



KEMIJA U NASTAVI

Uređuje: Nenad Raos

<https://doi.org/10.15255/KUI.2021.063>

KUI-20/2022

Pregledni rad

Prispjelo 20. rujna 2021.

Prihvaćeno 28. rujna 2021.

Kemija i arhitektura

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

Kemija je, kao i arhitektura, sintetička djelatnost: imajući u vidu funkciju budućeg proizvoda, one pronalaze konstrukcijska rješenja da bi postigle željenu formu. Razlika je, dakako, u njihovom objektu, jer arhitektura dizajnira građevine, a kemija molekule, njegovoj veličini (makroskopskoj – submikroskopskoj), fizičkoj naravi (klasični fizički sustav – kvantni sustav) i, najvažnije, u silama s kojima se dizajner (arhitekt, kemičar) hvata u koštac (gravitacija – elektromagnetske interakcije). U radu su dati primjeri inspiracije arhitekata kemijskim strukturama (Atomium) te primjene načela kemijske strukture u arhitekturi (geodetske kupole R. B. Fullera).

Ključne riječi

Nastava kemije, filozofija kemije, strukturna kemija, geodetske kupole, Richard Buckminster Fuller

Chemistry is the basic structure, ergo architecture.
(Richard Buckminster Fuller)

Uvod

Tri su osnovna elementa arhitekture: funkcija, konstrukcija i forma.¹ Jasno je da svako djelo arhitekta treba imati funkciju, jer je namijenjeno ispunjavanju ljudskih potreba, bilo da je riječ o osnovnim potrebama zaštite od prirodnih neudaca, ili pak o višim, kulturnim, obrazovnim ili religijskim potrebama čovjeka. To se temeljno nastojanje arhitekta, da zadovolji specifičnu potrebu ili specifične potrebe, ostvaruje kroz konstrukciju (tehnički aspekt gradnje) da bi se došlo do konačnog proizvoda, forme (oblika, plastike, ornamentike). Forma mora zadovoljavati kako pretpostavljenu funkciju tako i estetske zahtjeve korisnika, ali i zahtjeve šire društvene zajednice – jer je djelo arhitekta svima namijenjeno.

No na trijadu funkcija – konstrukcija – forma ne treba gledati mehanički, kao da je riječ o sastojcima (komponentama sustava) koji se mogu odvojiti i samostalno postojati, neovisno jedno od drugoga. Naprotiv, spomenutu trijadu treba shvaćati organski, gledati ju kao organsku cjelinu, a to znači u svjetlu činjenice da je svaki njezin element i uzrok i posljedica cjeline (poput odnosa stabla i lista na njemu), pa je stoga, u konačnoj analizi, uzrok i posljedica samoga sebe. To u konkretnom slučaju znači da funkcija određuje konstrukciju i formu, ali isto tako da konstrukcija

i forma određuju funkciju: bez konstrukcije i forme nema funkcije, baš kao što bez funkcije nema ni konstrukcije ni forme.

Nije mi međutim namjera da dalje razlažem teoriju i filozofiju arhitekture. Tome u časopisu ovoga profila nije mjesto. Pa ipak, bilo je potrebno da na njih ukažem da bih lakše postavio osnovno pitanje ovoga rada: "Mogu li se načela koja vrijede za arhitekturu primijeniti i na kemiju?" Ili, drugačije rečeno, postoji li veza ili, bolje, analogija kemije i arhitekture?

Rad je kemičara funkcionalan, usmjeren nekoj svrsi. Da bi se svrha ostvarila, kemičar se služi konstrukcijskim elementima koji ga vode do konačnog cilja, do željene forme, a to je tvar željenih svojstava. To vrijedi za kemiju kao društvenu pojavu, kao instituciju, i za kemiju kao prirodnu znanost. Danas se molekule projektiraju kao što se projektiraju školske zgrade i stambeni neboderi. Tome služe metode molekularnog modeliranja, pa je rad kemičara-teoretičara za računalom usporediv s radom arhitekta u projektnom birou. Pronalaženje konformacije molekule s najnižom energijom (konformacijska analiza) odgovara statičkom proračunu. Dizajn kemijske sinteze možemo usporediti s izvedbenim projektom, a njezino izvođenje u laboratoriju s radom građevinske operative. Analiza konačnog produkta, utvrđivanje njegovih fizičko-kemijskih te možebitnih bioloških (toksikoloških, farmakoloških) svojstva odgovara građevinskoj inspekciji, a plasiranje novog kemijskog pripravka na tržište nalik je na upotrebu arhitektonskog objekta.

U takvom pogledu na kemiju, u kojem funkcija odgovara molekularnom modeliranju, konstrukcija kemijskoj sintezi,

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

a forma rukovanju konačnim proizvodom, kemija se pokazuje kao arhitektura molekula. A kemija to doista i jest. Upravo to konstruktivističko, stvaralačko načelo odvaja kemiju od fizike, jer kemija nije “fizika molekula” – kako misle (neki) fizičari – nego upotreba fizike molekula radi postizanja kako znanstvenih tako i ekonomskih (tehnoških) ciljeva.^{2,3}

Funkcija kemije

Obično se voli reći da je kemija stasala u znanost kad se u 16. stoljeću, u renesansi, okrenula realnim potrebama ljudi: njemački liječnik Georg Bauer (Georgius Agricola) (1494. – 1555.) odlazi među rudare, baš kao što naš Petar Hektorović (1487. – 1572.) odlazi među ribare, da vidi, da istraži i na kraju da napiše što i kako oni rade. Hektorović nam daje izvještaj o tome kako ribari “ribaju” i o čemu “prigovaraju”, dok iz Agricolina pera izlazi knjiga koja razmatra sve aspekte rudarskog umijeća (*res metallica*) – od vještine parceliranja i kupovanja zemljišta, kopanja i održavanja rudnika do, nama u kontekstu ovoga članka najvažnijeg, opisa ruda (rudnih minerala) i načina njihove prerade. Riječ je o knjizi *De re metallica*, koja izlazi bogato opremljena (273 drvoreza) godinu dana nakon autorove smrti (slika 1).^{4,5}



Slika 1 – Drvorez iz *De Re Metallica*: živine pare, dobivene prženjem rumenice (HgS), kondenzirale su se na lišću stabla u zatvorenoj prostoriji (ref. 4,5)

Fig. 1 – Wood-cut from *De Re Metallica*: mercury vapors, obtained by roasting of cinnabar (HgS), were condensed on tree leaves in a sealed chamber (Ref. 4,5)

No nije tako. Prava je istina da se u 16. stoljeću alkemija podijelila na svoju praktičnu (tehnička alkemija) i teorijsku stranu (mistična alkemija). Od prve se razvila, preko fizike i kemije plinova (pneumatske kemije) suvremena kemija, a druga, mistična alkemija, svela je (al)kemiju na neku vrstu psihologije, puta prema dubinama ljudske duše, pa kao takva postoji i danas. Alkemija je u vidu egipatske (aleksandrijske) protokemije nastala iz kemijskog obrta, posebice iz metalurške prakse te teorije u vidu metalurških mitova⁶ i grčke, prije svega Aristotelove filozofije.⁷ No već od tih vre-

mena, dakle “oduvijek”, kemija je imala, kao i arhitektura, praktičnu funkciju, a to je pravljenje zlata (*chrysopoeia, ars transmutationis metallae*).⁸ Pri tome izraz “pravljenje zlata” ima dva značenja, pravljenje lažnog zlata, kao imitacije, i pravljenje pravog zlata putem transmutacije. No takva podjela pripada našem dobu, jer protokemičar ili alkemičar nije znao niti mogao razlikovati zlato od drugih kovina osim po fizičkim svojstvima. Stoga je imitacija bila samo neuspjela, nedovršena ili pak lažna transmutacija.

Ono što međutim suvremenog čitatelja zbunjuje je to da je alkemija imala drugačiju funkciju i drugačiju teoriju od suvremene kemije, pa mu se čini da nije imala ni funkciju ni teoriju. To dakako nije točno. Potreba egipatskih majstora koji su zlatom, srebrom i draguljima ukrašavali grobnice da tim materijalima nađu jeftiniju zamjenu isto je tako okrenuta ovozemaljskim potrebama kao i nastojanje današnjih kemičara da pronađu primjerenu (“ekološku”) zamjenu za fosilna goriva. Isto vrijedi i za europsku alkemiju, točnije za alkemičare koji su radili u podrumima velikaša ne bi li napravili veledjelo (*opus magnum*), tj. kamen mudraca (*lapis philosophorum*) da bi njime olovo ili živu pretvarali u zlato, koje je njihovom poslodavcu bilo potrebno za plaćanje vojske (jer vojnik je onda bio plaćen samo u zlatu) e da bi silom oružja proširio feudalni posjed. Neki su se feudanci i sami bavili alkemijom, poput “crne kraljice” Barbare Celjske (1381. – 1451.), gospodarice Medvedgrada.⁹

Mlada kemija, “kimija” (*chymia*) traži nove, moderne prostore za svoje djelovanje jer vojna sila (čitaj: otimanje proizvoda tuđeg rada) sve više ustupa mjesto tehničkoj sili, sili proizvodnje, sili napretka znanosti i tehnologije. Stoga kemija nalazi primjenu u medicini, točnije u ljekarništvu (*chymiatra, ijatrokemija*), a potom u svim proizvodnim djelatnostima. Kemičar je bio i ostao praktičar. Kako je osnovni “kemijski reagens” bila vatra, za srednjovjekovnog je čovjeka alkemičar bio *philosophus per ignem*, a još je u 18. stoljeću Jambrešić našao primjerenim da kemičara definira kao “Mešter pri ognju razluchojuchi” ili, po njemački, Feuer-Künstler (slika 2).^{10,11} Pa i riječ “lučba”, prevedenica njemačke riječi *Scheidkunst*, koja nalazi mjesto u Jambrešićevom, no i u dva stoljeća mlađem Šulekovom rječniku,¹² označava kemiju kao praktičnu (funkcionalnu) znanost, naime znanost koja se bavi lučenjem (razlučivanjem).

*Chymia, α, f. Meštria, vszakojachka dugovanya po ognju razpushtiti, razluciti, razsvoriti. razluciti: Razlucba znanost. e. Kunst allerley körper durch das feuer aufzulösen. zuschmelzen: e. Scheid-kunft. Mindent tüz által meg-olvasztó mešterég.
*Chymicus, a, um, P, ognju razlucben. Chymičb, durch feuer aufgelöst Tüz által el-olvasztott. 2. Ad Chymiam pertinens. Chymicus, i, & Chymista, α, m. Mešter pri ognju razluchojuchi. r. Feuer-Künstler. Tüzal meg-olvasztó mešter.

Slika 2 – Pojmovi kemija (*Chymia*) i kemičar (*Chymicus*) u Jambrešićevom rječniku (ref. 10)

Fig. 2 – Terms chemistry (*Chymia*) and chemist (*Chymicus*) in Jambrešić's Lexicon Latinum (Ref. 10)

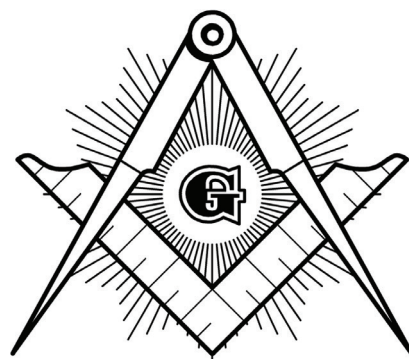


Slika 3 – Eiffelov toranj (ovdje prikazan u fazi izgradnje 1888. godine) trijumf je čovjeka nad silom težom. Unatoč gabaritima $125 \times 125 \times 300$ metara, njegova konstrukcijska masa iznosi samo 7300 t. Kad bi se na njegovom mjestu izgradila kamena piramida slična Keopsovoj, u nju bi trebalo ugraditi $1.562.500 \text{ m}^3$ ili 4,2 milijuna tona kamena. Teško da bi močvarno tlo na kojem leži Pariz moglo izdržati takav teret.

Fig. 3 – The Eiffel Tower (presented here during its construction in 1888) is a triumph of man over gravity. Despite its dimensions of $125 \times 125 \times 300$ meters, its construction mass equals only 7300 t. If in its place a stone pyramid, like that of Cheops, were to be built, $1,562,500 \text{ m}^3$ or 4.2 million metric tons of stone masonry would be needed. It is hardly possible that the muddy soil of Paris could carry such a weight.

Upravo u tom praktičnom, aplikativnom i funkcionalnom vidu kemije možemo tražiti korijen njezine popularnosti, naravno u smislu društvene pojave. Baš kao što smo okruženi arhitekturom, tako smo okruženi i proizvodima kemijske industrije, pa se o kemiji, kao i o arhitekturi, stvara kako pozitivna tako i negativna slika.^{13–15} To je i razumljivo, jer kako ima dobrih tako ima (još više) loših arhitektonskih rješenja, čak takvih – poput novoizgrađenog stambenog bloka u St. Louisu – da se moraju rušiti dinamitom (str. 231).¹ Isto bi se moglo reći i za kemiju. Samo se jedan od deset ili dvadeset tisuća sintetiziranih i ispitanih kemijskih spojeva pokaže dovoljno dobrim da postane novom ljekovitom tvari, svi ostali su “loša rješenja” i “neuspjeli projekti”. Kemija nam daje nove materijale, nove lijekove, ona određuje, poput arhitekture, naš način i stil življenja, no isto je tako glavni krivac za onečišćenje okoliša i globalno zatopljenje. Važnost kemije i arhitekture u svakodnevnom životu možemo vidjeti i u širenju značenja obiju riječi, a posebice riječi “kemija”,¹⁵ koja, znakovito, poprima i pozitivna i negativna metaforička značenja.* No da bi se funkcija kemije ostvarila, potrebno je posegnuti za konstrukcijom.

* Najnoviji primjer. U radio-emisiji vjerskog programa, u kojoj se govorilo o papinom posjetu Mađarskoj i Slovačkoj, novinarka je rekla da je papin posjet odisao “posebnom kemijom”. Na to se javio neki slušatelj da je upozori kako Bog djeluje po svojoj trećoj osobi, po Duhu Svetomu, a ne po “kemiji”. Novinarka se jedva izvukla: možda i Duh Sveti djeluje zahvaljujući svojoj kemiji?



Slika 4 – U znaku slobodnih zidara (masona) nalazi se i građevinski kutnik, osnovni zidarski alat, jer sve treba graditi pod pravim kutem (90°). U kemiji je međutim mnogo važniji tetraedarski kut ($109,5^\circ$).

Fig. 4 – The Freemason symbol depicts a square, a basic tool of a mason, because any construction requires right angles. However, in chemistry, the tetrahedral angle (109.5°) is of much greater importance.

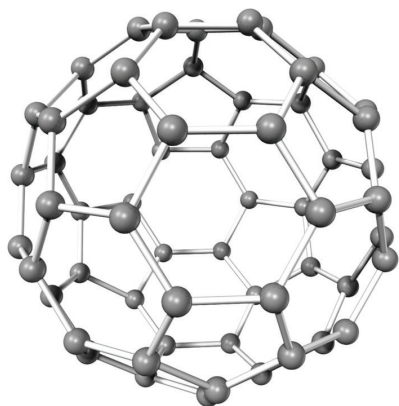
Konstrukcija u kemiji

U tehničkom, konstrukcijskom smislu arhitektura je borba protiv gravitacije: građevina teži da se pod svojom težinom sruši, a arhitekt je tu da je spriječi u toj prirodnoj težnji. To vrijedi za sve građevine izgrađene ljudskom rukom. Razlika je jedino u tehničkim sredstvima, koja sežu od metode prisanjanja nasuprotnih koso položenih linearnih elemenata (obično grana drveća) prašatora i prakoliba u kamenom dobu¹⁶ do stupova i frizova grčkih hramova, svodova gotičkih katedrala i mosta podignutog u nebo, Eiffelova tornja (slika 3). No bez obzira na sve bogatstvo arhitektonske plastike, arhitektura se temelji na horizontalama i vertikalama: stup podržava gredu ili se pak stup zaobljuje u luk prelazeći u horizontalu. Stoga je osnovni kut u arhitekturi kut od 90° , pravi kut (slika 4), osnovni lik je kvadrat, a osnovno geometrijsko tijelo kocka.

Taj tisućljetni kanon prekršio je američki arhitekt Richard Buckminster Fuller (1895. – 1983.) – na dobro arhitekture. “Bucky” je bio nekonvencionalni, ekscentrični intelektualac širokih vizija i interesa za kojeg kanadski književni kritičar Hugh Kenner (1923. – 2003.) kaže:

Je li Bucky arhitekt? Nije, govore arhitekti, konstruktor; ne, kažu inženjeri; matematičar; ne, kažu matematičari, nego neka vrsta pjesnika; ne, kažu književnici, samo brbljavac.¹⁷

Navedeni citat mogao bi se razumjeti i tako da je Fuller bio sve to skupa – i arhitekt, i konstruktor, i matematičar, i pjesnik – a usto i kemičar, jer se i kemijom na svoj način bavio. Upravo je njemu u čast “najljepša molekula na svijetu”,¹⁸ kuglasta molekula C_{60} (slika 5) nazvana buckminsterfullerenom, premda Buckminster Fuller nije imao niti mogao imati išta s njom, budući da je otkrivena dvije godine nakon njegove smrti. Ono što ga je najviše proslavilo bio je izum novog načina gradnje kupola.



Slika 5 – Predložena su mnoga imena za ovu fascinantnu molekulu sastavljenu od 60 ugljikovih atoma: ballene, sphere, soccerane, carbosoccer – ali je na kraju nazvana po R. B. Fulleru – buckminsterfulleren, ili (neslužbeno) buckyball (ref. 18, str. 90)

Fig. 5 – There were many ideas how to name this fascinating molecule composed of 60 carbon atoms: ballene, spherene, soccerane, carbosoccer – but finally it was named according to R. B. Fuller – buckminsterfullerene, or (unofficially) buckyball (Ref. 18, p. 90)

Tradicionalna gradnja kupola, metodom zakrivljenog svoda (“čemerjenja”), osniva se na prenošenju težine kupole u horizontalnom smjeru na potporne zidove. To znači da je veličina kupola određena čvrstoćom, a to znači debljinom zidova na kojima leži (pa su se stoga uz zidove zgrada s velikim kupolama počesto, statike radi, gradile kuće i stambeni blokovi). Taj je vjekovni problem građenja svodova velikih raspona Fuller riješio na genijalan način: načinio ih je u formi rešetkaste kupole koja je slična geodetskoj karti (geodetske kupole).

Riječ je naime o tome da Zemlja očima geodeta izgleda poput kugle prekrivene trokutnom mrežom, jer tri susjedne mjerne točke u geodeziji uvijek moraju činiti trokut. (To se čini osim ostalog i radi provjere: ako je mjerenje dobro obavljeno, zbroj kutova mjerenih iz susjednih točaka mora biti jednak 180° .) Zahvaljujući novom načelu gradnje, koji je patentirao 1954., Fuller je uspio 1958. godine izgraditi dotad najveću kupolu na svijetu, raspona 120 i visine 40 m, koja je unatoč orijaškim dimenzijama imala masu od samo 2000 t. Slijedila su i druga ostvarenja tog osebujnog arhitekta od kojih je najpoznatija kupola Američkog paviljona, promjera 76 m, na izložbi Expo 1967. u Montrealu (slika 6). No to nas više ne zanima, nas zanima kakve veze imaju geodetske kupole s kemijom?

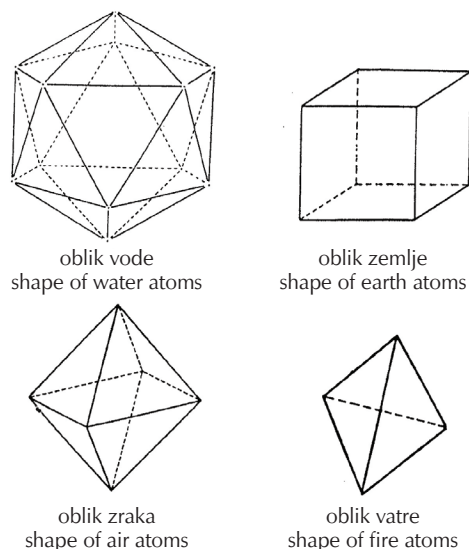
Odgovor je jednostavan: Fuller je nesvjesno primijenio arhitektonska načela kemije, načela građe molekula na izgradnju kupola. Koja su to načela? Osnovni arhitektonski (geometrijski) element molekule je crta (kemijska veza) i točka (atom, mjesto gdje se veze spajaju), pa se baš zbog toga u kemiji može primjenjivati teorija grafova.^{19,20} Viši kemijsko-arhitektonski element je simpleks, najjednostavnije tijelo u prostoru n dimenzija. To znači, jednostavno, da je u jednodimenzijском euklidskom prostoru (pravac) simpleks identičan s točkom, u dvodimenzijском prostoru (ravnina) simpleks odgovara trokutu, a u trodimenzijском



Slika 6 – Biosfera – američki paviljon na Svjetskoj izložbi 1967. u Montrealu, projekt R. B. Fullera

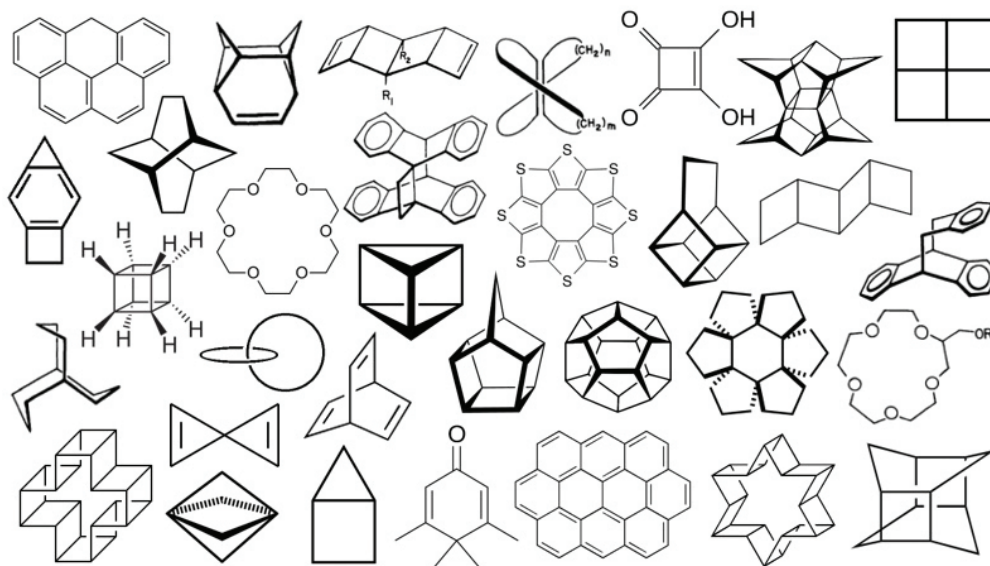
Fig. 6 – Biosphere – American pavilion at the World Exhibition 1967 in Montreal, Canada, designed by R. B. Fuller

prostoru trostranoj piramidi, tetraedru. Svako se složeno tijelo može razložiti na simplekse, na tetraedre, a tetraedri potom na trokute. To je uočio još Platon u dijalogu Timej, pa je počevši od trokuta došao do pet pravilnih, Platonovih tijela (slika 7). Smatrajući geometriju temeljem filozofije – pa je na ulazu u svoju školu, Akademiju, dao isklesati natpis “Neka ne ulazi onaj tko ne zna geometriju” – Platon je pravilna geometrijska tijela smatrao oblicima elemenata.^{21,22} Pri tome se misli na tradicionalne grčke elemente, zemlju, vodu, zrak i vatru. Platon je u kocki vidio oblik zemlje, u tetraedaru oblik vatre, u oktaedru oblik zraka, a u ikosaedru oblik vode. (Preostao je još dodekaedar – u kojem je vidio oblik svemira.) Iz navedenoga nije teško vi-



Slika 7 – Platonovi atomi: četiri pravilna geometrijska tijela (Platonova tijela) odgovaraju četverima tradicionalnim elementima, kao njihova forma

Fig. 7 – Platonic atoms: The four regular geometrical solids (Platonic solids) correspond to the shapes of the four traditional elements



Slika 8 – Strukture nekih egzotičnih molekula. One su egzotične zato jer imaju neke vezne kuteve vrlo različite od $109,5^\circ$. Arhitekt se bori s težinom, a kemičar s Baeyerovim naponom.

Fig. 8 – Structures of some exotic molecules. They are exotic because some of their bond angles are very different from 109.5° . An architect has to overcome gravity, and a chemist has to overcome Baeyer strain.

djeti poveznicu s modernom kemijom, ako se izraz “oblik vode” zamijeni izrazom “oblik molekule vode”.

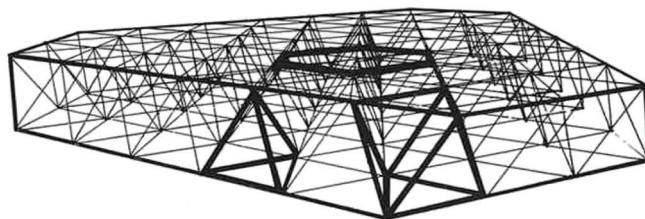
Jednostavnije rečeno, osnovni geometrijski elementi građe molekula nisu – kao u arhitekturi – vertikale i horizontale, osnovni kut nije pravi kut, osnovni lik nije kvadrat, a osnovno tijelo nije kocka, nego je osnovni element simpleks u trodimenzijskom prostoru (za trodimenzijske molekule) ili pak linija ili trokut (simpleks u dvodimenzijskom prostoru) za planarne molekule. Razlog tome leži u jednostavnoj činjenici da atome u molekuli povezuju elektromagnetske sile, dok se gravitacijska sila – iako zbog univerzalnosti djeluje i među atomima – može zbog slabosti posve zanemariti. Ili, da kažemo određenije, masa shvaćena inercijski (“troma masa”) ima utjecaj na svojstva atoma i molekula (izotopski i relativistički efekti²³), ali ga nema kad je shvaćena gravitacijski (“teška masa”), dakle kao uzrok privlačne sile atomskih jezgara i elektrona.

U praktičnom smislu to znači da vezni kutevi, kutevi koji definiraju strukturu molekula iznose $109,5^\circ$, 120° i 180° (sp^3 , sp^2 i sp hibridi). To ne znači da vezni kut, kut između tri atoma spojenih kovalentnom vezom, ne može poprimiti i druge vrijednosti. No odstupanje od tri navedene standardne vrijednosti povezano je s porastom potencijalne energije (Baeyerov napon), pa je sinteza kemijskih spojeva s takvim molekulama otežana, a molekula može usto biti i vrlo nestabilna. Za to drugo primjer je iznimno reaktivna molekula etilen-oksida, s dva atoma ugljika i jednim atomom kisika povezanim u trokut. Ipak su zahvaljujući umijeću kemijske sinteze kemičari uspjeli sintetizirati molekule egzotičnih struktura, poput molekule nalik na kocku (kuban) ili križ (helvetan) (slika 8).

To bi bile poveznice između kemije i arhitekture onako kako ih je Fuller uspostavio (slika 9). No Fulleru je čini se

mašta (poetska imaginacija) bila jača od percepcije stvarnosti, koju hoćeš-nećeš mora poštovati i arhitekt i kemičar. Ne znam što njegovi kolege misle o tome da se cijeli Manhattan pokrije geodetskom kupolom, no kemičari nemaju dvojbe da je u kemiji otišao predaleko:

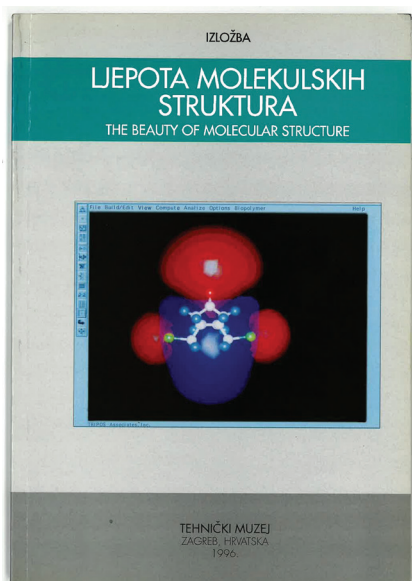
Fuller govori mnogo kemijskih besmislica [chemical rubbish]. On rabi terminologiju kvantne mehanike kao neku vrstu mističnog jezika, vjerojatno zato da uvjeri lakovjernog laika argumentima sumnjive vrijednosti, iako je daleko od toga da bude u tome usamljen. Fuller čini još mnoge nesklapnosti [specific misconceptions] u pisanju. Tvrdi da je jednostruka kemijska veza povezana s plinovitim stanjem, a dvostruka veza s tekućinama, i tome slično. (str. 149)¹⁸



Slika 9 – Nacrt konstrukcije geodetske kupole otkriva da je sastavljena od simpleksa (tetraedara), koji se potom ujedinjuju u složenija geometrijska tijela

Fig. 9 – Blueprint of construction of a geodesic dome shows that it is composed of a series of tetrahedra (simplex), connecting further into more complex geometrical shapes

Ima toga još. Fuller se čak potrudio da izračuna cijenu fotona, 1,5 milijardi dolara po funti, iako fotoni, znamo, nema-



Slika 10 – Naslovnica dvojezičnog kataloga izložbe “Ljepota molekularnih struktura” (autor izložbe: N. Raos) održane 1996. u zagrebačkom Tehničkom muzeju. Na izložbi su prikazane strukture 74 molekula što su ih poslali znanstvenici iz svih krajeva svijeta. Najljepša je molekula proglašena za “miss molekularnog svijeta”. Slika na naslovnici prikazuje elektrostatski potencijal oko molekule 2,3-bis(bromometil)-5,6-norbornene-7-ona (ref. 30).

Fig. 10 – Cover page of a bilingual catalogue of the exhibition “The Beauty of Molecular Structure” (authored by N. Raos) which took place in 1996 at the Technical Museum, Zagreb. At the exhibition, 74 molecular structures were presented, as delivered by the participants from all over the world. The most beautiful molecule was announced as “Miss Molecular World”. The picture shows electrostatic potential around molecule of 2,3-bis(bromomethyl)-5,6-norbornene-7-one (Ref. 30).

ju masu, a napisao je i da se “toplinski valovi” (infracrveno zračenje) mogu vidjeti golim okom. Bavio se i numerologijom, tražeći dublje značenje broja 20, jer toliko ima prirodnih (proteinskih) aminokiselina, ali i vrhova ikosaedra. No to možda i nije tako važno: velike ljude, znanstvenike i izumitelje pamtimo po velikim djelima a ne po ljudskim slabostima. Iza Fullera ostaje veliko arhitektonsko djelo, ali i kemijski spomenik u obliku nove klase molekula, alotropskih modifikacija ugljika kuglaste strukture koje se njemu u čast, premda nije nimalo doprinio njihovom otkriću, zovu fullereni.²⁴ (A nama ostaje da se zapitamo zar je toliko teško naučiti kemiju?)

Forma

Forma, vanjski, vidljivi oblik arhitektonskog djela mora, osim ostalog, zadovoljiti i estetske kriterije, iz čega proizlazi da je arhitektura grana likovne umjetnosti. To ne vrijedi, razumije se, za kemiju. Kemičar ne misli o ljepoti izgleda ni o ljepoti strukture stvari koju će dobiti u epruveti, nitko ne

radi sintezu samo zato da bi dobio lijepe kristale ili lijepe molekule. No to ne znači da i molekule ne mogu, kao i sve što postoji u prirodi (biljke, životinje, minerali) biti lijepe, toliko lijepe da su svojom ljepotom zaslužile da se prikažu na izložbi^{25,26} (slika 10).

Priroda može biti, čak bih se usudio reći da priroda mora biti inspiracija arhitekta.²⁷ No i molekule su dio prirode, objekti iz prirode, pa ne vidim razloga zašto i one ne bi poslužile kao osnova za arhitekturu. Tako i jest. Primjer toga je Atomium, centralni objekt s funkcijom izložbenog prostora i vidikovca izgrađen povodom svjetske izložbe u Bruxellesu 1958. godine (slika 11).



Slika 11 – Atomium u Bruxellesu podignut povodom svjetske izložbe 1958. godine je model prostorno centrirane kubične rešetke, kristalne strukture alfa-željeza (alotropne modifikacije stabilne do 907 °C), no i drugih metala (npr. mangana, kroma, vanadija, natrija). Konstrukcija je visoka 110 m, dok promjer kugli iznosi 20 m.

Fig. 11 – Atomium built in 1958 at the World Exhibition in Brussels (Belgium) represents a structure of alpha-iron (crystal modification of iron stable up to 907 °C), and many other metals like manganese, chromium, vanadium or sodium, i.e. body-centered cube. The construction is 110 m high, with sphere diameter of 20 m.

No u razmatranju molekule kao prirodnog objekta treba biti oprezan. Molekula nije ono što kemičar vidi pod mikroskopom. Slike molekula nisu njihove fotografije. Molekule se ne sastoje od kuglica i štapića, još manje od crtica i kružića. Veličinu atoma nemoguće je, zbog kvantne naravi objekta, definirati,²⁸ a o boji atoma, pa stoga i molekula, besmisleno je govoriti. Ono što kolokvijalno zovemo “molekulam” zapravo su njihovi ikonički modeli, njihove strukturne formule napisane na drugi način.²⁹ Postoje standardni načini označavanja atoma u molekularnim (ikoničkim) modelima (ugljik – crno, vodik – bijelo, kisik – crveno, dušik – plavo itd.), elektrostatsko polje oko molekule može se, kao na slici 10, prikazati u plavoj (pozitivni naboj) i crvenoj boji (negativni naboj), ali takvo što ne postoji u prirodi. Sve te boje i bojice, svi ti kružići i kuglice samo

su dio dogovornog prikaza strukture molekule. Ono što jest struktura molekule jesu koordinate atomskih jezgara ("atoma"), onako kako su određene u kristalu difrakcijom rendgenskog zračenja. Njihov grafički prikaz stvar je konvencije, ali i imaginacije kemičara.

Danas je rješavanje strukture kristala i molekula rutina, a dobivene su koordinate lako dostupne jer su pohranjene u elektroničkim datotekama. Strukture molekula mogu, zahvaljujući prije svega simetriji, biti fascinantne, pa stoga inspirativne kako za likovne umjetnike tako i za arhitekta. Primjer za to je "molekula nalik na nogometnu loptu", buckminsterfulleren (C_{60}) ili pak molekula DNA, čija je dvostruka uzvojnica prikazana na tisuće načina, a našla je mjesto i na naslovnoj stranici Pađanove knjige o biofilozofiji arhitekture.²⁷ Vrijeme je da i arhitekti počnu učiti kemiju.**

Zaključak

"Arhitektura je izniknula iz samoga čovjeka, iz njegovih životnih potreba i iz njegove brige za budućnost", temeljna je misao Zvonka Pađana o podrijetlu i smislu arhitekture (str. 192).²⁷ Isto bi se moglo reći i za kemiju. I ona je izniknula iz samoga čovjeka, iz njegovih životnih potreba i iz njegove brige za budućnost. Riječ je samo o drugim životnim potrebama i drugačijoj brizi za budućnost. U raznim povijesnim razdobljima kemija se prilagođavala promjenjivim potrebama čovjeka stvarajući nove tvari, od umjetnog zlata (u Egiptu) do umjetne "kolonijalne robe" (u Njemačkoj) – baš kao što je arhitektura u srednjem vijeku gradila katedrale, a u 20. stoljeću poslovne nebodere.

S didaktičkog stajališta, usporedba kemije i arhitekture dobra je za upoznavanje obje discipline, i arhitekture i kemije, jer se upravo usporedbama, povlačenjem analogija mogu pročitati osnovni pojmovi. Iako su daleko jedna od druge po području primjene, a posebice po veličini objekta kojim se bave, kemija i arhitektura imaju nešto zajedničko, a to je struktura, geometrija: "Kemija je u osnovi struktura, ergo arhitektura" – da ponovimo riječi Richarda Buckminstera Fullera koje sam izabrao za moto ovoga rada.

Koliko se od ovdje iznesenog može iskoristiti na satu kemiji ili na tu temu organiziranoj radionici ovisi o inventivnosti i motiviranosti kako nastavnika tako i učenika. Mogla bi se organizirati radionica s temom Atomiuma ili geodetskih kupola, u kojoj bi učenici, među ostalim, slagali molekulske modele tih arhitektonskih ostvarenja. No najjednostavnije bi bilo temu veze kemije i arhitekture obraditi rješavanjem zadataka. Navodim ih pet kao primjer:

1. Koliko je jača sila elektrostatskog privlačenja od gravitacijske sile kojom djeluje jezgra vodika na elektron

koji se nalazi od nje na udaljenosti Bohrova radijusa ($a = 53 \text{ pm}$)?

2. Eiffelov toranj možemo smjestiti u kvadratnu piramidu s bazom 125×125 i visinom 300 m. Masa njegove metalne konstrukcije iznosi 7300 to. Koliko je masa čelične konstrukcije tornja veća od mase zraka u piramidi određenoj njegovim gabaritima? Koliki je maseni, a koliki volumni udjel željeza u piramidi?
3. Energija veze C–H iznosi 414 kJ mol^{-1} . Koliku energiju treba utrošiti za kidanje jedne veze C–H? Koliko energiji veze C–H pridonosi gravitacijska sila (duljina veze je 110 pm)?
4. Atomium u Bruxellesu je model kristalne strukture alfa-željeza, prostorno centrirane kubične rešetke. Visina mu je 110 m. U kojem je mjerilu napravljen model? Kolika bi u tom modelu trebala biti velika jezgra atoma željeza? Kolika bi bila masa te jezgre?
5. Kolika bi bila masa molekule fullerena veličine Fullerove Biosfere u Montrealu? (Možda je i ne bi bilo tako teško napraviti kao što se to na prvi pogled čini – vidi ref. 24.)

Rješavanjem tih i sličnih problema učenik može steći predodžbu o veličini atoma i molekula i, još važnije, steći svijest o njihovoj realnoj egzistenciji, a to znači shvatiti atome i molekule kao stvari, predmete koji postoje na isti način kao što postoje nogometna igrališta i neboderi – unatoč svojoj sićušnosti.

Literatura References

1. B. Magaš, Arhitektura – pristup arhitektonskom djelu, Školska knjiga, Zagreb, 2012.
2. H. Vančik, Opus Magnum: An outline for the philosophy of chemistry, Found. Chem. **1** (1999) 239–254, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009989903921>.
3. E. R. Scerri, Top-down causation regarding the chemistry–physics interface: a sceptical view, Interface Focus **2** (1) (2012) 20–25, doi: <https://doi.org/10.1098/rsfs.2011.0061>.
4. G. Agricola, De re metallica libri XII, Basel, 1556.
5. G. Agricola, De Re Metallica (H. C. Hoover and L. H. Hoover, trans.), Dover Publ. Inc., New York, 1950.
6. M. Eliade, Kovači i alkemičari (prijevod M. Mayer), Biblioteka Zora, Grafički zavod Hrvatske, Zagreb, 1983.
7. D. Grdenić, Povijest kemije, Školska knjiga i Novi Liber, Zagreb, 2001., str. 157–202.
8. N. Raos, Zlatni san, Konzor, Zagreb, 1999.
9. S. Paušek-Baždard, Alkemijski pokusi kraljice Barbare Celjske (1381. – 1451.), Hrvatski alkemičari tijekom stoljeća, Školska knjiga, Zagreb, 2017., str. 36–51.
10. A. Jambressich, Lexicon Latinum intepretatione Illirica, Germanica, et Hungarica locuples, Zagreb, 1742. (pretpisak: A. Jambrešić, Lexicon latinum, Zavod za hrvatski jezik, Čakovec, 1992.)
11. N. Raos, Kemijski pojmovi u Jambrešićevom Lexicon Latinum (1742.), Prirodoslovlje **20** (1-2) (2020) 59–78.
12. B. Šulek, Hrvatsko-njemačko-talijanski rječnik znanstvenog nazivlja, Zagreb, 1874.–1875. (pretpisak, Globus, Zagreb, 1990.), str. 560.

* Svojedobno mi se obratio arhitekt Željko Kovačić (1951. – 2021.) s molbom da mu pomognem u izradi eksponata s temom molekule DNA za Muzej evolucije u Krapini. Ništa mu nije bilo jasno, strukture koje je skinuo s mreže bile su mu posve nečitljive. Sve se odjednom razjasnilo kad sam mu objasnio da molekula DNA nalikuje spiralnom stubištu: nukleinske baze su stepenice, a fosfatno-šećerni kostur rukohvat.

13. P. Laszlo, On the self-image of chemists, 1950-2000, *Hyle* **12** (1) (2006) 99–130.
14. A. Ede, Abraham Cressy Morrison in the agora: bringing science to the public, *Hyle* **12** (2) (2006) 193–214.
15. N. Raos, Zagovor i obrana kemije u djelu Frana Bubano-ovića, *Kem. Ind.* **70** (1-2) (2021) 49–56, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2020.021>.
16. Z. Pađan, Predarhitektura, pogled na prapočela arhitekture, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
17. H. Kenner, Bucky: A Guided Tour of Buckminster Fuller, William Morrow, New York, 1973., p. 81.
18. H. Aldersey-Williams, The Most Beautiful Molecule. The Discovery of Buckyball, Willey and Sons, New York, 1995.
19. N. Raos, Što nam mogu reći vrelišta alkana?, *Kem. Ind.* **65** (3-4) (2016) 175–178, <https://doi.org/10.15255/KUI.2015.039>.
20. N. Raos, Kako prebrojati konstitucijske izomere alkana, *Kem. Ind.* **67** (3-4) (2018) 145–148, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2017.055>.
21. N. Raos, Pojam materije u grčkoj filozofiji (II): atomizam, Nove Slike iz kemije. Priručnik kemije u nastavi. (ur. N. Raos), Školska knjiga i Hrvatsko kemijsko društvo, Zagreb, 2004., str. 25–36.
22. N. Raos, Atomism in Greek philosophy, *Kem. Ind.* **51** (9) (2002) 385–392.
23. N. Raos, Specijalna teorija relativnosti u kemiji, *Kem. Ind.* **69** (11-12) (2020) 659–664, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2019.013>.
24. A. Graovac, Fullereni, Nove Slike iz kemije. Priručnik kemije u nastavi (ur. N. Raos), Školska knjiga i Hrvatsko kemijsko društvo, Zagreb, 2004., str. 107–116.
25. N. Raos, Ljepota molekularnih struktura/The Beauty of Molecular Structure, katalog izložbe, Tehnički muzej, Zagreb, 1996.
26. D. Čokić, Sva Ljepota molekula, *Vjesnik*, 3. 10. 1996., str. 11.
27. Z. Pađan, Podrijetlo arhitekture. Biofilozofija arhitektonske umjetnosti, Školska knjiga, Zagreb, 2011.
28. N. Raos, Kako definirati veličinu atoma, *Kem. Ind.* **70** (9-10) (2021) 581–587, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2021.019>.
29. S. H. Vollmer, Space in molecular representation; or how pictures represent objects, *Philosophy of Chemistry. Synthesis of a New Discipline* (D. Baird, E. Scerri, L. McIntyre, Eds.), Springer, Dordrecht, Netherlands, 2006., pp. 293–308.
30. G. M. Keser, G. Náráy-Szabó, Designed π -face selectivity by molecular electrostatic potential, *Tetrahedron Lett.* **49** (1994) 9255–9258.

SUMMARY

Chemistry and Architecture

Nenad Raos

Chemistry, as well as architecture, are synthetic disciplines; keeping in mind the function of a final product, they attempt to find construction solutions to obtain a desired shape. There is certainly a difference in the object of design, as architecture is aimed at the design of buildings, and chemistry at the design of molecules, the size of their objects (macroscopic vs. submicroscopic), their nature (classical-physical systems vs. quantum systems) and, most importantly, they differ in forces a designer has to cope with (gravitation vs. electromagnetic interactions). This paper presents examples of architectural projects inspired by chemical structures (Atomium), as well as the application of chemical principles in architecture and construction of geodesic domes, devised by American architect Richard Buckminster Fuller (1895–1983).

Keywords

Chemical education, philosophy of chemistry, structural chemistry, geodesic domes, Richard Buckminster Fuller

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

*Review
Received September 20, 2021
Accepted September 28, 2021*