



KEMIJA U NASTAVI

Uređuje: Nenad Raos

<https://doi.org/10.15255/KUI.2020.058>

KUI-32/2022

Pregledni rad

Prispjelo 30. kolovoza 2020.

Prihvaćeno 15. listopada 2020.

Ugljik, silicij, kisik: kemijska analogija živog i neživog

N. Raos*

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License



Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Ksaverska cesta 2, p.p. 291, 10 001 Zagreb

Sažetak

Ugljik i silicij su slični elementi jer pripadaju istoj 14. (4B) skupini periodnog sustava, pa se često ne samo u znanstveno-fantastičnim djelima nego i u ozbiljnijoj znanstvenoj literaturi spominje mogućnost da bi se izvanzemaljski život mogao temeljiti i na siliciju. U radu su uspoređena fizičko-kemijska svojstva ugljika i silicija kao elementarnih tvari te njihovih spojeva (alkani – silani, ciklički ugljikovodici – ciklosilikati, heterociklički spojevi – alumosilikati). Uvid u njihovu geokemiju pokazao je međuovisnost kruženja ugljika i silicija, a usporedba leda (H_2O) i kremenca (SiO_2) ukazala na sličnost ta dva minerala.

Ključne riječi

Nastava kemije, vodikova veza, postanak života, izvanzemaljski život, geokemija

Uvod

Unatoč upornim naporima fizičara da kemiju svedu na fiziku, kemija je još daleko od toga da bude (a vjerojatno nikad neće ni biti) fizika molekula ili molekularna fizika.¹ Razlog tome je i što se kemija još uvijek temelji na usporedbama, na analogijama. Kažem “još uvijek” jer je zaključivanje prema analogiji nekoć bio ne samo jedini način da se u kemiji dođe do nečeg novog nego i jedini racionalni, pa stoga i znanstveni pristup kemijskim problemima. Uspoređivanje kemijskih elemenata i uočavanje njihovih analognih, kako kemijskih tako i fizičkih svojstava, dovelo je Mendeljejeva do periodnog sustava, dok je njegov izvod iz zakona kvantne mehanike (preciznije: iz elektronske konfiguracije) došao tek kasnije, više kao objašnjenje i potvrda već izvršenog izvoda sintezom eksperimentalnih podataka.² I prva se znanstvena, Lavoisierova podjela “jednostavnih tvari” na metale i nemetale³ temelji na analogiji, jer reakcijom metalnih oksida s vodom nastaju hidroksidi, otapanjem nemetalnih oksida nastaju kiseline, dok spajanjem metalnih i nemetalnih oksida nastaju soli. No i bez ulaženja u povijest kemije, jasno je da se znanje kemije stječe uspoređivanjem sličnog sa sličnim, dakle pronalaženjem analogija: ako se etanol miješa s vodom u svim omjerima, onda će tako biti i s metanolom, koji – razlog više – ima manji omjer ugljikovih prema kisikovim atomima, pa je stoga sličniji vodi (još jedna analogija!).

Iako zaključivanje po analogiji može ponekad navesti na stranputicu (usp. CaF_2 i $CaCl_2$), učenje se kemije – posebice na osnovnoškolskom i srednjoškolskom stupnju – svodi

na ukazivanje na sličnosti. Štoviše, upoznavanje s periodnim sustavom služi upravo tome da učenici uoče sličnost elemenata i spojeva da bi iz toga stvorili racionalni okvir za svladavanje školskog gradiva. Ako natrij burno reagira s vodom, pri čemu nastaje natrijeva lužina, takvu reakciju možemo očekivati i kod kalija, jer se nalazi u istoj skupini periodnog sustava. Magnezij lako gori, pri čemu se oslobađa velika količina topline ($602,2 \text{ kJ mol}^{-1}$, $24,8 \text{ MJ kg}^{-1}$), no manje je poznato, premda se po analogiji daje zaključiti, da i berilij lako gori, pri čemu se oslobađa još veća količina topline ($611,3 \text{ kJ mol}^{-1}$, $67,8 \text{ MJ kg}^{-1}$). Anhidrit, bezvodni kalcijev sulfat, $CaSO_4$, sličan je mineralu celestinu, $SrSO_4$. Oba minerala kristaliziraju u istom, rompskom sustavu, imaju jednaku tvrdoću po Mohsu (3 – 3,5), a znatno se razlikuju tek po gustoći (anhidrit 2,98, celestin $3,96 - 3,98 \text{ g cm}^{-3}$). Sličnost željeza s manganom i niklom očituje se pak u mnogo minerala koji čine krutu otopinu soli željeza s analognim solima mangana ili nikla. Zbog toga se formule minerala pišu na kemičaru malo čudan način, npr. $(Zn, Mn^{2+}, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$, za franklinit.

Pisati kemiju analogija značilo bi pisati kemijski udžbenik. To ja ovdje neću učiniti, nego ću se pozabaviti samo analogijom ugljika i silicija, koja se često spominje – pa se čak povezuje s mogućnošću postojanja “silicijskog” izvanzemaljskog života – no i manje očitom analogijom silicija i kisika.

Ugljik i silicij kao elementarne tvari

Ugljik i silicij pružaju dobar primjer kemijske sličnosti (tablica 1). Oba elementa pripadaju 14. (4B) skupini periodnog sustava te imaju, dakako, istu (s^2p^2) elektronsku

* Dr. sc. Nenad Raos
e-pošta: raos@imi.hr

Tablica 1 – Usporedba fizičkih i kemijskih svojstava ugljika i silicija
Table 1 – Comparison of physical and chemical properties of carbon and silicon

Svojstvo Property	Ugljik (dijamant) Carbon (diamond)	Silicij Silicon
protonski broj proton number	6	14
relativna atomska masa relative atomic mass	12,011	28,086
elektronska konfiguracija electronic configuration	1s ² 2s ² 2p ²	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ²
afinitet prema elektronu /eV electron affinity /eV	1,26	1,39
prva ionizacijska energije /eV first ionisation energy /eV	11,260	8,152
elektronegativnost po Paulingu Pauling electronegativity	2,55	1,90
kristalni sustav (Z, a/pm) crystal system (Z, a/pm)	kubična (8, 357) cubic (8, 357)	kubična (8, 543) cubic (8, 543)
boja colour	bezbojan (grafit: tamnosiv do crn) colourless (graphite: dark grey to black)	tamnosiv dark grey
gustoća / g cm ⁻³ density / g cm ⁻³	3,52	2,33
talište / °C melting point / °C	3500*	1410
vrelište / °C boiling point / °C	4827	2355
toplinski kapacitet / J mol ⁻¹ K ⁻¹ heat capacity / J mol ⁻¹ K ⁻¹	6,155	19,99
toplinska provodljivost / W K ⁻¹ m ⁻¹ thermal conductivity / W K ⁻¹ m ⁻¹	2200	149

* Prije taljenja dijamant prelazi pri temperaturi od 1500 °C u heksagonsku modifikaciju (grafit)

* At temperature 1500 °C, lower than its melting point, diamond is transformed to its hexagonal modification (graphite)

konfiguraciju zadnje ljuske. Oba elementa kristaliziraju u kubičnom sustavu s osam atoma u jediničnoj ćeliji, premda se kod ugljika to odnosi samo na dijamant, alotropsku modifikaciju koja je metastabilna do tlaka od oko 10 GPa, ovisno o temperaturi.* Talište i vrelište obje elementarne tvari je visoko, no ipak je talište i vrelište ugljika za oko 2000 °C više.

Sličnost ugljika i silicija vidi se i u silicijevu karbidu (SiC), koji također ima "dijamantnu" kristalnu strukturu. Silicijev karbid sličan je dijamantu, prije svega zbog velike tvrdoće, veće od tvrdoće korunda (9 po Mohsu) i gotovo jednake tvrdoći dijamanta (10 po Mohsu). Stoga se SiC upotrebljava kao sredstvo za brušenje pod imenom "karborundum". Sličnost ugljika i silicija vidi se i po tome što SiC gradi oko

250 polimorfa, svi dijamantne strukture, što ukazuje na lakoću kojom se ugljikovi atomi zamjenjuju silicijevima. Tome možemo dodati da je silicij, poput ugljika, reduktivno sredstvo, pa može reducirati silicijev dioksid:



kao što ugljik, analogno, reducira ugljikov dioksid:



Razlika je u tome što je silicijev monoksid metastabilan, pa se pri nižim temperaturama, jasno je iz jedn. (1), disproporcionira na silicij i silicijev dioksid.

No sličnost ugljika i silicija tu prestaje. Jedinična ćelija dijamanta manja je od jedinične ćelije silicija i silicijeva karbida: duljina veze C–C iznosi 154 pm, veze Si–Si 234 pm, a C–Si je 190 pm. Dijamant ima usto tri puta manji toplinski kapacitet i čak 15 puta veću toplinsku vodljivost od silicija, pa se stoga već dugo radi na tome ne bi li se poluvodički elementi mogli napraviti od ugljika umjesto od silicija, naime od dijamanta dopiranog dušikom ili borom. Računala

* Do otkrića buckminsterfullerena (C₆₀) 1985. godine mislilo se da se ugljik pojavljuje u samo dvije alotropske modifikacije, kao dijamant i grafit; danas se zna da ugljik sâm gradi na tisuće vrsta molekula. Ipak, nove alotropske modifikacije ugljika mogu se smatrati derivatima grafita, jer se ugljik nalazi u obliku hibrida sp² (ref. 23, 24), s iznimkom novamena u kojima se pojavljuje u obliku oba hibrida, sp² i sp³ (ref. 25). Tome treba dodati i lonsdejlit, heksagonsku (ne kubičnu!) kristalnu modifikaciju dijamanta.

od dijamantnih poluvodičkih elementa, n-tipa (C/N) i p-tipa (C/B), mogla bi postići mnogo veću brzinu računanja jer bi se lakše hladila (slika 1).^{4,5}



Slika 1 – Poluvodički dijamanti, s tragovima dušika ili bora, postoje i u prirodi. Dijamant koji sadržava bor posebno je cijenjen zbog prekrasne modre boje (ref. 4).

Fig. 1 – Semiconducting diamonds, with traces of nitrogen or boron, are also found in nature. Boron-containing diamond is especially valuable because of its beautiful shade of blue (Ref 4).

Druga važna razlika između ugljika i silicija proizlazi iz toga što silicij ima veći afinitet prema elektronu nego ugljik. Silicij je po elektronegativnosti, prema Paulingu (1,90), sličniji aluminiju (1,61) nego ugljiku (2,55). Stoga se poput aluminija otapa u lužini uz oslobađanje vodika (dok se, suprotno od aluminija, ne otapa u kiselinama):



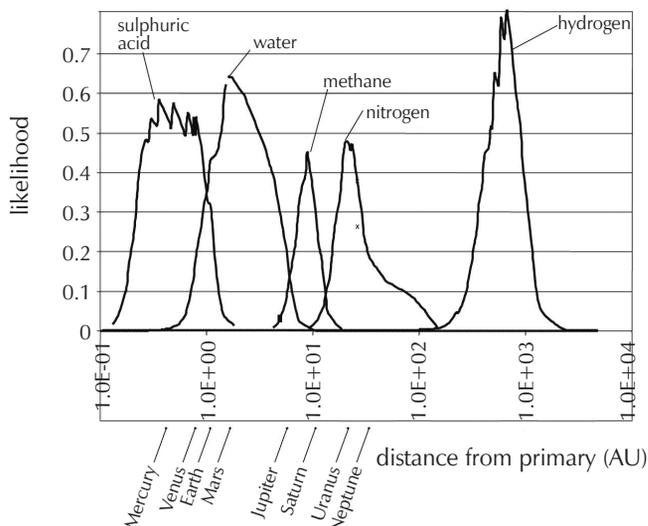
Ta je reakcija našla i svoju tehnološku (vojnu) primjenu, služila je naime za punjenje vodikom izviđačkih balona.* Umjesto čistog silicija rabila se njegova slitina sa željezom (ferosilicij).

Ugljik i silicij u prirodi

Ima jedna tema koja se provlači kroz znanstveno-fantastičnu literaturu, ali o kojoj se može čitati i u djelima koje se, da tako kažem, bave rubnim područjima znanosti. Riječ je o tome da se izvanzemaljski život ne bi morao nužno temeljiti na nukleinskim kiselinama i proteinima, pa čak ni na vodi i ugljikovim spojevima.^{6–8} Osnovni životni fluid mogao bi biti tekući metan, amonijak ili dušik (pri niskim temperaturama) ili pak – pri visokim temperaturama – rastaljeni sumpor (slika 2). Isto tako, na mjesto ugljika došao

* Punjenje balona vodikom bio je izazov tehnologije prošla dva stoljeća, ne samo zato što je vodik zapaljiv i lako difundira kroz oplatu balona. Vodik proizveden najjednostavnijim postupkom, reakcijom željeza sa sumpornom kiselinom, nosio je sa sobom kapljice kiseline koje su bušile balonsku svilu.

bi silicij. Treba odmah reći da takve pretpostavke ne treba od prve odbaciti, jer definicija (bolje: definicije) života ne uključuju njegov kemizam.⁹



Slika 2 – Od čega se sastoji ocean (u kojem bi se mogao razviti život) ovisi o udaljenosti planeta od Sunca (ref. 6)

Fig. 2 – Composition of the planetary ocean (in which life possibly evolved) depends on its distance from the Sun (Ref. 6)

Najpoznatiji zagovornik takvih shvaćanja bio je američki planetarni astronom Carl Sagan (1934. – 1996.). On je u knjizi "The Cosmic Connection"¹⁰ posvetio čitavo poglavlje "šovinizmima", uskogrudnim shvaćanjima da život u svemiru mora biti sličan onome na Zemlji. Pritom se osvrće i na sličnost ugljika sa silicijem (str. 47):¹⁰

Ugljikov šovinizist smatra da će biološki sustavi svugdje u svemiru biti izgrađeni od ugljikovih spojeva, kao život na ovom planetu. Ima zamislivih alternativa: atomi poput atoma silicija ili germanija mogu učiti u neke vrste kemijskih reakcija poput ugljikovih atoma. Istina je i da je mnogo više pažnje posvećeno organskoj kemiji ugljika nego organskoj kemiji silicija ili germanija, ponajviše zato što je najveći broj biokemičara koje poznajemo ugljične a ne silicijske ili germanijske vrste. No bez obzira na to, prema onome što znamo o alternativnim kemijama, jasno je da – osim u okolišu vrlo niskih temperatura – postoji mnogo veća raznolikost složenih spojeva koji su izgrađeni od ugljika nego od tih alternativa.

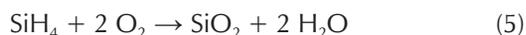
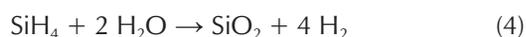
Sagan ipak ne podržava hipotezu o silicijevom životu, pa čak izriječno kaže da je i on "ugljikov šovinizist". Trebamo se međutim zapitati odakle je potekla ta misao, pretpostavka da se život može temeljiti i na siliciju, štoviše da "nema razloga zašto ne bi silani ili siloksani imali vrlo raznolike, vrlo strukturirane skupove pobočnih lanaca, analogne proteinima, nukleinskim kiselinama i ugljikohidratima", kako kaže William Bains.⁶ Život utemeljen na siliciju – tvrdi taj zagovornik neugljiknih oblika života – mogao bi se odvijati u tekućem dušiku, a osnovni spojevi koji bi u njemu sudjelovali bili bi silanoli, silicijevi analozi alkohola. Išao je čak

tako daleko da je zamislio ledeni ocean nekog vanjskog planeta i prikazao životni ciklus u njemu, koji uz silicijeve spojeve uključuje amonijak i vodik no – ipak – vodu i ugljikove spojeve (SiC, CO, CO₂, HCN i ugljikovodike).⁶

Ima dva jaka razloga zašto hipotezu o silicijskom životu ne treba shvaćati suviše ozbiljno. Prvi je razlog geološki. Na Zemlji ima mnogo više silicija nego ugljika, pa ipak se kemija živoga temelji na ugljiku, a ne na siliciju. Štoviše, postoji svojevrstni geološki antagonizam između ta dva elementa: na našoj se Zemlji – kako slikovito kaže naš veliki popularizator kemije Fran Bubanović (1883. – 1956.) – vodi neprestana i “sudbonosna borba između kremične kiseline i ugljične”.¹¹ Bubanović pritom misli na to da ugljikov dioksid iz zraka (“ugljična kiselina”) rastače silikatne stijene. U tom procesu nastaju novi minerali, primjerice kremeni pijesak (“kremična kiselina”), minerali gline, te – najvažnije u kontekstu ovoga članka – karbonati. Karbonati dospijevaju, gibanjem tektonskih ploča, u magmu gdje od njih djelovanjem “kremične kiseline” nastaju silikati od kojih se potom formiraju eruptivne stijene. Ugljikov dioksid oslobođen iz karbonata vraća se u atmosferu kroz vulkansko grotlo.

Kemijski razlog još je jasniji. Sličnost ugljika i silicija nije mala, pa ipak nije tako velika kakva se čini pri usporedbi svojstava elementarnih tvari (tablica 1). Silicij gradi čvrste i postojeće veze Si–Si, ali samo u elementarnom stanju i, kako se vidi iz reakcije silicija s lužinama (jedn. 3), te su veze polarnije od analognih veza C–C u dijamantu (no uopće ne stvara dvostruke i trostruke veze, Si=Si i Si≡Si). Dok su alkani kemijski stabilni spojevi, od čega im potječe nekadašnje ime “parafini” (lat. *parum* + *affinis* = malog afiniteta), analogni spojevi silicija, silani, izrazito reaktivni.

Plinoviti silani, monosilan (SiH₄) i disilan (Si₂H₆) raspadaju se na elemente pri temperaturi od 450 °C (monosilan) i 300 °C (disilan), no viši silani raspadaju se već kod sobne temperature. Usto silani burno reagiraju s vodom i kisikom, pa na zraku dolazi do eksplozije:



Teško bi stoga bilo zamisliti biokemijske procese temeljene na silanima i njihovim derivatima, čak i pri vrlo niskim temperaturama. Silani ne postoje ni u živoj ni u neživoj prirodi, osim u međuzvezdanom plinu. To bi se moglo očekivati budući da voda pa ni kisik u elementarnom stanju nisu rijetkost u svemiru.

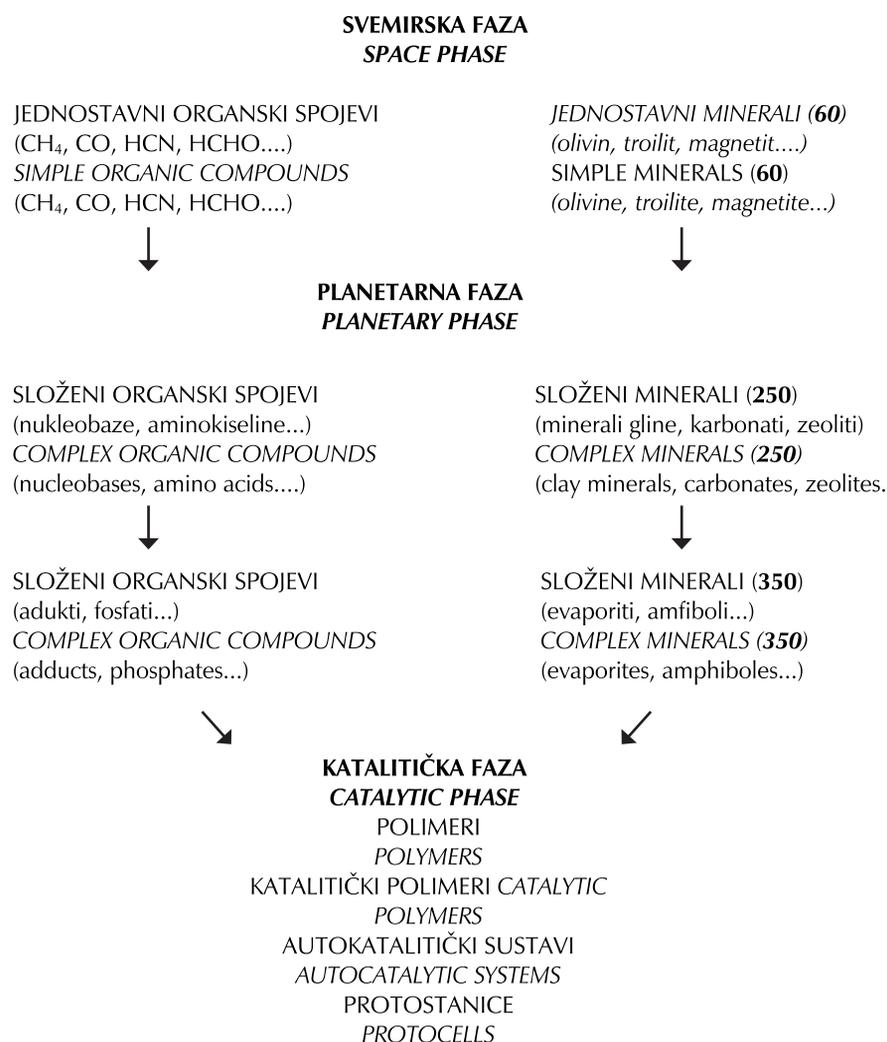
Ono što čini ugljikove spojeve jedinstvenima, toliko jedinstvenima da se kemija dijeli na organsku (= kemija ugljikovih spojeva) i anorgansku (= kemija svih drugih elemenata), proizlazi iz činjenice da ugljik gradi lance (katenacija) međusobnim povezivanjem svojih atoma jednostrukim, dvostrukim i trostrukim vezama. I kod silicija dolazi do povezivanja njegovih atoma, ali ne izravno, nego preko atoma kisika: –O–Si–O–Si–O–. Zahvaljujući tome, silicij gradi mnoge i raznolike strukture, vrlo slične strukturama organskih molekula (tablica 2).

Gledajući na taj način silicijeve spojeve, a posebice u usporedbi s ugljikovim, mogli bismo reći da ciklička struktura nekih vrsta ciklosilikata, Si₆O₁₈, odgovara strukturi cikličkih ugljikovodika, cikloheksana ili benzena, ili da inosilikati odgovaraju strukturom alkanima. Aluminij u alumosilikatima, posebice filosilikatima, ima ulogu nositelja negativnog

Tablica 2 – Vrste silikata

Table 2 – Types of silicates

Silikat Silicate	Formula kiseline Formula of acid	Oblik Form	Geološko ime Geological name	Minerali Minerals	Primjeri Examples
ortosilikati orthosilicates	Si(OH) ₄	monomer	nesosilikati nesosilicates		cirkon zirkon ZrSiO ₄
disilikati (pirosilikati) disilicates (pyrosilicates)	H ₆ Si ₂ O ₇	dimer	sorosilikati sorosilicates		melit melite Ca ₂ MgSi ₂ O ₇
metasilikati metasilicates	(H ₂ SiO ₃) _n	lanac chain	inosilikati inosilicates	pirokseni pyroxenes	diopsid diopside CaMgSi ₂ O ₆
metasilikati metasilicates	(H ₆ Si ₄ O ₆) _n	vrpca band	inosilikati inosilicates	amfiboli amphiboles	hornblenda hornblende Ca ₂ (Mg,Fe) ₄ Al(Si ₇ Al)O ₂₂ (OH,F) ₂
metaheksasilikati metahexasilicates	(H ₂ SiO ₃) ₆	prsten ring	ciklosilikati cyclosilicates		beril beryl Al ₂ Be ₃ (SiO ₃) ₆
metasilikati metasilicates	(H ₂ Si ₂ O ₅) _n	list foil	filosilikati phyllosilicates	minerali gline clay minerals	kaolinit kaolinite Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
metasilikati metasilicates	H ₂ SiO ₃	mreža web	tektosilikati tectosilicates	feldšpati feldspars	ortoklas orthoclase KAlSi ₃ O ₈



Slika 3 – Minerali i organski spojevi istodobno su evoluirali da bi stvorili prve katalitičke i autokatalitičke sustave od kojih su se potom razvile prve “žive” stanice (protostanice), a od njih sav život na Zemlji (ref. 13)

Fig. 3 – Minerals and organics evolved in parallel to form the first catalytic and autocatalytic systems leading to the first “live” cells (protocells) that further evolved into all living things (Ref. 13)

naboja baš kao što dušik u aminima i heterocikličkim spojevima nosi pozitivni naboj. Štoviše, kao što dušik stabilizira molekule i agregate proteina i nukleinskih kiselina vodikovim vezama, tako i aluminij stabilizira slojeve (“listove”) filosilikata solnim mostovima. Između silikata i nukleinskih kiselina mogu se povući mnoge usporedbe, no to opet ne znači da silikati mogu preuzeti funkciju nukleinskih kiselina.

Ipak, ne postoji nepremostivi jaz između živog i neživog, između kemije ugljikovih i kemije silicijevih spojeva. Minerali se, kao i živa bića, prilagođuju okolišu, pa složeniji geološki okoliš vodi do veće diversifikacije minerala baš kao što vodi do veće diversifikacije vrsta, drugim riječima, do evolucije kako živih bića tako i minerala. Štoviše, živa i neživa priroda ovise jedna o drugoj, pa kao što školjkaši, koralji i alge kremenjašice (dijatomeje) stvaraju biosedimente, sudjelujući u nastajanju stijena, tako su i minerali, kako pokazuju nove teorije o postanku života,^{12,13} sudjelovali

u nastajanju prvih “živih” struktura, poput “staničnih membrana”¹⁴ ili “enzima” – katalizatora za selektivnu polimerizaciju nukleotida^{15,16} i prve metaboličke cikluse.¹⁷ Čak bi se moglo reći da kada okoliš, kako u pogledu minerala tako i u pogledu organskih spojeva, postigne potrebnu razinu kompleksnosti, u njemu po prirodnoj nužnosti iznikne život, bez obzira na kemizam (slika 3). U vrijeme postanka života na Zemlji je bilo oko 1000 minerala, danas ih ima oko 5000.¹³

Silicij i kisik

Periodično ponavljanje svojstava kemijskih elemenata po skupinama razumije se samo po sebi: periodni sustav elemenata nije samo periodičan nego i prirodan, jer proizlazi iz prirodnog zakona, zakona periodičnosti (a ne iz neke više-manje proizvoljne klasifikacije).² No uspoređivanje

svojstava kemijskih elemenata iste skupine nije jedina mogućnost usporedbe.¹⁸ Ima više "sekundarnih sličnosti" elemenata, među kojima je i "sličnost konjičeva skoka".^{18,19} Tu je sličnost uočio južnoafrički kemičar Michael Laing kada je u Mendeljejevljevoj tablici vidio šahovsku ploču te ukazao na sličnost parova elemenata Ag/Tl, Cd/Pb, Zn/Sn i Ga/Sb. Njihova se sličnost ne očituje općenito, nego u specifičnim slučajevima (npr. PbCrO_4 i CdCrO_4 su žute tvari netopljive u vodi).¹⁹

Bez obzira na pronalaženje većih ili manjih "sekundarnih" zakonitosti periodnog sustava, očito je da one omogućavaju usporedbe kako elementarnih tvari tako i njihovih spojeva. Usporedba do koje sam došao, a u vezi je s temom ovoga članka, je usporedba silicija i kisika. I ta su dva kemijska elementa povezana "konjičevim skokom", no taj je potez izveden u obratnom smjeru od poteza južnoafričkog kemičara. No kako bilo da bilo, usporedba silicijeva dioksida s vodom vodi do zanimljivih opažanja.

Na prvi pogled usporedba nema smisla, jer i voda i silicijev dioksid su spojevi kisika, pa ih se može povezati samo u stehiometrijskom smislu, naime po analognoj molekularnoj formuli (XY_2 : $X = \text{O, Si}$, $Y = \text{H, O}$). No usporedba dobiva smisao ako strukturu oba spoja sagledamo u krutom, dakle kristalnom stanju.

U kristalnom stanju atomi silicija povezani su preko kisika (Si-O-Si) te grade tetraedarsku mrežu. U krutom stanju voda pokazuje sličnu strukturu, no sada se veza između centralnih atoma, ovaj put kisikovih, ostvaruje vodikovim vezama ($\text{O-H}\cdots\text{O} \leftrightarrow \text{O}\cdots\text{H-O}$), što znači da vodik u ledu ima funkciju kisika u kristalu silicijeva dioksida. Drugim riječima, i voda i silicijev dioksid su umreženi (3D) polimeri, samo se polimerizacija u prvom slučaju ostvaruje kovalentnim, a u drugom vodikovim vezama.

Usporedba silicijeva dioksida i vodikova oksida (vode) vodi do zanimljivih geokemijskih analogija. I led, H_2O , i kremen, SiO_2 , su minerali, vrlo rasprostranjeni kako na našem planetu tako i u svemiru. Na Saturnovom satelitu Titanu voda je posve preuzela ulogu silikatnih stijena: na moru tekućeg metana vide se otoci leda. Na Zemlji, na njezinoj površini geokemijski procesi teku poglavito djelovanjem vode, dok je ispod Zemljine kore, u magmi, glavni kemijski reagens silicijev dioksid. On se pojavljuje u slobodnom stanju, posebice u kiselim eruptivnim stijenama (npr. u granitu), a silikati (posebice tektosilikati) mogu se smatrati derivatima silicijeva dioksida. Slično tome, tlo i stijene na površini Zemlje sadržavaju vodu u slobodnom stanju. Ona sudjeluje u stvaranju nesilikatnih minerala (oksida, hidroksida, karbonata i dr.). Ili da to kažem bliže kemiji: voda i silicijev dioksid su reagensi, kiseline (u širem smislu riječi)* – silicijev dioksid u neživoj, a voda u živoj prirodi zajedno s njezinim neposrednim anorganskim okolišem, dakle u biosferi.

Ključna razlika svodi se na vezu, na "most" kojim su povezani centralni atomi (Si u SiO_2 , O u H_2O). Vodikova veza²⁰

mного je slabija od kovalentne veze: jakost vodikove veze u ledu iznosi 19 kJ mol^{-1} , a veze Si-O u kremenu 372 kJ mol^{-1} . Upravo vodikova veza omogućuje fleksibilno povezivanje biomolekula u agregate, supramolekulske strukture i "molekularne strojeve" na kojima se temelje biokemijski procesi. "Raspored molekula u stanicama uvjetovan je kemijskim vezama mnogo slabijim od kovalentnih veza", piše James D. Watson u poglavlju udžbenika molekulske genetike koje se, znakovito, u potpunosti bavi slabim vezama ("The importance of weak chemical interactions").²¹

Slabe veze su, prije svega, vodikove veze. One omogućuju preslagivanje molekula unutar stanice bez utroška energije, točnije samim toplinskim gibanjem, čime se s jedne strane postiže postojanost, a s druge promjenjivost staničnih struktura. Takav mehanizam – hijerarhiju interakcija – teško je, ako je uopće moguće, zamisliti kod hipotetskih oblika života koji bi se temeljili na nečem drugom, a ne na vodi i ugljikovim spojevima. Stoga usporedba silicija s kisikom i kremena s ledom pruža još jedan uvid u kemijsku logiku živog.

Zaključak

Uspoređivanje, ukazivanje na sličnosti i različitosti, izvođenje analogija – sve to omogućuje dublji uvid kako u prirodne tako i u društvene pojave. Ni kemija nije u tome iznimka. Uspoređivanje silicija s ugljikom i kisikom, silicijeva dioksida s ugljikovim dioksidom i vodom, alumosilikata s aminima i heterocikličkim spojevima ne služi samo za sistematiziranje gradiva nego i za dublje shvaćanje geokemijskih i biokemijskih procesa. S druge pak strane, spekulativna narav takvih usporedbi omogućuje kreativnom nastavniku da pobudi zanimanje učenika za kemiju, ali i za druge prirodne znanosti, prije svega za biologiju, geologiju i planetarnu astronomiju. Drugo je pak pitanje kako te usporedbe uvesti u redovnu nastavu kemije.

Nastavnik može, razumije se, uključiti usporedbe u predavanje o silicijevim spojevima. No bilo bi bolje da uspoređivanje ugljika i silicija, kao i uspoređivanje drugih elemenata prepusti učenicima. Njima će sigurno biti zanimljivo razmišljati o mogućnosti postojanja života u svemiru, a posebice onog koji bi se jako razlikovao od našeg, pa se na satu kemije ili biologije može održati "disputa" između učenika koji zagovaraju ugljični ili silicijski oblik izvanzemaljskog života, dok bi ostatak razreda glasovao u korist jedne ili druge ekipe. No ima i drugih pitanja, u vezi kemije silicija i zaključivanja po analogiji, na koja bi učenici mogli sami potražiti odgovor:

1. Ugljik i silicij su slični elementi. Zašto je CO_2 plin, a SiO_2 čvrsta tvar?
2. Zašto je talište SiO_2 mnogo više od tališta vode, a talište vode više od tališta sumporovodika?
3. Pri kojoj bi se temperaturi mogao odvijati izvanzemaljski život utemeljen na amonijaku, umjesto na vodi? Koliko bi taj život sporije tekao, uzmemo li u obzir da se kemijske reakcije, općenito govoreći, dvostruko ubrzavaju pri porastu temperature za 10°C ?

* Kemijska analogija vode i silicijeva dioksida postaje jasnija usporedbom njihovih reakcija s natrijevim oksidom u kojima nastaju odgovarajuće natrijeve soli: $\text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{NaOH}$ i $\text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3$. Silicijev dioksid je anhidrid silicijeve kiseline, a voda je "kisikovodična kiselina".

4. Usporedite strukture silikata sa strukturama ugljikovih spojeva.
5. Prozorsko staklo se proizvodi taljenjem silicijeva dioksida s vapnencem, CaCO_3 , i sodom, Na_2CO_3 . Koji prirodni proces oponaša taj tehnološki postupak?
6. Aluminij se može dobiti ne samo iz boksita nego i iz gline tako da se mineral kaolinit, $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$, reducira silicijem. Napišite jednadžbu reakcije. Koliki treba biti maseni omjer silicija i kaolinta u reakcijskoj smjesi? Koliko se glinice, Al_2O_3 , a potom aluminija može (teoretski) dobiti iz tone kaolinita?
7. Alkemičari su dobivali *spiritus salis marini* (klorovodik) grijanjem gline s kuhinjskom soli. Napišite reakciju NaCl s kaolinitom, $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$. Na kojem se svojstvu kaolinita temelji ta reakcija?
8. Zašto se dimetil sulfoksid, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$, zove "organska voda"?
9. Koji su ugljikovi polimeri analogni silikonima? Jesu li im slični po svojstvima?

Pri odgovaranju na ta pitanja treba imati na umu da svrha svakog učenja, pa tako i učenja kemije nije samo usvajanje činjenica nego prije svega stjecanje vještina i razvijanje specifičnog načina mišljenja. Upravo zaključivanje po analogiji omogućuje da učenik napusti naivni, "alkemijski" način mišljenja²² te počne razumijevati kemijske promjene na znanstveno utemeljen način.

Literatura

References

1. E. R. Scerri, The ambiguity of reduction, *Hyle* **13** (2) (2007) 67–81.
2. N. Raos, Povijesni pristup u nastavi kemije: periodni sustav elemenata, *Kem. Ind.* **64** (3-4) (2015) 169–172, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2015.001>.
3. D. Crdenić, Povijest kemije, Novi Liber i Školska knjiga, Zagreb, 2001., str. 506–511.
4. E. M. Smith, S. B. Shirey, S. H. Richardson, F. Nestola, E. S. Bullock, J. Wang, W. Wang, Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle, *Nature* **560** (2018) 84–87, doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0334-5>.
5. URL: <https://www.staff.ncl.ac.uk/j.p.goss/Research/Ntype-Diamond/> (15. 8. 2020.).
6. W. Bains, Many chemistries could be used to build living systems, *Astrobiology* **4** (2) (2004) 137–167, doi: <https://doi.org/10.1089/153110704323175124>.
7. D. Toomey, *Weird Life. The Search for Life That is Very, Very Different from Our Own*, Norton & Co., New York, 2014.
8. D. Schulze-Makuch, L. Irwin, The possibility of alien life in exotic forms on other worlds, <http://www.win2.pdf.com>.
9. P. L. Luisi, About various definitions of life, *Orig. Life Evol. Biosph.* **28** (1998) 613–622, doi: <https://doi.org/10.1023/a:1006517315105>.
10. C. Sagan, *The Cosmic Connection*, Hodder and Stoughton, London, 1974.
11. F. Bubanović, *Kemija živih bića*, Matica hrvatska, Zagreb, 1918., str. 39.
12. N. Raos, *The Cookbook of Life. New Theories on the Origin of Life*, HDKI/Kemija u industriji, Zagreb, 2018.
13. N. Raos, V. Bermanec, Catalysis in the primordial world, *Kem. Ind.* **66** (11-12) (2017) 641–654, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2017.014>.
14. M. J. Russell, A. J. Hall, The emergence of life from monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front, *J. Geol. Soc.* **154** (1997) 377–402, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1993.tb00267.x>.
15. J. P. Ferris, Montmorillonite-catalysed formation of RNA oligomers: the possible role of catalysis in the origins of life, *Phyl. Trans. Roy. Soc. B* **361** (2006) 1777–1786, doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1903>.
16. P. Mignon, J. Navarro-Ruiz, A. Rimola, M. Sodupe, Nucleobase stacking at clay edges, a favourable interaction for RNA/DNA oligomerization, *ACS Earth Space Chem.* **3** (2019) 1023–1033, doi: <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00156>.
17. G. Wächtershäuser, Evolution of the first metabolic cycles, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **87** (1990) 200–204, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.87.1.200>.
18. N. Raos, Je li periodni sustav elemenata doista periodičan?, *Kem. Ind.* **65** (11-12) (2016) 625–628, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2015.029>.
19. M. Laing, The knight's move in the periodic table, *Educ. Chem.* **36** (1999) 160–161.
20. N. Raos, Enigma: vodikova veza, Nove Slike iz kemije, ur. N. Raos, Hrvatsko kemijsko društvo i Školska knjiga, Zagreb, 2004., str. 91–101.
21. J. D. Watson, *Molecular Biology of the Gene*. 2nd Ed., W. A. Benjamin, Inc., New York, 1970., str. 102.
22. N. Raos, Prevladavanje alkemijskog načina mišljenja, *Kem. Ind.* **65** (1-2) (2016) 65–68, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2015.020>.
23. A. Graovac, Fullereni, Nove Slike iz kemije, ur. N. Raos, Školska knjiga i Hrvatsko kemijsko društvo, Zagreb, 2004., str. 107–116.
24. H. Aldersey-Williams, *The Most Beautiful Molecule. The Discovery of the Buckyball*, Wiley, New York, 1995.
25. L. A. Burchfield, M. Al Fahim, R. S. Wittman, F. Delodovici, N. Manini, Novamene: A new class of carbon allotropes, *Helyon* **3** (2017) e00242, doi: <https://doi.org/10.1016/j.helyon.2017.e00242>.

SUMMARY

Carbon, Silicon, Oxygen: Chemical Analogy Between Living and Non-living

Nenad Raos

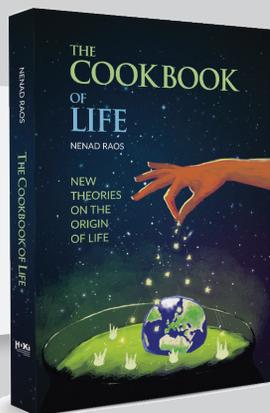
Carbon and silicon are similar chemical elements, being the members of the same, 14th (4B), group of the periodic system; not only in science fiction but also in serious scientific works could there be found speculations about the possibility of extra-terrestrial life based on silicon. In this paper, the physical and chemical properties of carbon and silicon, as well as their respective compounds were compared (alkanes – silanes, cyclic hydrocarbons – cyclosilicates, heterocyclic compounds – aluminosilicates). Their geochemistry shows mutual dependence of carbon and silicon circulations. Moreover, comparison of silica (quartz) with water (ice) points to unexpected similarities of the two minerals.

Keywords

Chemical education, hydrogen bond, origin of life, extra-terrestrial life, geochemistry

*Institute for Medical Research
and Occupational Health
Ksaverska c. 2
10 000 Zagreb, Croatia*

Review
Received August 30, 2020
Accepted October 15, 2020



Dr. sc. Nenad Raos

THE COOKBOOK OF LIFE (NEW THEORIES ON THE ORIGIN OF LIFE)

Knjigu je moguće kupiti po cijeni od **150,00 kn (PDV uključen)**.
Narudžbe se primaju telefonom (01/4872-499) ili e-poštom (hdki@hdki.hr)
Studenti dobivaju **50 %** popusta uz predložene indeksa, a članovi Društva **20 %**.
Amazon Kindle izdanje: [POVEZNICA](#)