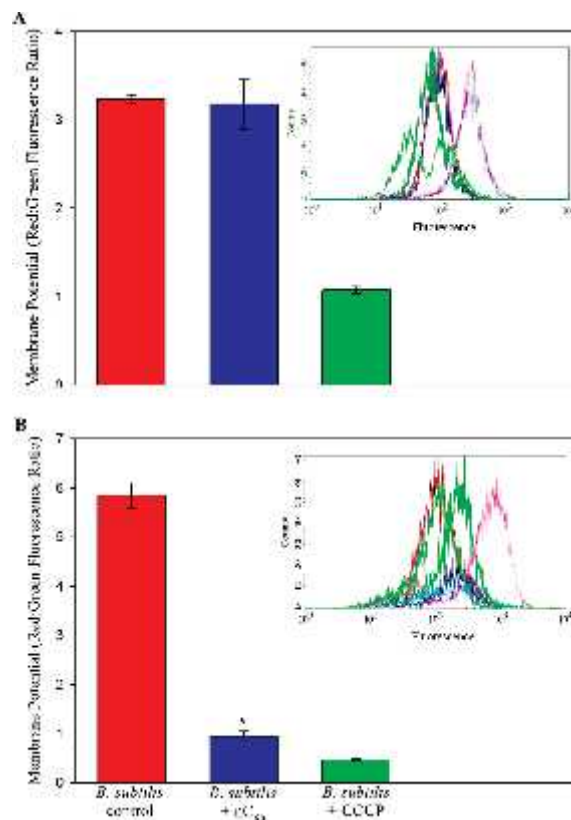


Slika 9. Fluorescentno bojenje i vizualizacija *E. coli* kroz određeni period, crveno obojene stanice su perforirane dok su zelene netaknute, zadnji red se odnosi na stanice tretirane fulerenom koncentracije 1.0 mg/L (izvor: Aquino A., Chan J., Giolma K., Loh M., (2010): The Effect of a Fullerene Water Suspension on the Growth, Cell Viability, and Membrane Integrity of *Escherichia coli* B23. Journal of Experimental Microbiology and Immunology, 14, 13-20)

### 3.1.5 Utjecaj na membranski potencijal bakterijske stanice

Membranski potencijal je esencijalan za energetska transdukciju tijekom respiracije, Lyon i suradnici (2008, b) su otkrili da se membranski potencijal bakterijske stanice mijenja u interakciji s fulerenom pogotovo kod Gram pozitivne bakterije *B. subtilis*, dok je kod Gram negativne bakterije *E. coli* došlo do beznačajne promjene (Slika 10), vjerojatno uslijed različite građe stanične stijenke kod Gram pozitivnih i Gram negativnih bakterija. Također su

otkrili da se aktivnost bakterijske reduktaze, koja je indikator normalnog prijenosa elektrona, smanjila.



Slika 10. Membranski potencijali a) *E. coli* i b) *B. subtilis*, zeleni histogram je kontrolna skupina, kojoj je namjerno smanjen membranski potencijal (izvor: Lyon Y.D., Alvarez J.J.P., (2008) b: Fullerene Water Suspension (nC) Exerts Antibacterial Effect via ROS-Independent Protein Oxidation. Environmental Science & Technology, 42, 8127-8132 )

### 3.2 Odgovor bakterija na spojeve fulerena

Op enito Gram negativne bakterije (*Pseudomonas putida*) reagiraju na organska otapala tako što mijenjaju omjer i dužinu lanca zasi enih i nezasi enih masnih kiselina i tako što pove avaju biosintezu masnih trans kiselina kroz cis-trans izomerizaciju nezasi enih masnih kiselina (Fang i sur, 2007). Kod Gram pozitivnih bakterija (*B. subtilis*) je primije eno uravnoteženo smanjenje nezasi enih cis masnih kiselina i njihova konverzija u ciklopropansku masnu kiselinu (Fang i sur, 2007). Smatra se da su to mehanizmi, kojima se bakterija pokušava zaštititi od oksidacije fulerenom.

### 3.3 Mehanizam antibakterijskog djelovanja

Rana istraživanja idu u prilog tome da su citotoksi na svojstva fulerena rezultat njegove sposobnosti da generira ROS (reactive oxygen species), spojeve, koji nastaju u prisutnosti kisika i svjetlosti. Prisutnost povišenih koncentracija ROS-a u stani nom okolišu uzrokuje težak oksidativni stres kroz ošte enje vitalnih stani nih struktura kao što su DNA, proteini i lipidi (Aguino i sur, 2010). Sama injenica da fulereni pokazuju antibakterijska svojstva i u anaerobnim, fermentativnim uvjetima bez prisutstva svjetlosti (Lyon i sur, 2006), kontradiktorni eksperimentalni podaci i nepouzdana testovi su nagnali znanstvenike da istraže alternativne mehanizme.

Otkri e da je  $nC_{60}$  sposoban djelovati kao tvar, koja oksidira proteine je potaknulo formuliranje nove hipoteze o citotoksi nosti fulerena (Lyon i sur, 2008, a). Premda fulereni ne iskazuju toksi nost tako da direktno ošte uju membranu (Aguino i sur, 2010), dokazano je da uzrokuju oksidaciju proteina, koji sudjeluju u transportu elektrona (Lyon i sur, 2008, b). Oksidacija tih proteina utje e na stvaranje ATP-a tako ograni avaju i rast bakterija i u kona nici uzrokuju i smrt stanice. Oksidacija membranskih proteina se može dogoditi bez narušavanja membrane,  $nC_{60}$  bi samo trebao do i u kontakt s proteinima ili od površine ili unutar lipidnog dvosloja (Aguino i sur, 2010).

Osim navedenog mehanizma dokazano je da inicijalno otapalo, koje je služilo za pripremu  $nC_{60}$  uvelike ima utjecaj na antibakterijsku aktivnost otopine, jer neka organska otapala npr. THF ostaju vezani uz agregiraju e estice, ak i nakon što je otapalo isparilo (Lyon i sur, 2006).

## 4 Zaključak

Fulereni su grupa spojeva brojnih svojstava i široke primjene. U krutom stanju ne pokazuju nikakvu toksičnost, dok se ona manifestira u vodenim suspenzijama fulerena. Fuleren na bakterije utječe tako što im mijenja membranski potencijal i uzrokuje stvaranje masnih trans kiselina kod Gram negativnih i ciklopropanskih masnih kiselina kod Gram pozitivnih.

Dokazano je da agregirajuće estice fulerena djeluju kao jaki oksidanti proteina, pogotovo onih vezanih uz transport elektrona i tako remete stvaranje ATP-a. Osim oksidativnog stresa koji fulereni uzrokuju bakterijama, na njegovu toksičnost utječe i inicijalno otapalo, koje je u tragovima ostalo nakon pripreme vodenih suspenzija. Antibakterijski mehanizam fulerena nije još u potpunosti razjašnjen, jer se smatra da osim navedenih mehanizama na bakteriju utječu i brojni drugi čimbenici, koji zajedno djeluju i dovode do smrti stanice.

## 5 Literatura

- Aquino A., Chan J., Giolma K., Loh M., (2010): The Effect of a Fullerene Water Suspension on the Growth, Cell Viability, and Membrane Integrity of *Escherichia coli* B23. *Journal of Experimental Microbiology and Immunology*, 14, 13-20
- Cvetinjanin J., Djustebek J., Veljković M., Veljković S., Djordjević V., Nešković O., (2006): Endohedral fullerenes of different elements. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8, 1892-1894
- Holister P., Roman C., Harper T. (2003): Fullerenes. Cientifica, Technology White Papers nr. 7
- Fang J., Lyon Y.D., Wiesner R.M., Dong J., Alvarez J.J.P., (2007): Effect of a Fullerene Water Suspension on Bacterial Phospholipids and Membrane Phase Behavior. *Environmental Science & Technology*, 41, 2632-2642
- Lyon Y.D., Brunet L., Hinkal W.G., Wiesner R.M., Alvarez J.J.P., (2008) a: Antibacterial Activity of Fullerene Water Suspensions (nC<sub>60</sub>) Is Not Due to ROS-Mediated Damage. *Nano Letters*, 8, 1539-1543
- Lyon Y.D., Alvarez J.J.P., (2008) b: Fullerene Water Suspension (nC) Exerts Antibacterial Effect via ROS-Independent Protein Oxidation. *Environmental Science & Technology*, 42, 8127-8132
- Lyon Y.D., Adams K.L., Falkner C.J., Alvarez J.J.P. (2006): Antibacterial Activity of fullerene Water Suspensions: Effects of Preparation Method and Particle Size. *Environmental Science & Technology*, 40, 4360-4366
- Tang J.Y., Ashcroft M.J., Chen D., Min G., Kim C., Murkhejee B., Larabell C., Keasling D.J., Chen F.F., (2007): Charge-Associated Effects of Fullerene Derivatives on Microbial Structural Integrity and Central Metabolism. *Nano Letters*, 7, 754-760



Thakral S, Mehta RM. (2006): Fullerenes: An introduction and overview of their biological properties. Indian Journal of Pharmaceutical Sciences, 68,13-9

Yadav B.C., Kumar R. (2008): Structure, properties and applications of fullerenes. International Journal of Nanotechnology and Applications, 2,15-24

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:C60a.png>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Icosahedron.svg>

<http://www.ifw-dresden.de/institutes/iff/research/Carbon/fullerenes/endoledral>

<http://math.ucr.edu/home/baez/week79.html>

<http://www.personal.reading.ac.uk/~scsharip/tubes.htm>

<http://relatory.files.wordpress.com/2007/08/image.jpg>

## 6 Sažetak

Fulereni su grupa spojeva slučajno otkrivenih 1985. godine. Struktura im je nalik na zakrivljeni ikozaedar s ugljikovim atomima na svakom vrhu. Posjeduju 12 pentagonalnih i različit broj heksagonalnih prstena. U kemijskim reakcijama se ponašaju kao alkeni, zbog toga reagiraju s elektron bogatim spojevima. Fulereni imaju brojne derivate kao što su endohedarski, egzohedarski fulereni i nanocijevi, zbog toga posjeduju brojne primjene od superkonduktora do biološki korisnih molekula. U krutom obliku fulereni ne iskazuju antibakterijsku aktivnost, nego jedino u obliku vodenih suspenzija. Na bakterijama se uočavaju promjene u membranskom potencijalu i u stvaranju ATP-a, jer fulereni djeluju kao oksidanti tih proteina. Povećava se udio masnih trans kiselina i ciklopropanske kiseline, jer se na taj način bakterije pokušavaju zaštititi. Fulereni ne perforiraju stanicu niti oštećuju staničnu membranu. Smatra se da inicijalno otapalo, koje je služilo za pripremu vodene suspenzije fulerena pridonosi antibakterijskom djelovanju.

## 7 Summary

Fullerens are a group of compounds accidentally discovered in 1985. Their structure is like a curved icosahedron with carbon atoms at every top. They have 12 pentagonal and a different number of hexagonal rings. In chemical reactions they act like alkenes, because of that they react with electron rich compounds. Fullerens have a large number of derivatives like endohedral, exohedral fullerens and nanotubes, because of that they have many applications, from superconductors to biologically useful molecules. In solid form fullerens do not exhibit antibacterial activity, but only in a form of fullerene water suspensions. Bacteria show changes in membrane potential and in creation of ATP, because fullerens are strong oxidants of these proteins. The amount of fatty trans acids and cyclopropane fatty acids increases, because that is a bacterial defense mechanism. Fullerens do not perforate the cell nor do they damage the cell membrane. It is considered that the initial solvent, which was used for the preparation of fullerene water suspensions contributes to the antibacterial effect.