

# Mononuklearne i polinuklearne okso vrste molibdena(VI) i vanadija(IV) s derivatima aminokiselina

---

Vrbanec, Gordana

Doctoral thesis / Disertacija

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:448343>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





University of Zagreb  
FACULTY OF SCIENCE

Gordana Vrbanec

**MONONUCLEAR AND POLYNUCLEAR OXO  
SPECIES OF MOLYBDENUM(VI) AND  
VANADIUM(IV) WITH AMINO ACID DERIVATIVES**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2017





Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Gordana Vrbanec

**MONONUKLEARNE I POLINUKLEARNE OKSO  
VRSTE MOLIBDENA(VI) I VANADIJA(IV) S  
DERIVATIMA AMINOKISELINA**

DOKTORSKI RAD

Mentorica: prof.dr.sc. Marina Cindrić

Zagreb, 2017.





University of Zagreb  
FACULTY OF SCIENCE

Gordana Vrbanec

**MONONUCLEAR AND POLYNUCLEAR OXO  
SPECIES OF MOLYBDENUM(VI) AND VANADIUM(IV)  
WITH AMINO ACID DERIVATIVES**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: prof. dr. sc. Marina Cindrić

Zagreb, 2017



## Zahvala

Hvala prof. dr.sc. Marini Cindrić na stručnom vodstvu tijekom izrade ove disertacije, na svoj ekspertnoj i moralnoj potpori! *Science is facts; just as houses are made of stones, so is science made of facts; but a pile of stones is not a house and a collection of facts is not necessarily science. (Henri Poincare)*

Puno hvala prof. dr.sc. Gordani Pavlović, prof. dr. sc. Dubravki-Matković Čalogović, izv. prof. dr.sc. Biserki Prugovečki i izv.prof.dr.sc. Mirti Rubčić na pomoći oko identifikacije pripremljenih spojeva i njihovom prikazu!

Hvala mojim kolegama iz I&R, Pliva Hrvatska d.o.o., Zagreb, na ekspertnoj i moralnoj podršci! Uz vas sam rasla na svim poljima...

Hvala svim djelatnicima ZOAKa, koji su me uveseljavali sve ove godine. Zapravo, divno je imati dva ekspertna doma!

Hvala mojim prijateljima, ima vas toliko da se bojim da nekog ne ispustim...

I naposljetku hvala mojoj obitelji! Bez vas ovo ne bi značilo mnogo! A vjerojatno ga ne bi ni bilo! Mama, treba biti da bi shvatila!

Katarina, Veronika, Tomislave, hvala na ljubavi, potpori i strpljenju! *Kad srce toliko je puno...Života....Ovo je zbog vas i sa vama...*

*Ako snivaš, ali ti snovi nisu sve;  
Ako misliš; ali ti misli uvijek ostanu čiste...  
Ako znaš primati pobjedu i poraz,  
Primati jednako jedno i drugo...  
Ako možeš podnijeti da tvoju istinu  
Varalice iskrivljuju kako bi lakše prevarili budale...  
Ako vidiš kako u komadiće razbijaju tvoj cilj  
I ako se sagneš podignuti i pokupiti ostatke...  
Ako možeš skupiti sva svoja dobra  
I staviti ih na kocku, sve odjednom,  
I ako si spreman ponovno krenuti kao na početku,  
Ne izustivši ni riječi, izgubivši sve uz osmijeh...*

R. Kipling



# Sadržaj

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SAŽETAK.....                                                                                                                                                               | XII |
| ABSTRACT .....                                                                                                                                                             | XIV |
| § 1. UVOD.....                                                                                                                                                             | 1   |
| § 2. LITERATURNI PREGLED .....                                                                                                                                             | 3   |
| 2.1. Polioksometalati .....                                                                                                                                                | 3   |
| 2.2. Polioksomolibdati.....                                                                                                                                                | 9   |
| 2.3. Polioksovanadati .....                                                                                                                                                | 15  |
| 2.4. Polioksomolibdovanadati .....                                                                                                                                         | 18  |
| 2.5. Metode pripreme polioksometalata.....                                                                                                                                 | 21  |
| 2.6. Polioksometalatne vrste s aminokiselinama i njihovim derivatima .....                                                                                                 | 23  |
| § 3. EKSPERIMENTALNI DIO .....                                                                                                                                             | 26  |
| 3.1. Priprava ishodnih supstancija .....                                                                                                                                   | 26  |
| 3.1.1. Priprava oksobis(pentan-2,4-dionato)vanadija(IV), $[VO(C_5H_7O_2)_2]$ .....                                                                                         | 26  |
| 3.1.2. Priprava dioksobis(salicilaldehidato)molibdena(VI), $[MoO_2(C_7H_5O_2)_2]$ .....                                                                                    | 26  |
| 3.1.3. Pokušaj pripreme kalijeva N-saliciliden-DL-aspartata, L-asparaginata i L-glutaminata .....                                                                          | 26  |
| 3.1.4. Priprava N-saliciliden-L-ornitina.....                                                                                                                              | 27  |
| 3.2. Reakcije dioksobis(salicilaldehidato)molibdena(VI) s aminokiselinama .....                                                                                            | 28  |
| 3.2.1. Reakcija s D,L-asparaginom: izolacija kompleksa $[Mo_2O_4(\eta^3-L3)_2]$ , $[MoO_2(\eta^4-L3)]$ i kumarin-3-karboksamida, $C_{10}H_7NO_3$ .....                     | 28  |
| 3.2.2. Reakcija s L- glutaminom: izolacija sukcinamida $C_4H_8N_2O_2$ .....                                                                                                | 30  |
| 3.2.3. Reakcija s L-ornitin hidrokloridom: izolacija kompleksa $[MoO_2(C_{19}H_{19}N_2O_5)(CH_3OH)]Cl \cdot CH_3OH$ (ML5 <sub>cikl</sub> ) .....                           | 31  |
| 3.3. Reakcije spojeva vanadija (IV) s aminokiselinama .....                                                                                                                | 32  |
| 3.3.1. Reakcija s D,L-asparaginom: izolacija polioksovanadata $\{[Na(H_2O)_4]_2(\mu-H_2O)_2(H_3O^+)_4\} [V_9V(V^V)O_{28}]$ i kumarin-3-karboksamida, $C_{10}H_7NO_3$ ..... | 32  |
| 3.3.2. Reakcija s L-glutaminom: izolacija kompleksa $[VO(C_{12}H_{12}N_2O_4)(OC_2H_5)(HOC_2H_5)]$ .....                                                                    | 33  |
| 3.3.3. Reakcija vanadil sulfata sa salicilidenskim derivatom L-ornitin hidroklorida.....                                                                                   | 33  |
| 3.4. Reakcije molibdovanadata .....                                                                                                                                        | 36  |
| 3.4.1. Reakcija s L-asparaginskom kiselinom: izolacija $(Bu_4N)_3[Mo^V Mo^VI O_{19}]$ i $(Bu_4N)(Et_3NH)[Mo_2V_2O_9(C_{11}H_8NO_5)_2] \cdot CH_3OH$ .....                  | 36  |
| 3.4.2. Reakcija s D,L-asparaginom: izolacija $[BrMo^V_x Mo^VI_{(12-x)} O_{44}]^{n-}$ .....                                                                                 | 39  |
| 3.4.3. Reakcija s L-glutaminom .....                                                                                                                                       | 40  |
| 3.4.4. Reakcija s L-ornitinhidrokloridom: izolacija $(Bu_4N)_2[Mo_4V_6O_{28}] \cdot 3H_2O$ ,.....                                                                          | 40  |

|                                                                                                                          |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $[Mo^V_x Mo^{VI}_{13-x} V^{IV}_5 V^V_{(5-x)} O_{62} Br]^{n-}$ .....                                                      | 40           |
| 3.4.5. Reakcija bez dodatka aminokiseline: izolacija $[Mo^V_x Mo^{VI}_{13-x} V^{IV}_y V^V_{(5-y)} O_{62} Br]^{n-}$ ..... | 41           |
| <b>3.5. MATERIJALI I METODE</b> .....                                                                                    | <b>43</b>    |
| 3.5.1. Polazne supstancije .....                                                                                         | 43           |
| 3.5.2. Kemijska analiza .....                                                                                            | 43           |
| 3.5.3. Nuklearna magnetska rezonancijska (NMR) spektroskopija .....                                                      | 43           |
| 3.5.4. Rentgenska strukturna analiza .....                                                                               | 43           |
| 3.5.5. FT-IR spektroskopija .....                                                                                        | 43           |
| 3.5.6. Termogravimetrijska analiza .....                                                                                 | 44           |
| 3.5.7. Određivanja udjela molibdena i vanadija .....                                                                     | 44           |
| <b>§ 4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....                                                                                   | <b>46</b>    |
| <b>4.1. Reakcije nastajanja izopoliokso metalata</b> .....                                                               | <b>48</b>    |
| 4.1.1. Reakcije s D,L-asparaginom .....                                                                                  | 48           |
| 4.1.2. Reakcija s L-glutaminom .....                                                                                     | 51           |
| 4.1.3. Reakcije s L-ornitin hidrokloridom .....                                                                          | 53           |
| 4.1.4. Usporedba katalitičke uloge vanadija(IV) i molibdena(VI) u reakcijama oksidativne<br>dekarboksilacije .....       | 60           |
| <b>4.2. Reakcije molibdovanadata</b> .....                                                                               | <b>64</b>    |
| 4.2.1. Reakcije s L-asparaginskom kiselinom .....                                                                        | 64           |
| 4.2.2. Reakcije s D,L-asparaginom i L-glutaminom .....                                                                   | 74           |
| 4.2.3. Reakcija s L-Ornitiin hidrokloridom .....                                                                         | 76           |
| 4.2.4. Reakcija bez dodatka aminokiseline .....                                                                          | 77           |
| 4.2.5. Kvalitativna in-line vremenski ovisna infracrvena spektroskopija reakcijskih smjesa .....                         | 78           |
| 4.2.6. Uloga aminokiselina u nastanku polioksometalatnih vrsta .....                                                     | 84           |
| <b>§ 5. ZAKLJUČAK</b> .....                                                                                              | <b>87</b>    |
| <b>§ 6. POPIS OZNAKA, KRATICÂ I SIMBOLA</b> .....                                                                        | <b>90</b>    |
| <b>§ 7. LITERATURNI IZVORI</b> .....                                                                                     | <b>91</b>    |
| <b>§ 8. DODATAK</b> .....                                                                                                | <b>XVIII</b> |
| <b>§ 9. ŽIVOTOPIS</b> .....                                                                                              | <b>XXXII</b> |





Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
**Kemijski odsjek**

Doktorska disertacija

## SAŽETAK

### MONONUKLEARNE I POLINUKLEARNE OKSO VRSTE MOLIBDENA(VI) I VANADIJA(IV) S DERIVATIMA AMINOKISELINA

Gordana Vrbanec

Pliva Hrvatska d.o.o., Prilaz baruna Filipovića 25, Zagreb

U okviru disertacije opisani su rezultati istraživanja reakcija okso vrsta molibdena(VI) i vanadija(IV) s derivatima salicilaldehida i L-asparaginske kiseline, D,L-asparagina, L-glutamina te L-ornitina. Opažena je i opisana katalitička uloga izoliranih oksomolibdatnih i oksovanadatnih vrsta u oksidativnoj dekarboksilaciji asparagina pri čemu dolazi do nastanka kumarin-3-karboksamida i dekavanadata, odnosno kompleksa  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\text{C}_{11}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_3)_2]$ , dok je u reakciji s glutaminom izoliran sukcinamid odnosno kompleks  $[\text{VO}(\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_4)(\text{OC}_2\text{H}_5)(\text{HOC}_2\text{H}_5)]$ . U reakciji s L-ornitinom nastao je diimin i došlo je zatvaranja piperidinskog prstena i koordinacije nastalog diimin na  $[\text{MoO}_2]^{2+}$  kationsku vrstu. Opisana je uloga aminokiselina u reakcijama nastajanja molibdovanadatnih polioksomolibdatnih vrsta. Pripravljene su i opisane tetranuklearne molibdovanadatne vrste  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{C}_{11}\text{H}_8\text{NO}_5)_2]^{2-}$  s derivatom salicilaldehida i L-aspartata, molibdatni anion Lindquistovog tipa,  $[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{3-}$ , oktamolibdati  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{NH}_4)\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$  i  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{H}_3\text{O})\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$  te molibdati i molibdovanadati, Kegginovog  $[\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(12-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{44}]^{n-}$ , odnosno *super-Kegginovog* tipa  $[\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_5^{\text{IV}}\text{V}_{(5-x)}^{\text{V}}\text{O}_{62}]^{n-}$ . Pripravljene spojeve su identificirani na osnovi rezultata kemijske analize, spektroskopskih metoda, termičkih metoda (termogravimetrija i diferencijalna pretražna kalorimetrija) te difrakcije rentgenskih zraka na polikristalnom i monokristalnom uzorku.

(94 stranice, 50 slika, 28 tablica, 90 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski )

Rad je pohranjen u Središnjoj kemijskoj knjižnici, Horvatovac 102a, Zagreb i Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici, Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb.

Ključne riječi: aminokiseline/ molibden(VI)/ polioksomolibdovanadati/ polioksomolibdati/ polioksovanadati/ vanadij(IV)

Mentor: prof. dr.sc. Marina Cindrić, redoviti profesor u trajnom zvanju

Rad prihvaćen: 06. prosinca 2017.

Ocjenitelji:

1. izv. prof. dr.sc. Ines Primožič
2. prof. dr.sc. Marina Cindrić, redoviti profesor u trajnom zvanju
3. prof. dr.sc. Gordana Pavlović, redoviti profesor u trajnom zvanju





University of Zagreb  
Faculty of Science  
**Department of Chemistry**

Doctoral Thesis

## ABSTRACT

### MONONUCLEAR AND POLYNUCLEAR OXO SPECIES OF MOLYBDENUM(VI) AND VANADIUM(IV) WITH AMINO ACID DERIVATIVES

Gordana Vrbanec

Pliva Croatia Ltd., Prilaz baruna Filipovića 25, Zagreb, Croatia

The reaction results of oxo molybdenum(VI) and vanadium(IV) species with salicylaldehyde amino acids (L-aspartic acid, D,L-asparagine, L-glutamine and L-ornithine) derivatives are described in the thesis. In the reactions of molybdenum(VI) or vanadium(IV) with D,L-asparagine derivatives, the coumarine-3-carboxamide, decavanadate and  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\text{C}_{11}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_3)_2]$  were obtained. Succinamide was obtained from the reactions with L-glutamine and dioxomolybdenum(VI), while with vanadylsulfate mononuclear  $[\text{VO}(\text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_4)(\text{OC}_2\text{H}_5)(\text{HOC}_2\text{H}_5)]$  complex was obtained. The dioxomolybdenum(VI) complex with piperidine derivative was observed due to the diimine formation when L-ornithine was used. Molybdovanadate reactions resulted in tetranuclear mixed complex formation with aspartate derivative and Lindquist type molybdate  $[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{3-}$ . Octa- $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{NH}_4)\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$  i  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{H}_3\text{O})\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$ . Keggin type molybdate  $[\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(12-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{44}]^{n-}$  and super-Keggin molybdovanadate  $[\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_5^{\text{IV}}\text{V}_{(5-x)}^{\text{V}}\text{O}_{62}]^{n-}$  were observed and characterized. Prepared compounds were identified and characterized by means of chemical and thermogravimetric analysis in combination with differential scanning calorimetry, spectroscopy methods, X-ray diffraction on monocrystalline and polycrystalline samples where applicable.

(94 pages, 50 figures, 28 tables, 90 references, original in Croatian)

Thesis deposited in Central Chemical Library, Horvatovac 102A, Zagreb, Croatia and National and University Library, Hrvatske bratske zajednice 4, Zagreb, Croatia.

Keywords: amino acids/ molybdenum(VI)/ molybdate/ molybdovanadate/ polyoxometalate/ vanadium(IV)

Supervisor: prof.dr.sc. Marina Cindrić, Full Professor

Thesis accepted: December 6<sup>th</sup>, 2017

Reviewers:

1. Dr. Ines Primožič, Associate Professor
2. Dr. Marina Cindrić, Professor
3. Dr. Gordana Pavlović, Professor



## § 1. UVOD

Polioksometalati su u kliničkim studijama pokazali antivirusno (HIV, herpes simplex), antitumorsko (primjerice rak gušterače, dojki, jajnika i sl.) i antibakterijsko djelovanje, pri čemu je kod polioksomolibdata primjećena antitumorska aktivnost širokog spektra.<sup>1</sup> S druge strane, polioksovanadati stvarajući interakcije s proteinima, primjerice miozinom i kalcij-ATP-azom, utječu i na mitohondrijske funkcije. Za razliku od postojećih farmaceutskih pripravaka s antitumorskim djelovanjem, poput cisplatina i gemcitabina, toksičnost polioksometalatnih vrsta je znatno niža. Ujedno, velika topljivost u vodi čini ih pogodnim za pripravu gotovih farmaceutskih oblika.<sup>2</sup>

Kako točan mehanizam djelovanja još uvijek nije razjašnjen, osim pripreme novih derivata polioksometalatnih vrsta, istražuju se i njihove interakcije s proteinima, posljedično i aminokiselinama. Kao model za proučavanje mehanizma interakcije lijekova s biološkim makromolekulama, među najčešće korištenim je albumin goveđeg seruma (BSA, eng. *bovine serum albumine*), molekula koja služi za skladištenje i transport endogenih i egzogenih tvari u plazmi.<sup>3</sup>

U literaturi su poznate i opisane katalitičke reakcije enzima koji sadrže molibden (hidroksilaze i oksotransferaze)<sup>4</sup> i vanadij (nitrogenaze i haloperoksidaze).<sup>5,6</sup>

Molibden i vanadij prisutni su u proteinima kao mononuklearne okso vrste. Jedini primjer proteina koji sadrži polinuklearnu oksovrstu molibdena je protein koji sadrže bakterije za fiksiranje dušika i služi za skladištenje molibdena.<sup>7</sup> Na taj način, bakterije osiguravaju zalihu molibdena, kojeg koriste za sintezu FeMo kofaktora nitrogenaze.<sup>8</sup> Mononuklearni kompleksi molibdena(VI) i vanadija(IV) s derivatima aminokiselina istražuju se u svrhu oponašanja uvjeta okoline, enzima koji sadrže molibden ili vanadij, *in vitro*.

Ovo istraživanje podijeljeno je u dvije osnovne cjeline; a) reakcije izopoli- i b) reakcije heteropolioksometalatnih vrsta. U reakcijama izopolioksometalatnih vrsta proučavana je katalitička aktivnost i koordinacijska kemija molibdena(VI) i vanadija(IV) s derivatima aminokiselina (L– asparaginske kiseline, D,L–asparagina, L–glutamina i L–ornitina), dok je u

reakcijama polioksomolobdovanadata istraživana uloga aminokiselina u nastajanju polioksosvrsta.

Do danas je u literaturi opisan malen broj reakcija polioksometalatnih vrsta s derivatima aminokiselina, iako su istraživanja pokazala da predstavljaju važan segment u razumijevanju bioloških procesa.

## § 2. LITERATURNI PREGLED

### 2.1. Polioksometalati

Polioksometalati (POM) se mogu definirati kao složene (engl. *clusters*) poliokso  $\{MO_x\}$  jedinice, koje nastaju kondenzacijom okso aniona metala pete i šeste skupine prijelaznih elemenata.

Berzelius je 1826. godine primjetio da reakcijom amonijevog molibdata uz suvišak fosforne kiseline dolazi do nastanka svjetložutih kristala, što je potaklo mnoge priznate znanstvenike tog doba, na istraživanje molibdata i volframata u sličnim uvjetima s ciljem da se objasni struktura i svojstva dobivenih kemijskih vrsta. Keggin je 1933. godine uspio riješiti kristalnu strukturu dodekafosfovolframove kiseline,  $H_3[PW_{12}O_{40}] \cdot 3H_2O$ , iz podataka dobivenih difrakcijom rentgenskih zraka na praškastom uzorku.<sup>9, 10</sup>

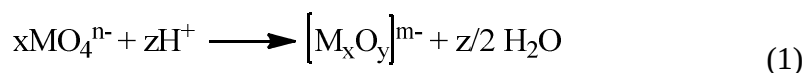
Klasifikacija polioksometalata temelji se na vrsti  $\{MO_x\}$  građevnih jedinica, pri čemu je M najčešće Mo, W ili V, a x ima vrijednost između 4 i 7.

Polioksometalati nastaju u kiselim uvjetima i tijekom nastajanja dolazi do promjene koordinacije metalnog iona iz tetraedarske u oktaedarsku. Na slici 1 prikazano je povećanje koordinacijskog broja metalnog iona i nastajanja složenijih vrsta povezivanjem preko jednog ili više atoma kisika.



Slika 1. Shematski prikaz nastajanja polioksometalatih: povezivanje  $\{MO_x\}$  jedinica preko a) vrha oktaedra (eng. *corner sharing*), b) brida (eng. *edge sharing*) i c) plohe (eng. *face sharing*). Atomi kisika prikazani su crveno, dok se atomi metala nalaze u središtu koordinacijske sfere.<sup>11</sup>

Nastajanje polioksometalatne vrste može se prikazati jednažbom:



Jedan od osnovnih preduvjeta u nastajanju polioksos vrsta je mogućnost stvaranja dp- $\pi$  veze atoma metala s atomom kisika. W. N. Lipscomb je uočio da pri povezivanju oktaedara ne smiju biti prisutna tri ili više terminalna kisikova atoma u polioksometalatu što se naziva Lipscombovim pravilom.<sup>12</sup>

Većina polioksometalata su anionske vrste, koje mogu biti dodatno kompleksirane kationima, koje terminološki nazivamo heteroatomima. Heteroatomi ne podliježu istim pravilima kao polioksometalatni metalni ioni, te mogu biti elementi koordinacijskog broja 4, 6, 8 ili 12. Razlikujemo primarne i sekundarne heteroatome. Primarni heteroatomi su nužni dio strukture polioksometalata i često su smješteni u središte polioksometalatne jezgre, dok su sekundarni heteroatomi smješteni u šupljine unutar struktura nastalih djelomičnim raspadom osnovnog aniona. Upravo uvođenje sekundarnih heteroatoma u takve anionske strukture jest i metoda povezivanja polioksometalata u veće nakupine.

Polioksometalati se dijele u tri osnovne skupine, heteropolianione, izopolianione i molibden-plavi i -smeđi (eng. *molybdenum blue and brown*).

Heteropolianioni su polioksometalatne vrste koje uključuju i heteroanione, primjerice  $\text{SO}_4^{2-}$  i  $\text{PO}_4^{3-}$ . Heteropolianioni su najviše istraživani i opisana su njihova svojstva i primjena. Najpoznatiji predstavnici te skupine su Kegginov  $[\text{XM}_{12}\text{O}_{40}]^{n-}$  i Well-Dawsonov  $[\text{X}_2\text{M}_{18}\text{O}_{62}]^{n-}$  anion, pri čemu je X tetraedarski koordinirana anionska vrsta, a M predstavlja molibden ili volfram. Strukture takvih aniona pogodne su za povezivanje u veće polioksos vrste preko heteroatoma tetraedarski koordiniranih anionskih vrsta.

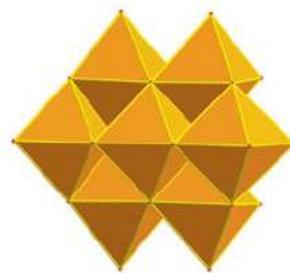
Izopolianionski polioksometalati<sup>13,14</sup> ne sadrže primarne heteroanione / atome. Upravo zbog izostanka dodatne stabilizacije heteroatomima, površina takvih aniona je izrazito bazična, te su pogodne građevne jedinice. Kao najpoznatiji predstavnici te skupine su  $[\text{M}_6\text{O}_{19}]^{n-}$  (Lindquist anion),  $[\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{6-}$  i  $[\text{Mo}_8\text{O}_{26}]^{4-}$ . Na slici 2 dan je pregled najistraživanijih izo- i heteropolimetalatnih vrsta.



Anderson  
 $[H_x(M'O_6)M_6O_{18}]^{n-}$



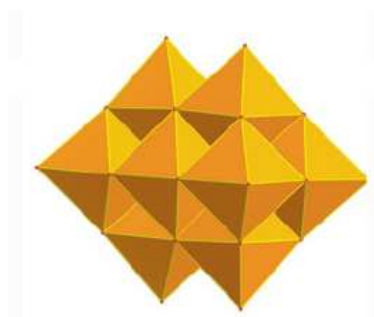
Lindquistov  $[M_6O_{19}]^{n-}$



$[Mo_7O_{24}]^{6-}$



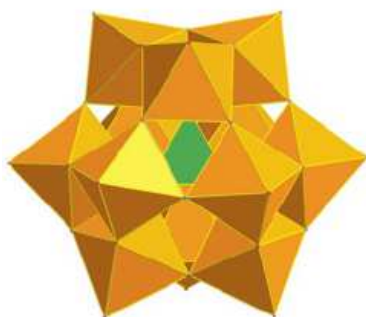
$[W_{10}O_{32}]^{4-}$



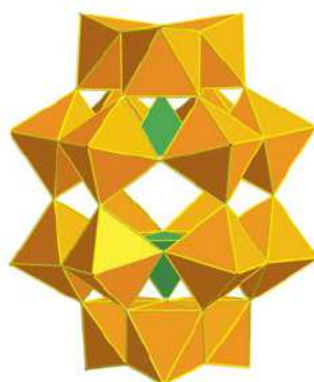
$[V_{10}O_{28}]^{6-}$



$\beta-[Mo_8O_{26}]^{4-}$



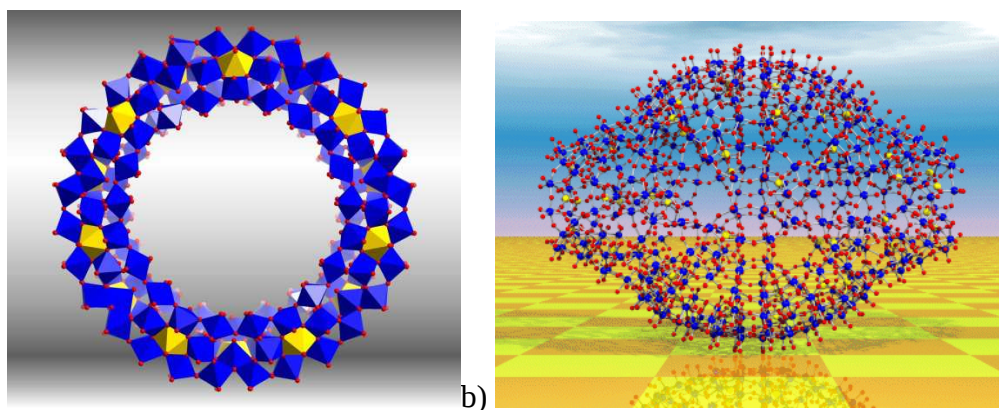
Kegginov  $[XM_{12}O_{40}]^{n-}$



Well-Dawsonov  
 $[XM_{18}O_{62}]^{n-}$

Slika 2. Polioksometalatni anioni prikazani modelom poliedara. Atom metala nalazi se u idealiziranom središtu poliedra prikazanog narančastom bojom, dok se atomi kisika nalaze u vrhovima poliedara. Heteroatomi prikazani su svijetlozelenim poliedrima.<sup>11</sup>

Molibden– plavo i molibden– smeđe vrste su poznate već nekoliko stoljeća i vezane su uz kemiju molibden–plavog koju je prvi opisao Sheele 1778. g. Tek 1998. g. Achim Müller<sup>15,16</sup> i suradnici uspjeli su odrediti sastav klastera  $\{\text{Mo}_{154}\}$  koji je prikazan na slici 3a. Pretpostavljena je pojednostavljena formula  $[(\text{MoO}_3)_{154}(\text{H}_2\text{O})_{70}\text{H}_x]^{y-}$  pri čemu je ujedno postavljena i teza o variranju udjela reduciranih molibdenskih jezgara i posljedično udjela protona.



Slika 3. a) Poliedarski prikaz  $\{\text{Mo}_{154}\}$ <sup>17</sup> klastera i b) Poliedarski prikaz  $\{\text{Mo}_{368}\}$  klastera.<sup>18,19</sup>

Polioksometalati nalaze primjenu u mnogim granama kemije pa su tako primjenjivi u gotovo svim aspektima nanotehnologije i kemije materijala,<sup>20,21</sup> u organskoj sintezi kao katalizatori,<sup>22,23</sup> farmaceutici kao antitumorski i antiviralni agensi, biokemiji, tj. proteinskom inženjerstvu, zelenoj kemiji za obradu otpadnih voda, analitičkoj kemiji i sl. Njihova primjena temelji se na potencijalu stvaranja raznolikih veznih jedinica, intermedijara velike slobodne entalpije, odgovornih za polimerizaciju kao i mogućnosti za relativno jednostavnom promjenom strukture ugradnjom hetero fragmenata. Također, postoji mogućnost namjernog generiranja „grešaka“ u strukturi uklanjanjem građevnih jedinica, zatim mogućnost kontrole naboja građevnih jedinica (protoniranjem, reakcijama prijenosa elektrona ili supstitucijom) kao i mogućnost generiranja fragmenata s energetski niskim nepopunjenim molekulskim orbitalama.

Polioksometalatne vrste su u pravilu stabilne i ne podliježu promjenama uslijed promjene temperature ili atmosferskih uvjeta (kisik, vlaga). U strukturama posjeduju šupljine velikog promjera (6–25 Å) što omogućuje smještanje atoma i molekula u strukturu polioksometalatne

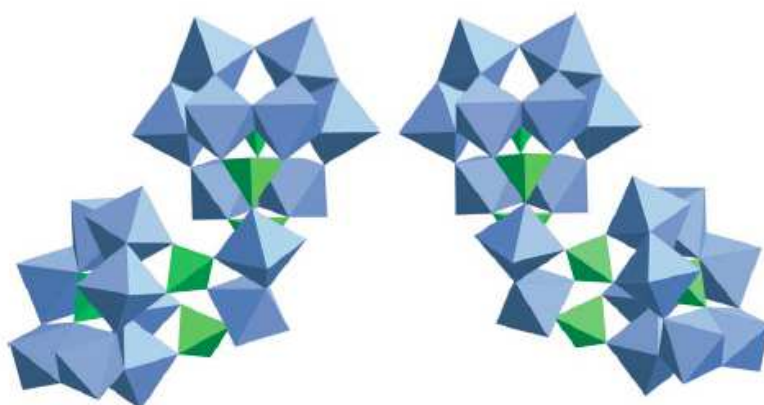
vrste.<sup>24</sup> Kao što je već rečeno metalni ioni polioksometalata nalaze se u svojim najvišim oksidacijskim stanjima, pa ih je moguće reducirati, pri čemu najčešće nastaju miješani polioksometalati s metalima u dva oksidacijska stanja. Osim kemijskim putem, polioksometalate je moguće reducirati i fotokemijski. Boja reduciranih polioksometalata razlikuje se od nereduciranih i najčešće se radi o tamnozeleno odnosno tamnoplavo obojenim vrstama.

Naizmjeničnom promjenom duljina veza ili slaganja okso jedinica u molekulskoj strukturi dolazi do pojave zrcalne simetrije. Jedan od načina na koji možemo postići svojstvo zrcaljenja polioksometalata je funkcionalizacija osnovnog polioksometalatnog aniona kiralnim molekulama.<sup>25</sup>

M. T. Pope i suradnici<sup>25</sup> upozorili su na nesimetričnost nekih polioksomolibdata uzrokovanu izmjeničnim promjenama duljine Mo–O veza. Primjerice, Dawson anion,  $[\alpha\text{-P}_2\text{Mo}_{18}\text{O}_{62}]^{6-}$ , ne posjeduje  $D_{3h}$  simetriju, kako se to obično prikazuje, već dolazi do alternacije duljina Mo–O veza u diskretnim vrijednostima 1,80 Å i 2,05 Å što posljedično poništava simetriju zrcalne ravnine.

T. Ama<sup>26</sup> i suradnici prvi su izolirali kiralno čisti polioksometalat  $[\text{H}_4\text{Co}_2\text{Mo}_{10}\text{O}_{38}]^{6-}$  kiralnom rezolucijom preko diasteromerne soli s kompleksom  $[\text{Co}(\text{en})_3]^3$ .

J. Fuchs i suradnici<sup>26</sup> (1988. g.) prvi su priredili i opisali heteropolivolframmat kiralne primarne strukture,  $[\text{P}_6\text{W}_{18}\text{O}_{79}]^{20-}$ , priređen iz vodene otopine fosfata i volframata u molarnom omjeru 1:3 (slika 4). Oktadekavolframmatni anion sastoji se od dvije  $\{\beta_3\text{-A-PW}_8\text{O}_{33}\}$  podjedinice povezane dvjema fosfatnim grupama i divolframmatnim jedinicama.



Slika 4. Enantiomeri  $[P_6W_{18}O_{79}]^{20-}$  prisutni u otopini. Dvije  $\{\beta_3\text{-A-PW}_8\text{O}_{33}\}$  podjedinice sadrže dvije fosfatne grupe i povezane su divolframatnim jedinicama.<sup>26</sup>

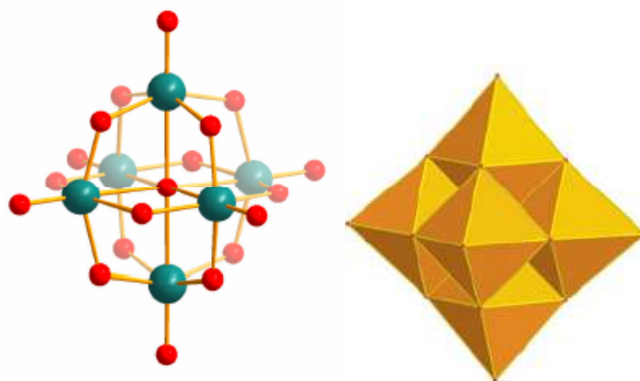
Funkcionalizacija polioksometalata direktna je metoda uvođenja kiralnosti u molekulu, pri čemu je najzanimljivija upravo funkcionalizacija organskim ligandom koji sadrži kiralni stereocentar.

## 2.2. Polioksomolibdati

Protoniranjem tetraedarskog  $[\text{MoO}_4]^{2-}$  aniona dolazi do povećanja koordinacijskog broja molibdena, a ovisno o stupnju protoniranosti strukturna formula osnovne molibdenske građevne jedinice može biti  $[\text{MoO}_2(\text{H}_2\text{O})(\text{OH})_3]^-$  ili  $[\text{MoO}_2(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_2]$ .<sup>27</sup> U literaturi je opisan velik broj di- i oligonuklearnih okso vrsta molibdena koje su opisane kao polimeri malih jedinica.<sup>28</sup>

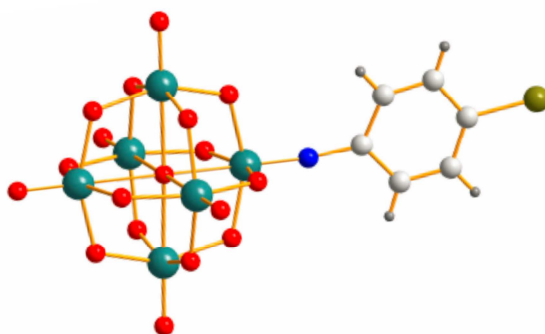
Lindquistov anion,  $[\text{Mo}_6\text{O}_{19}]^{2-}$  sastoji se od šest  $\{\text{MoO}_6\}$  oktaedara povezanih bridom. Ispitivanja su pokazala da terminalni atomi kisika pokazuju slabu bazičnost.<sup>29</sup> Na slici 5 prikazana je struktura Lindquistovog aniona, s centralnim atomom kisika ( $\text{O}_c$ ) heksakoordiniranim molibdenskim atomima. Duljina veze  $\text{Mo}=\text{O}_t$  u prosjeku iznosi 1,7 Å, dok je duljina  $\text{Mo}-\text{O}_b$  veze oko 1,9 Å. U IR spektru pojavljuju se vrpce koje pripadaju istezanju veze  $\text{Mo}=\text{O}_t$  pri  $953\text{ cm}^{-1}$  a koja uvijek dolazi s oštrim ramenom pri  $976\text{ cm}^{-1}$ , te vrpce pri  $796\text{ cm}^{-1}$  koja je posljedica istezanja veze  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$ .

Primjer direktne metode sinteze polioksometalata s Lindquistovim anionom dan je u radu M. Cindrić i suradnika gdje je zagrijavanjem vodene otopine molibden(VI) oksida i vanadij(V) oksida uz dodatak tetrabutilamonijevog jodida i glicina izoliran spoj formule  $(\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_6\text{O}_{19}] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .



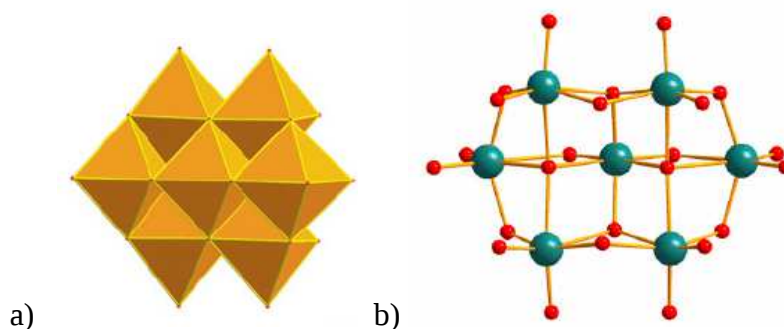
Slika 5. Strukturni prikaz Lindquistovog aniona.

Organoimido funkcionalizirani  $(\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_6\text{O}_{18}\text{N}(\text{Naph-1})]$  priređeni su indirektno iz oktamolibdata  $(\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_8\text{O}_{26}]$  uz dodatak 1-naftilamina i *N,N*-dicikloheksilkarbodiimida.<sup>30,31</sup> Reakcija je provedena pri 110 °C u suhom acetonitrilu solvotermalno. Na sličan način priređen je i bromoanilinski derivat, čija je struktura prikazana na slici 6.<sup>32</sup> Kod oba navedena polioksometalata jedan terminalni kisikov atom zamijenjen je dušikovim atomom liganda.



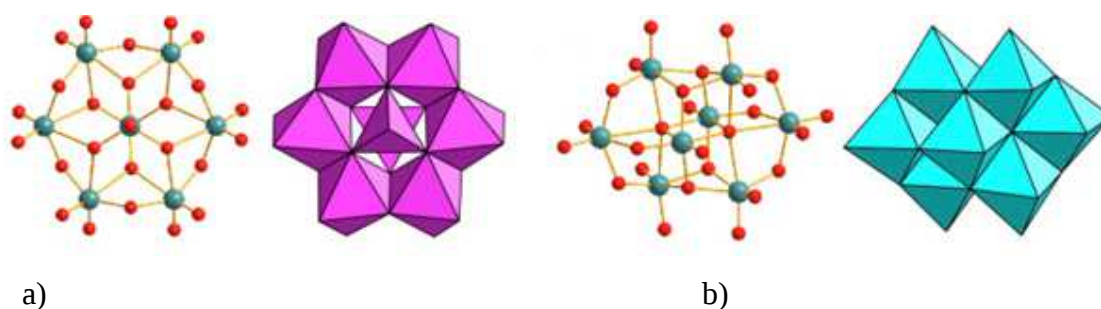
Slika 6. Prikaz strukturne formule Lindquistovog  $[\text{Mo}_6\text{O}_{18}(\text{p-BrC}_6\text{H}_4)]^{2-}$  aniona funkcionaliziranog bromoanilinom. Ionimolibdena označeni su zelenom, atomi kisika crvenom, atomi ugljika bijelom, a atom broma maslinastozelenom bojom.<sup>32</sup>

Heptamolibdatna poliokso vrsta prisutna je u pH području od 3 do 5,5. Struktura heptamolibdatnog aniona sastoji se od sedam  $\{\text{MoO}_6\}$  oktaedara povezanih bridom, a prikazana je na slici 7. Oktaedarske jedinice u heptamolibdatu su iskrivljene na način da je centralni atom molibdena pomaknut prema periferiji aniona.<sup>33,34</sup> Ovaj anion jedna je od građevnih jedinica velikih polioksometalatnih vrsta, primjerice  $[\text{Mo}_{36}\text{O}_{112}(\text{H}_2\text{O})_{18}]^{8-}$ , u kojem su dvije oktaedamolibdatne jedinice povezane preko centra inverzije, a svaka od njih je sastavljena od  $\{\text{Mo}_7\text{O}_{24}\}$  jedinica okruženih s  $\{\text{MoO}_6\}$  oktaedrima povezanim preko bridova i vrhova.<sup>35,36</sup>



Slika 7. Struktura formula heptamolibdata a) atomi molibdena nalaze u geometrijskom središtu narančastog oktaedra, dok su atomi kisika prikazani crvenom bojom, b) atomi molibdena prikazani su zelenom, a atomi kisika crvenom bojom.

Poznato je osam izomernih struktura oktamolibdatnog  $[\text{Mo}_8\text{O}_{26}]^{4-}$  aniona, koji se razlikuju u načinu slaganja oktaedara, a najčešći su  $\alpha$ - ,  $\beta$ - izomer (slika 8).<sup>37-39</sup>



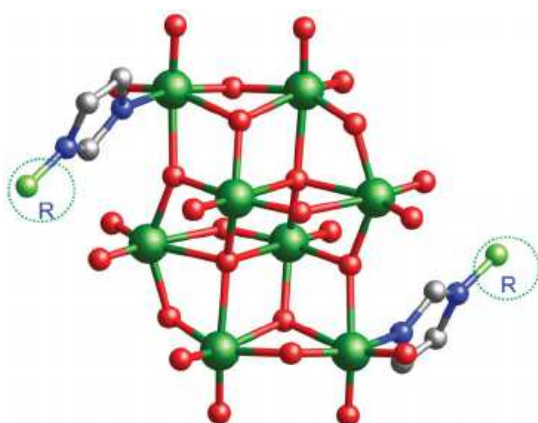
Slika 8. Prikaz strukturnih formula  $\alpha$ - i  $\beta$ - oktamolibdata a) slagalina oktaedara  $\alpha$ - izomera prikazana ljubičastom,  $\beta$ -izomera plavom bojom, b) atomi molibdena prikazani su zelenom, a atomi kisika crvenom bojom.<sup>40</sup>

$\alpha$ - izomer oktamolibdata dominantna je vrsta pri pH oko 2,7 dok  $\beta$ - izomer dominantno prevladava u pH području oko 2<sup>41-44</sup> Obje vrste prisutne su u pH području 3–4.

Strukturu  $\beta$ -izomera možemo opisti kao narušenu strukturu dekanadata kojoj nedostaju dva dijametralno suprotna oktaedra (slika 8).<sup>45,46</sup> Direktne metode sinteze slobodnih aniona uključuju sintezu iz molibdata pri različitim pH vrijednostima (zakiseljavanjem reakcijske smjese klorovodičnom kiselinom) u vodi, ili iz molibdenovog(VI) oksida pri povišenoj temperaturi.<sup>47</sup> U infracrvenom spektru prisutne su vrpce značajne za *cis*-  $[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgru, u

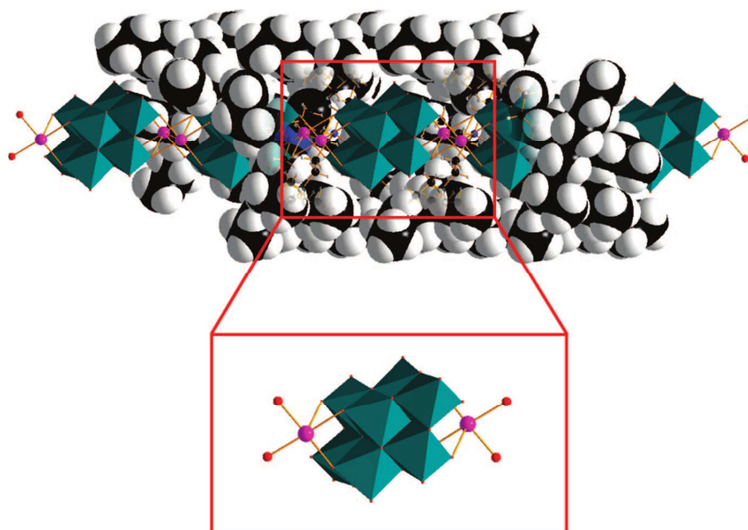
spektralnom području oko  $950$  i  $900\text{ cm}^{-1}$ , koje se pripisuju asimetričnom i simetričnom istezanju veze  $\text{Mo}=\text{O}_t$ , s ramenom kao i kod Linquistovog aniona, te  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  savijanju kuta oko  $800\text{ cm}^{-1}$ .

Hidrotermalnom sintezom, B. Chen i suradnici<sup>47</sup> uspješno su pripravili seriju funkcionaliziranih  $\beta$ -oktamolibdata s derivatima imidazola u kojima su dva atoma kisika zamjenjena dušikovim atomom imidazolnog prstena (slika 9).



Slika 9. Prikaz molekulske strukture  $[\text{Mo}_8\text{O}_{22}(\text{imidazol-R})_2]$ , pri čemu je molibden prikazan zeleno, kisik crvenom, dušik plavom a ugljik sivom bojom. *R*- označava alkilne supstituente.<sup>48</sup>

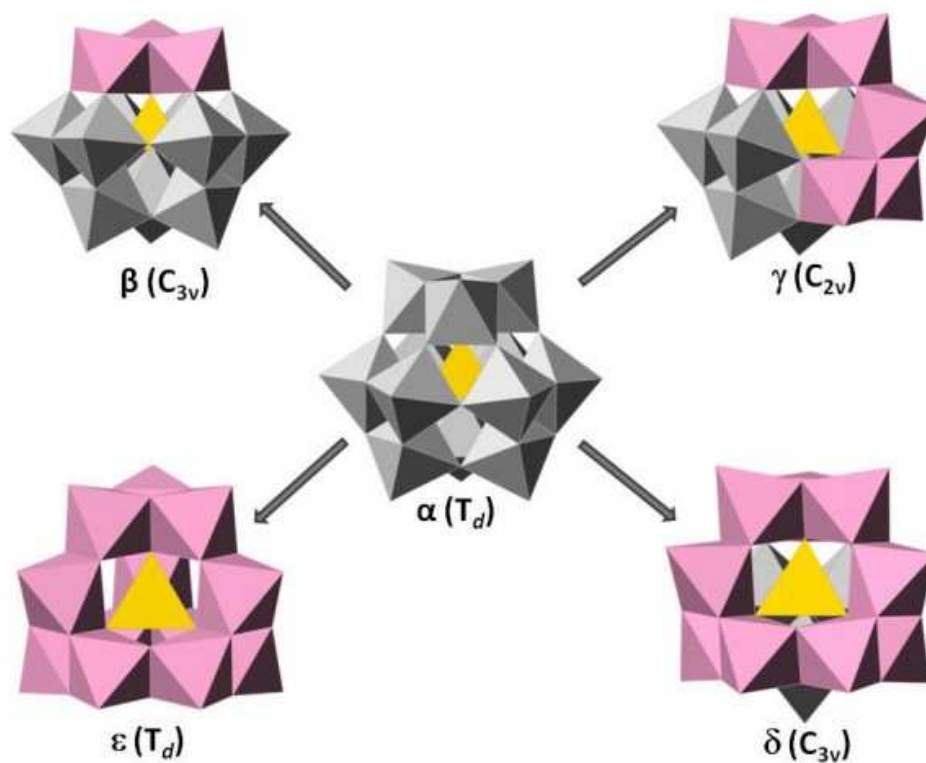
E. Wilson i suradnici<sup>49</sup> pripravili su seriju funkcionaliziranih oktamolibdata iz tetrabutilamonijeva heksamolibdata i srebrovog fluorida u acetonitrilu na sobnoj temperaturi. Dobiveni su oktamolibdati,  $(\text{Bu}_4\text{N})_{2n}[\text{Ag}_2\text{Mo}_8\text{O}_{24}]_n$  u kojem su oktamolibdatne jedinice premoštene poliedrima u čijim središtima su srebrovi ioni okruženi s pet kisikovih atoma (slika 10).



Slika 10. Strukturni prikaz  $\beta$ -oktamolibdata vezanih preko iona srebra (prikazani kuglicama i štapićima te zelenim poliedrima) okruženim tetrautilamonijevim kationima (crno-bijeli prikaz popunjenog prostora).<sup>48</sup>

Od svih polioksometalatnih vrsta najviše istraživani i najbolje opisani u literaturi su polioksometalati opće molekulske formule  $[XMo_{12}O_{40}]^{n-}$ , a koji sadrže Kegginov tip aniona.<sup>50</sup> Središnji tetraedar  $\{XO_4\}$  okružen je sa dvanaest  $\{MoO_6\}$  oktaedarskih jedinica, koje su grupirane u četiri  $\{Mo_3O_{13}\}$  podjedinice, a u kojima su oktaedarske okso jedinice povezane bridom. Četiri vrhom povezane  $\{Mo_3O_{13}\}$  okso vrste tvore dodekamolibdatnu jezgru. Premošćujuće kisikove atome unutar  $\{Mo_3O_{13}\}$  podjedinica označavamo kao  $O_c$ . U infracrvenom spektru  $Mo-O_c-Mo$  vibracije javljaju se u spektralnom području od  $850-890\text{ cm}^{-1}$ , dok su vibracije veza  $Mo-O_b-Mo$ , pri čemu  $O_b$  označava atome kisika koji vršno povezuju  $\{Mo_3O_{13}\}$  podjedinice, prisutne u spektralnom području  $800-760\text{ cm}^{-1}$ .<sup>51</sup>

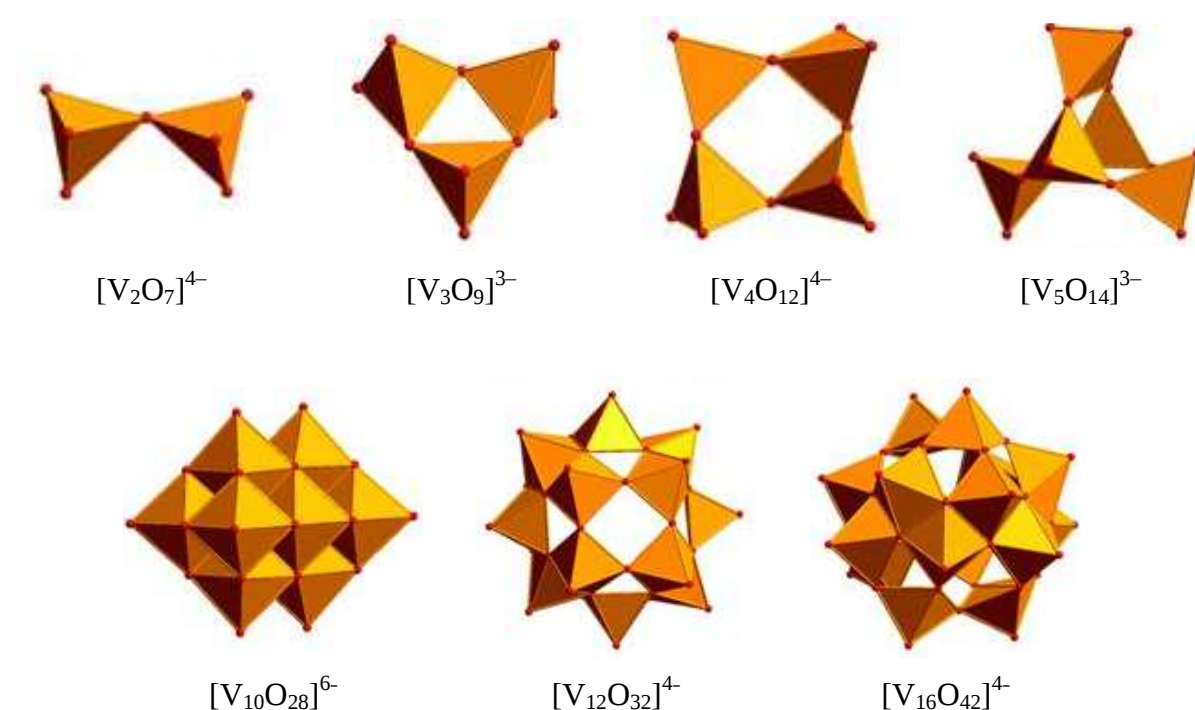
Kao i kod heptamolibdata, kod dodekamolibdata je prisutna deformacija oktaedarskih jedinica zbog pomicanja atoma molibdena iz središta prema periferiji aniona. U literaturi je opisano pet izomera Kegginovog aniona ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i  $\epsilon$ ), od kojih je najstabilniji  $\alpha$ - izomer.<sup>52</sup> Izomeri  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  i  $\epsilon$  izvedeni su rotacijom različitog broja  $\{Mo_3O_{13}\}$  jedinica za  $60^\circ$  (slika 11). U literaturi su opisane reakcije izomerizacije  $\beta$ -izomera u stabilniji  $\alpha$ -izomer na sobnoj i povišenoj temperaturi. Vrijeme potrebno za izomerizaciju iznosi od nekoliko sekundi do nekoliko sati, a ovisno je o vrsti heteroatoma.



Slika 11. Poliedarski prikaz izomera Kegginovog tipa polioksomolibdata, pri čemu je vidljivo da su ostali izomeri izvedeni iz  $\alpha$ -izomera.  $\{\text{Mo}_3\text{O}_{13}\}$  podjedinice zadržane iz izvornog  $\alpha$ -izomera prikazani su sivom bojom, a  $\{\text{Mo}_3\text{O}_{13}\}$  podjedinice rotirane za  $60^\circ$  prikazane su ljubičasto.

### 2.3. Polioksovanadati

Polioksovanadati iako su povijesno kasnije istraživane poliokso vrste, u usporedbi s polioksomolibdatima i polioksovolframatima, oni danas imaju široku primjenu.<sup>52</sup> Poliedri od kojih su sastavljeni su kvadratno piramidalne  $[\text{V}^{\text{V}}\text{O}_5]^{5-}$ , oktaedarske  $[\text{V}^{\text{V}}\text{O}_6]^{7-}$  i tetraedarske  $[\text{V}^{\text{V}}\text{O}_4]^{3-}$  geometrije, za razliku od poliokso vrsta molibdena i volframa kod kojih prevladava oktaedarska geometrija. Polioksovanadati mogu se podijeliti u osnovne četiri skupine: potpuno oksidirane vrste sastavljene od  $\text{V}^{\text{V}}$  okso aniona (slika 12); vrste miješanih oksidacijskih stanja sastavljene od  $\text{V}^{\text{V}}$  i  $\text{V}^{\text{IV}}$  ili  $\text{V}^{\text{IV}}$  i  $\text{V}^{\text{III}}$  okso aniona; potpuno reducirane vrste koje sadrže samo  $\text{V}^{\text{IV}}$  ili  $\text{V}^{\text{III}}$  okso anione.

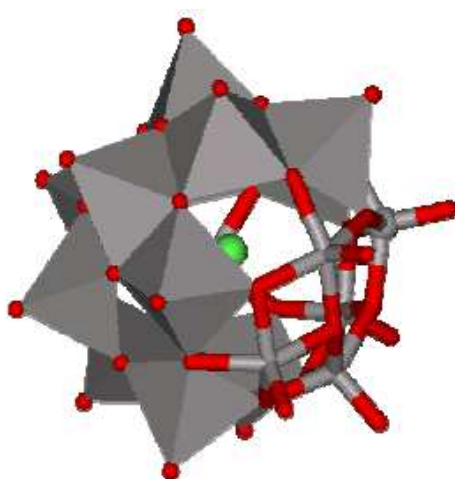


Slika 12. Poliedarski prikaz potpuno oksidiranih vrsta polioksovanadata, pri čemu su atomi kisika prikazani crveno, a  $\text{V}^{\text{V}}$  atom se nalazi u središtu poliedra.

Dekavanadatni anion  $[V_{10}O_{28}]^{6-}$  moguće je prirediti zakiseljavanjem vodene otopine metavanadata ispod pH 6. Daljnim zakiseljavanjem nastaju protonirane vrste dekanadata opće formule  $[H_nV_{10}O_{28}]^{(6-n)-}$  pri čemu je  $n = 2-4$ , ovisno o pH otopine. Struktura dekanadata može se opisati kao slagalina šest  $\{VO_6\}$  oktaedara povezanih bridom s dodatna dva dva para  $\{VO_6\}$  oktaedara koji se nalaze iznad i ispod ravnine slagaline šest  $\{VO_6\}$  oktaedara (slika 12).  $V=O_t$  duljina veze iznosi oko 1,6 Å, dok  $V-O_b$  duljina veze iznosi 2,32 Å.

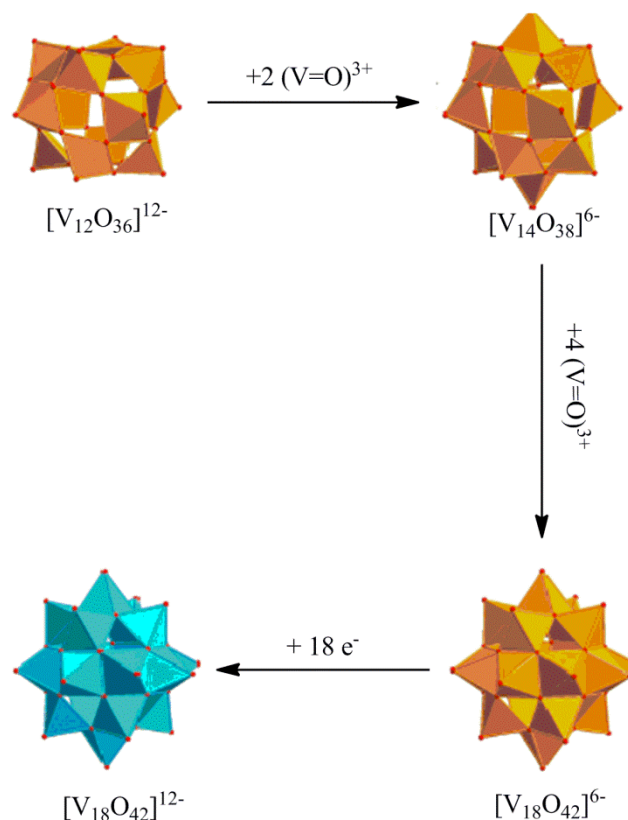
Polioksovanadati miješanih oksidacijskih stanja strukturno odgovaraju potpuno oksidiranim polioksido vrstama, pri čemu oksovrste reduciranih stanja niže koordinacijske geometrije najčešće leže na elementima simetrije.

Od potpuno reduciranih vrsta najviše je opisan i istraživani  $[V_{18}O_{42}]^{12-}$  anion, koji je građen od  $\{O=VO_4\}$  jedinica kvadratno piramidalne geometrije, sa šupljinom u strukturi od 11 Å, koja je dovoljno velika da se smjeste male molekule. Opisane su strukture koje endohedralno sadrže halogenidne ione, molekulu vode, formijatni, acetatni, karbonatni, sulfatni, perkoloratni i slične anione.<sup>53,54</sup> Struktura oktaidekanadata koja sadrži endohedarski klorid prikazana je na slici 13, a molekule  $T_d$  i  $D_{4d}$  simetrije mogu biti smještene u šupljinu prisutnu u oktaidekanadatnoj strukturi.



Slika 13. Prikaz molekulske strukture  $[V_{18}O_{42}Cl]^{12-}$  koji sadrži endohedralni kloridni ion štapićima i poliedrima. Ioni vanadija(IV) prikazani su sivom, kisik crvenom, a klorid prikazan zelenom bojom kugličnim prikazom.<sup>53</sup>

Osnovni mehanizmi nastajanja polioksometalata primjenjivi su i za polioksovanadatne vrste. U literaturi je opisan Lindquistov polioksoanion  $[V_6O_{19}]^{n-}$  kao i Kegginov tip aniona  $[XV_{12}O_{40}]^{n-}$ , oba aniona prisutna kod polioksovanadatnih vrsta miješanih oksidacijskih stanja. Prvi primjer potpuno oksidirane polioksovanadatne vrste  $\alpha$ -Kegginovog tipa opisan je tek 1980. godine kao  $[PV_{14}O_{42}]^{9-}$  pri čemu su na  $\alpha$ -Kegginov  $[PV_{12}O_{40}]^{15-}$  anion dodane dvije  $\{VO\}^{2+}$  jedinice. Kod polioksovanadatnih vrsta miješanih ili reduciranih oksidacijskih stanja ustanovljena je *super* Kegginova struktura  $\{V_{18}O_{42}\}$ . K.Y. Monakhov i suradnici<sup>55</sup> predložili su mehanizam strukturne reorganizacije tetragonsko-piramidalnih jedinica potpuno oksidiranog  $[V_{12}O_{36}]^{12-}$  aniona u potpuno reducirani  $[V^{IV}_{18}O_{42}]^{12-}$  anion. Dodatak dvije  $[V=O]^{3+}$  jedinice s obje strane  $[V_{12}O_{36}]^{12-}$  aniona rezultira nastajanjem  $[V_{14}O_{38}]^{12-}$  vrste. Daljnjim dodatkom četiri  $(V=O)^{3+}$  jedinice dolazi do nastajanja do sada neopisane  $[V_{18}O_{42}]^{6+}$  vrste koja se može reducirati do  $[V^{IV}_{18}O_{42}]^{12-}$  polioksosvrste (slika 14).



Slika 14. Shematski prikaz strukturne reorganizacije tetragonsko-piramidalnih jedinica potpuno oksidiranog  $[V_{12}O_{36}]^{12-}$  aniona u potpuno reducirani  $[V^{IV}_{18}O_{42}]^{12-}$  anion.

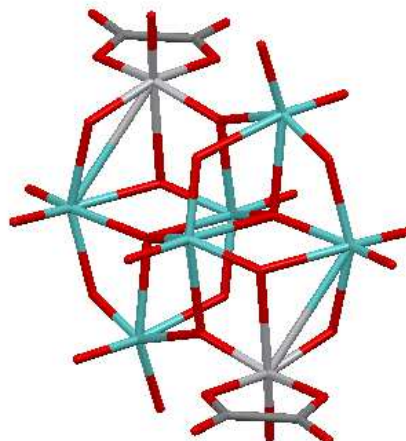
## 2.4. Poliosk molibdovanadati

Poznat je, i u literaturi opisan, značajan broj poliosk molibdovanadatnih vrsta. Kako su atomi vanadija(V) i molibdena(VI) usporedivog radijusa (0,68 i 0,73 Å), moguća je zamjena određenog broja atoma jednog elementa u strukturi atomom drugog elementa.<sup>56,57</sup>

Metode pripreme ne razlikuju se od metoda pripreme osnovnih poliosksoaniona i provode se najčešće u vodenom mediju. Molibdovanadati u pravilu sadrže veći udio iona molibdena u odnosu na ione vanadija.  $[\text{Mo}_8(\text{V}^{\text{IV}})\text{V}_4\text{O}_{40}]^{8-}$  anion pripremljen je reakcijom molibdenovog(VI) oksida i amonijevog metavanadata u vodenoj otopini kalijevog hidroksida.<sup>58</sup> Dodatak morfolina u opisanu reakcijsku smjesu rezultira nastajanjem poliosk molibdovanadata (Hmorph)<sub>6</sub>[(V<sup>IV</sup>,V<sup>V</sup>,Mo<sub>10</sub>)VO<sub>40</sub>] $\cdot$ 3H<sub>2</sub>O.<sup>59</sup>

Prvi primjer poliosk molibdovanadata u kojem je molni udio atoma vanadija veći od udjela atoma molibdena je  $[\text{Mo}_4\text{V}_5\text{O}_{27}]^{5-}$  pripremljen je reakcijom molibdenovog(VI) oksida i metavanadata uz dodatak tetrametilamonijevog klorida. Tetramolibdopentavanadatni  $[\text{Mo}_4\text{V}_5\text{O}_{27}]^{5-}$  anion jedan je od primjera miješanih molibdovanadatnih aniona, koji je smjesa dvaju osnovnih strukturnih tipova polioskometalatnih vrsta, dekavanadatnog aniona u području bogatom vanadijem i oktamolibdata u području bogatom molibdenom.<sup>60</sup>

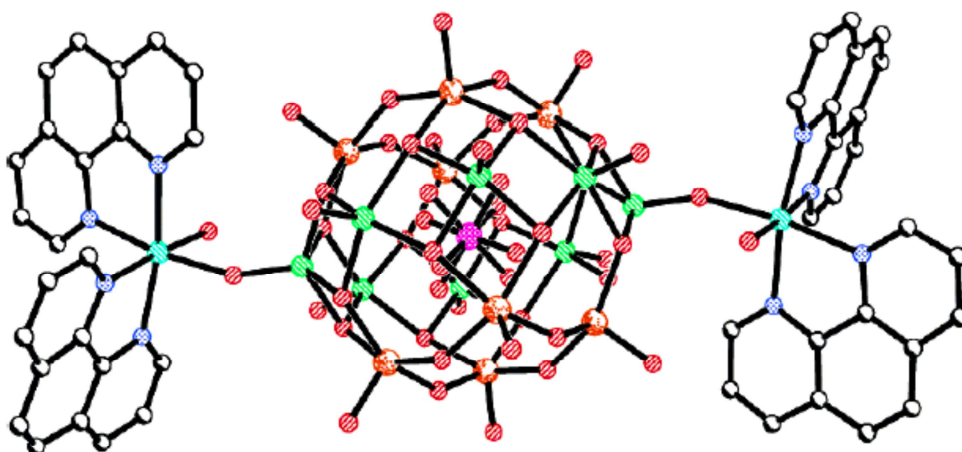
Metodom hidrotermalne sinteze pri 140 °C iz vodene otopine molibdenovog(VI) oksida i vanadijevog(V) oksida uz dodatak etilendiamina pripremljen je  $[\{\text{Mo}_8\text{V}_4\text{O}_5(\text{VO}_4)(\text{VO})_2\}_n]^{7-}$ . Jedan je od prvih pripremljen funkcionaliziranih miješanih polioskometalata bio je  $[\text{Mo}_6\text{V}_2\text{O}_{24}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^{6-}$  anion čija je strukturna formula prikazana na slici 15.



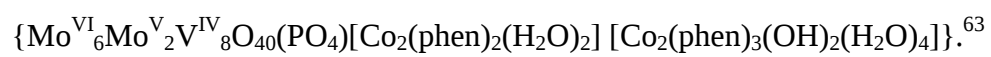
Slika 15. Prikaz molekulske strukture  $[\text{Mo}_6\text{V}_2\text{O}_{24}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^{6-}$ .<sup>60</sup> Ioni molibdena prikazani su svijetloplavom, vanadija sivom, a atomi kisika crvenom bojom.

Postoji i značajan broj primjera molibdovanadata u kojima je zadržana struktura dekavanata, primjerice  $[(\text{CH}_3\text{N})_4[\text{H}_2\text{MoV}_9\text{O}_{28}]]$ .<sup>61</sup>

Primjer polioksomolibdatne vrste miješanih oksidacijskih stanja uz funkcionalizaciju kompleksom *bis*fenantrolinkobalta(II) pripremljen je metodom direktne sinteze (hidrotermalno 170 °C, 6 dana) iz amonijevog metavanadata, dodekafosfomolibdenske kiseline, kompleksa kobalta(II) uz dodatak 1,10-fenantrolina.<sup>62</sup> Izoliran je  $[\text{Mo}^{\text{VI}}_6\text{Mo}^{\text{V}}_2\text{V}^{\text{IV}}_8\text{O}_{40}(\text{PO}_4)\{\text{Co}_2(\text{phen})_2(\text{H}_2\text{O})_2\}\{\text{Co}_2(\text{phen})_3(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4\}]$  čija je molekulska struktura prikazana na slici 16. Polioksoanion je izveden iz osnovne  $\alpha$ -Kegginove strukture s četiri dodane kvadratno piramidalne  $[\text{VO}]^{2+}$  jedinice. Anion je funkcionaliziran *bis*fenantrolinskim kompleksom kobalta(II) koji je s polioksometalatnom vrstom povezan Co–O–V mostom.



Slika 16. Prikaz molekulske strukture



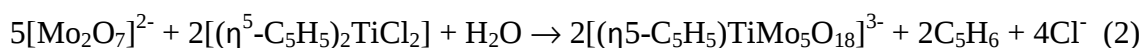
## 2.5. Metode priprave polioksometalata

Pri pripravi polioksometalata elemenata 6. skupine (Mo i V) polazi se od pretpostavke da polioksometalatne vrste molibdena i volframa nastaju u kiselj sredini, dok polioksovanadati nastaju pri nešto višim pH vrijednostima. Najčešće korišteno otapalo u sintezi takvih aniona jest voda, ali sve više se koriste i organska otapala, primarno zbog pokušaja funkcionalizacije samih polioksometalatnih vrsta. Parametri koji utječu na vrstu koja će nastati su koncentracija i vrsta poliokso aniona, pH otopine, ionska jakost reakcijske otopine, heteroatom (vrsta i koncentracija, ako je primjenjivo), prisutnost dodatnih liganada, prisustvo i vrsta reducensa, temperatura i sam postupak priprave (klasične metode, hidrotermalna sinteza, mikrovalna sinteza, sinteza u čvrstom stanju).<sup>64</sup> Iako kation koji se dodaje za pospješjenje kristalizacije (neutralizacija ukupnog naboja), ne bi trebao utjecati na nastajanje vrste,<sup>65</sup> ustanovljeno je da je selektivna kristalizacija  $\{M_xO_y\}$  jedinica diktirana veličinom, nabojem, simetrijom i topljivošću kationa. Poznati su primjeri u kojima je uloga kationa bila ključna i u nastajanju polioksometalatne vrste, pa se stoga sve više pažnje poklanja i odabiru kationskih vrsta.<sup>66</sup>

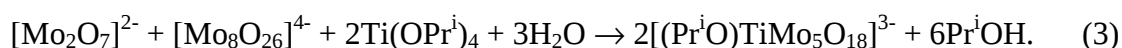
Najzastupljenija metoda priprave polioksometalatnih vrsta je iz vodenih otopina, primarno zbog lake dostupnosti oksovrsta metala te visokog vrelišta i velike dielektrične konstante vode. J. Fuchs<sup>66</sup> sa suradnicima šezdesetih godina prošlog stoljeća, uvodi organska otapala u pripravu polioksometalatnih vrsta.

Metode priprave polioksometalata mogu se podijeliti u dvije skupine: jednu čine metode koje se zasnivaju na kondenzaciji malih, mono- i dinuklearnih okso vrsta, dok u drugu skupinu ulaze metode koje uključuju razgradnju velikih polioksometalatnih jedinica i njihovu ponovnu kondenzaciju.

Reakcijom oksoaniona i elektrofila, pri čemu kao elektrofil može služiti i proton, iako je najčešće riječ o kompleksnim spojevima prijelaznih metala, dolazi do nastajanja funkcionalizirane polioksometalatne vrste. Klemperer i suradnici pripravili su seriju polioksometalata funkcionaliziranih ciklopentadienskim kompleksom titanijskog tipa, a kao primjer može poslužiti funkcionalizirani heksamolibdatni anion Lindquistovog tipa,<sup>67</sup> čije se nastajanje može prikazati jednadžbom reakcije:



Metode kondenzacije podrazumijevaju povezivanje hidroksokso-aniona, ukoliko se kao polazni spoj koristi mononuklearna vrsta, odnosno oksoalkokso aniona. Priprava polioksometalatnih vrsta podrazumijeva dodatak organske baze tipa  $\text{R}_4\text{NOH}$ . Prednost ove metode je u mogućnosti kontrole stupnja hidrolize pri čemu je moguće pripremiti i funkcionaliziranu polioksometalatnu vrstu. Tako su M.T. Pope i A. Muller, pripremili funkcionalizirani polioksomolibdat Lindquistovog tipa s izopropoksi kompleksom titanija, polazeći iz tetrabutilamonijevih soli dinuklearne i oktanuklearne molibdatne vrste čija je reakcija nastajanja prikazana jednadžbom:



Dodatak reducirajućeg agensa u reakcijsku smjesu ili izlaganjem smjese UV zračenju dolazi do redukcije polioksometalatne vrste. M. T. Pope i A. Muller dodatkom Na/Hg amalgama u acetonitrilnu otopinu dodekamolibdata Kegginovog tipa opazili su da dolazi do nastajanja tamnoplave reducirane poliokso vrste koja je dodatkom kompleksa vanadija s dimetoksietanom rezultirala nastajanjem  $[\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}(\text{VO})_2]^{3-}$  aniona.

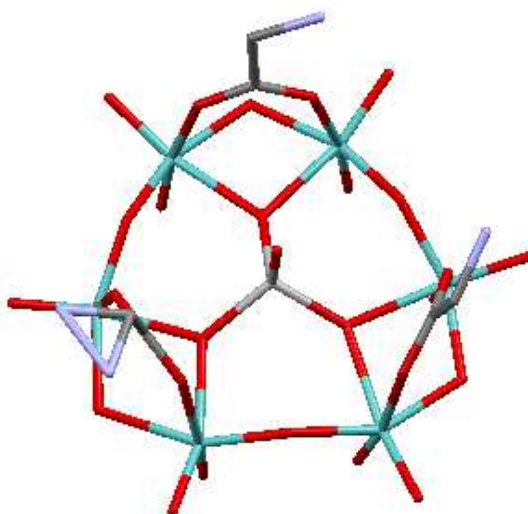
Hidrolizom polimernih struktura metalnih oksida u prisutnosti tetraalkilamonijevog hidroksida, nastaju niže polioksometalatne vrste, primjerice  $[\text{H}_x\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{(6-x)-}$  i  $[\text{HV}_4\text{O}_{12}]^{3-}$ . Pripravljene su iz vanadijevog pentoksida i tetrabutilamonijeva hidroksida uz različite molarne omjere.

Ukoliko se kao polazna supstanca koristi polioksometalat, moguće je kontroliranom hidrolizom, pripremiti druge polioksometalatne vrste. Tako su Y. Kikukawa i suradnici<sup>68</sup> sintezom u suhom acetonitrilu uz zagrijavanje iz  $[\text{H}_3\text{V}_{10}\text{O}_{28}]^{3-}$  pripremili dodeka- i tridekavanadat, koji uz dodatak tetrabutilamonijevog hidroksida reverzibilno ponovo tvore dekanadatni anion.

## 2.6. Polioksometalatne vrste s aminokiselinama i njihovim derivatima

Zbog svoje dokazane antivirusne i antitumorske aktivnosti, u literaturi je opisan značajan broj primjera u kojima su proučavane interakcije aminokiselina i polioksometalatnih vrsta. Međutim, u literaturi ne postoji mnogo primjera izopoli- i heteropolioksometalatnih vrsta funkcionaliziranih aminokiselinama i njihovim derivatima. Tako je opisana molekulska i kristalna struktura  $\gamma$ -oktamolibdata funkcionaliziranih alaninom i dipeptidom glicina molekulskih formula  $\text{Na}_4[\text{Mo}_8\text{O}_{26}(\text{alaO})_2] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{Na}_4[\text{Mo}_8\text{O}_{26}(\text{glyglyO})_2] \cdot 15\text{H}_2\text{O}$  u kojima je  $\gamma$ -oktamolibdatna jezgra funkcionalizirana dvjema molekulama alanina, odnosno glicilglicina.<sup>69</sup> Obje vrste pripravljene su u vodenim otopinama natrijevog molibdata podešavanjem pH na 3,4 dušičnom odnosno perklornom kiselinom. Pripravljene su i analogni derivati metionina koji također sadrže  $\gamma$ -oktamolibdatnu jezgru.<sup>70</sup>

Isti autori su pripremili i  $\text{K}_2[\text{HMo}_6\text{VO}_{22}(\text{gly})_3] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  reakcijom molibdenovog(VI) i vanadijevog(V) oksida uz dodatak kalijevog klorida na povišenoj temperaturi, čija se strukturna formula ne može pripisati ni jednom poznatom tipu polioksometalatne vrste.<sup>71</sup> Poliokso anion  $[\text{Mo}_6\text{VO}_{22}(\text{gly})_3]^{2-}$  prikazan je na slici 17 iz koje je vidljivo da se tetrakoordinirani vanadijev atom nalazi u središtu poliokso vrste, dok šest oktakoordiniranih atoma molibdena tvori prsten oko centralnog atoma vanadija. Tri molekule glicina koordinirane su na molibdenski prsten karboksilnom skupinom premošćujući parove atoma molibdena u prstenu.

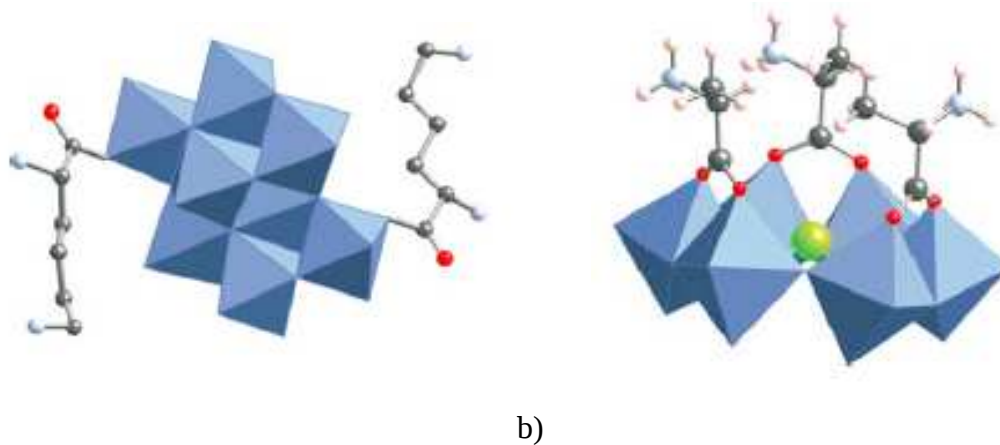


Slika 17. Strukturni prikaz  $[\text{Mo}_6\text{VO}_{22}(\text{gly})_3]^{2-}$  aniona. Atomi molibdena prikazani su svijetloplavom, atom vanadija svijetlosivom, atomi ugljika sivom, dok su atomi kisika prikazani crvenom bojom.<sup>71</sup>

T. Yamase i suradnici<sup>72</sup> pripravili su  $\gamma$ -oktamolibdate funkcionalizirane D- i L-lizinom, u kojima su dva terminalna atoma kisika zamijenjena atomima kisika karboksilne skupine lizina što rezultira ukupnom kiralnošću molekule, iako sam anion ne pokazuje kiralna svojstva (slika 18a).

U. Kortz i suradnici<sup>73</sup> pripravili su seriju heteropolimolibdata opće formule  $[\text{XMo}_6\text{O}_{21}(\text{aa})_3]^{n-}$  gdje je  $\text{X} = \text{As}^{3+}, \text{Sb}^{3+}, \text{Bi}^{3+}$   $n=2$ ; dok za  $\text{X} = \text{Se}^{4+}, \text{Te}^{4+}$   $n=2$ , a  $\text{aa}$  je aminokiselina, alanin ili lizin. Polioksometalatni anioni su građeni od heteroatoma okruženog  $\{\text{MoO}_6\}$  oktaedrima povezanim izmjenično bridom i vrhom tvoreći prstenastu strukturu. Dvije podjedinice povezane bridom su koordinirane karboksilnom skupinom aminokiseline (slika 18 b).

F.T. Bamoharram<sup>50</sup> dao je pregledni članak vlastitih istraživanja interakcija Kegginovog tipa polioksomolibdata i volframata s aminokiselinama (glicina, fenilalanina, valina i leucina) kao protuionima, u kojima su kao heteroatomi prisutni P i Si. Promjene u spektralnom području  $\text{Mo}-\text{O}_c-\text{Mo}$  i  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  vrpci hidroksipolioksometalatne vrste i aminokiselinske soli odgovarajuće polioksometalatne vrste dokazuju da je infracrvena spektroskopija prikladna metoda za identifikaciju i karakterizaciju interakcija polioksometalata s aminokiselinama.



Slika 18. Strukturni prikaz a)  $[\gamma\text{-Mo}_8\text{O}_{26}(\text{L-Lys})_2]^{2-}$  <sup>72</sup> i b)  $[\text{SeMo}_6\text{O}_{21}(\text{ala})_3]^{2-}$  <sup>73</sup> pri čemu su  $\{\text{MoO}_6\}$  podjedinice prikazane plavim oktaedrima, dok je atom Se na slici b) prikazan zelenom bojom. Atomi kisika prikazani su crvenom, atomi ugljika sivom, a atomi dušika plavom bojom.

## § 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Priprava ishodnih supstancija

#### 3.1.1. Priprava oksobis(pentan-2,4-dionato)vanadija(IV), $[VO(C_5H_7O_2)_2]$

U smjesu vode (1 mL), etanola (2 mL) i vanadijevog(V) oksida (0,5 g), doda se kap po kap sumporne kiseline (98%, 1 mL). Smjesa se zagrijava na temperaturi vrenja otopine sve do promjene boje u modru i nastanka vanadil sulfata,  $VOSO_4$ . Otopina se profiltrira od neotopljenog vanadijevog(V) oksida i u otopinu se u malim porcijama dodaje otopina priređena miješanjem pentan-2,4-diona (1,10 g), etanola (2 mL) i trietilamina (1,10 g). Otopina se dodaje sve do primjetnog prestanka taloženja plavozelenog kristaličnog produkta. Produkt se odfiltrira uz sniženi tlak i ispere vodom i petroleterom.

Dobivenom kompleksu snimljen je infracrveni spektar i uspoređen s literaturnim podacima.<sup>74</sup>

#### 3.1.2. Priprava dioksobis(salicilaldehidato)molibdena(VI), $[MoO_2(C_7H_5O_2)_2]$

Vodena otopina amonijevog paramolibdata (3,1 g, 2,5 mmol u 38 mL vode) pomiješa se s metanolnom otopinom salicilaldehida (5,5 g, 45 mmol u 15 mL metanola). U otopinu se doda kap po kap 2,5 mL koncentrirane klorovodične kiseline uz snažno miješanje. Suspenzija se ostavi stajati na sobnoj temperaturi najmanje 4 sata. Produkt se otfiltrira uz sniženi tlak i ispere hladnom vodom (15 ml) i smjesom 1:1 vode i metanola (15 ml).

Dobivenom kompleksu snimljen je infracrveni spektar i uspoređen s literaturnim podacima.<sup>75</sup>

#### 3.1.3. Pokušaj priprave kalijeva *N*-saliciliden-DL-aspartata, *L*-asparaginata i *L*-glutaminata

U otopinu KOH (140 mg, 2,45 mmol) u 10 mL vode doda se odgovarajuća aminokiselina prema tablici 1 i miješa do potpunog otapanja aminokiseline na sobnoj temperaturi (oko 30 minuta). U otopinu se doda svježe pripremljena etanolna otopina salicilaldehida (1,22 g; 10 mmol u 10 mL etanola). Reakcijska smjesa se zagrijava na temperaturi vrenja otopine 1 sat. Otopina se upari do primjetne kristalizacije uz sniženi tlak. Bijeli kristalni produkt izolira

se filtracijom uz sniženi tlak. Ustanovljeno je da je u svim slučajevima radi o polaznoj aminokiselini.

Upotreba tetrametilamonijevog hidroksida i tretilamina kao baze uz metanol kao otapalo, također nije rezultirala željenim produktom.

Tablica 1. Mase aminokiselina dodane u reakcijsku smjesu.

|               | L- Asp | D,L- Asn | L- Gln |
|---------------|--------|----------|--------|
| <i>m</i> / mg | 665    | 660      | 735    |

#### 3.1.4. Priprava *N*-saliciliden-*L*-ornitina

U vodenu otopinu KOH (280 mg, 5 mmol, 10 mL) doda se 840 mg (5 mmol) *L*-ornitin hidroklorida. Smjesa se miješa do potpunog otapanja aminokiseline na sobnoj temperaturi (oko 30 minuta). U otopinu se zatim doda svježe pripremljena otopina salicilaldehida (1,22 g; 10 mmol) u 10 mL etanola. Reakcijska smjesa se zagrijava uz refluks 1 sat. Gotovo odmah dolazi do nastajanja žutog kristalnog produkta. Smjesa se ohladi na sobnu temperaturu i miješa još 1 sat. Kristalni produkt se profiltrira uz sniženi tlak i ispere hladnim etanolom te suši uz sniženi tlak bez grijanja. Izolirano je 840 mg (62%, računato na *L*-ornitin) produkta. Produkt je povrgnut kemijskoj analizi, snimljeni su  $^1\text{H}$  i  $^{13}\text{C}$  NMR spektri te IR spektri (tablica 2).

Tablica 2. Rezultati kemijske i spektroskopske analize za  $\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3$ .

| Rezultati kemijske analize / $\omega$ (%)                               |                                                                            |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------|-------|
|                                                                         | C                                                                          | H    | N     |
| eksperimentalno dobiveno                                                | 61,21                                                                      | 6,45 | 11,67 |
| računato za formulu<br>$\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3$ | 61,52                                                                      | 6,61 | 11,86 |
| Spektroskopska mjerenja                                                 |                                                                            |      |       |
| NMR $^1\text{H}$ pomaci $\delta$ / ppm                                  | 1,66-1,76; 3,14; 3,58; 6,86; 6,88; 7,31; 7,42; 8,55                        |      |       |
| NMR $^{13}\text{C}$ pomaci $\delta$ / ppm                               | 26,65; 28,67; 53,88; 57,97; 116,40; 118,29; 118,5; 131,47; 132,12; 160,75; |      |       |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$                      | 750; 846; 1284; 1338; 1410; 1514; 1582; 1638; 2948; 3050                   |      |       |

### 3.2. Reakcije dioksobis(saliciladehidato)molibdena(VI) s aminokiselinama

[MoO<sub>2</sub>(sal)<sub>2</sub>] (630 mg, 1,7 mmol) otopi se u 35 mL metanola i otopina se profiltrira od nečistoća. Kroz otopinu se propuhuje argon oko 15 minuta kako bi se uklonio kisik te se potom doda usitnjena aminokiselina (3,7 mmola) prema Tablici 3. U reakcijsku suspenziju potom se doda 100 µL trietilamina i sve se grije 5 sati na temperaturi vrenja smjese uz propuhivanje argonom.

Tablica 3. Dodane mase aminokiselina.

|              | L-Asp | D,L- Asn | L-Gln | L-OrnHCl |
|--------------|-------|----------|-------|----------|
| <i>m/ mg</i> | 522   | 460      | 500   | 590      |

#### 3.2.1. Reakcija s D,L– asparaginom: izolacija kompleksa [Mo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(η<sup>3</sup>–L3)<sub>2</sub>, [MoO<sub>2</sub>(η<sup>4</sup>–L3)] i kumarin-3-karboksamida, C<sub>10</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>3</sub>

Nakon 3 sata reakcijska smjesa u koju je dodan D,L- asparagin bila je potpuno homogena otopina je ohlađena, profiltrira i ostavljena stajati na sobnoj temperaturi. Nakon 24 sata nastala je smjesa bezbojne i žute kristalne supstancije koja je profiltrirana i isprana s 15 mL hladne vode. Ispiranje s vodom dovelo je do otapanja bezbojnog kristaliničnog produkta. Dobiveno je 260 mg žutog kristalnog produkta u formi iglica.

Produkt je identificiran na temelju podataka kemijske i termičke analize, kao i na temelju podataka iz IR, <sup>1</sup>H i <sup>13</sup>C NMR spektara (tablica 4).

Tablica 4. Rezultati kemijske, termogravimetrijske i spektroskopske analize  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\eta^3\text{-L3})_2]$ 

| Rezultati kemijske analize / ω (%)                                                                    |                                                                                          |      |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|
|                                                                                                       | C                                                                                        | H    | N    | Mo    |
| eksperimentalno dobiveno                                                                              | 35,30                                                                                    | 2,75 | 7,62 | 26,30 |
| računato za formulu<br>C <sub>22</sub> H <sub>20</sub> Mo <sub>2</sub> N <sub>4</sub> O <sub>12</sub> | 35,69                                                                                    | 2,72 | 7,57 | 25,91 |
| Rezultati termogravimetrijska analiza                                                                 |                                                                                          |      |      |       |
| temperaturni interval / °C                                                                            | 25-500                                                                                   |      |      |       |
| Δm / %                                                                                                | 60,56                                                                                    |      |      |       |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                                                                    |                                                                                          |      |      |       |
| NMR <sup>1</sup> H pomaci δ / ppm                                                                     | 2,93; 4,92; 6,99; 7,11; 7,31; 7,34; 7,61; 7,67; 8,76                                     |      |      |       |
| NMR <sup>13</sup> C pomaci δ / ppm                                                                    | 39,21; 65,91; 118,55; 121,34; 121,53; 134, 79;<br>135,99; 159,74; 164,89; 170,79; 174,67 |      |      |       |
| Značajne IR vrpce ν̃ / cm <sup>-1</sup>                                                               | 638; 762; 820; 908; 944; 1414; 1472; 1556; 1610;<br>1680; 1716; 3382                     |      |      |       |

Iz matičnice stajanjem izlaze bijeli igličasti kristali, morfološki identični onima iz prvotne smjese identificirani kao kumarin–3–karboksamid. Produkt je izoliran filtracijom uz sniženi tlak i osuši se na zraku (60 mg).

Produkt je podvrgnut kemijskoj analizi i snimljen mu je IR spektar (tablica 5).

Tablica 5. Rezultati kemijske i spektroskopske analize  $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NO}_3$ , kumarin-3-karboksamida

| Rezultati kemijska analiza / $\omega$ (%)                   |                                                    |      |      |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------|------|
|                                                             | C                                                  | H    | N    |
| eksperimentalno dobiveno                                    | 63,55                                              | 3,40 | 7,39 |
| računato za formulu<br>$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NO}_3$ | 63,53                                              | 3,73 | 7,41 |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                          |                                                    |      |      |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$          | 618; 770; 1008; 1162; 1388; 1564; 1714; 3146; 3390 |      |      |

**a) Utjecaj otapala: reakcija u diklormetanu**

Ako se prethodno opisana reakcija provede u diklormetanu kao otapalu, hlađenjem iz otopine kristalizira samo žuti kristalni produkt  $[\text{MoO}_2(\eta^4\text{-L3})]$ . Produkt je profiltriran uz sniženi tlak i osušen na sobnoj temperaturi (100 mg), te je produkt identificiran na temelju podataka kemijske analize kao i podataka iz IR spektra. Kompleksu je određena molekulska i kristalna struktura, difrakcijom rentgenskih zraka na jediničnom kristalu (tablica 6).

Tablica 6. Rezultati kemijske i spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka u jediničnom kristalu kompleksa  $[\text{MoO}_2(\eta^4\text{-L3})]$

| Rezultati kemijske analize / ω (%)                                                         |                    |                                                    |                             |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|-------|
|                                                                                            | C                  | H                                                  | N                           | Mo    |
| eksperimentalno dobiveno                                                                   | 36,59              | 2,75                                               | 7,52                        | 26,30 |
| računato za formulu<br>C <sub>11</sub> H <sub>10</sub> MoN <sub>2</sub> O <sub>6</sub> / % | 36,48              | 2,78                                               | 7,52                        | 26,49 |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                                                         |                    |                                                    |                             |       |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>                                         |                    | 944; 928; 1410; 1422; 1576; 1600; 1665; 1730; 3372 |                             |       |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku                            |                    |                                                    |                             |       |
| kristalni<br>sustav                                                                        | prostorna<br>grupa | $a, b, c$ / Å                                      | $\alpha, \beta, \gamma$ / ° | $Z$   |
| monoklinski                                                                                | $P\ 2_1/a$         | 12,059; 7,364; 15,329                              | 90; 111,73; 90              | 4     |

**3.2.2. Reakcija s L- glutaminom: izolacija sukcinamida  $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$** 

Iz intenzivno obojene narančaste reakcijske smjese, hlađenjem na sobnu temperaturu, kristalizira bezbojna supstancija (200 mg) za koju je ustanovljeno da se radi o sukcinamidu,  $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$ . Stajanjem na sobnoj temperaturi (48 sati) otopina mijenja boju u crvenu. Otopina se upari na približno pola volumena pri čemu dolazi do kristalizacije žutog produkta koji je izoliran filtracijom uz sniženi tlak (30 mg).

Molibdenski ostatak nije bilo moguće identificirati.

Sukcinamid je identificiran usporedbom sa spektrom dostupnim u bazi podataka (tablica 7).

Tablica 7. Rezultati spektroskopske analize  $C_4H_8N_2O_2$ , sukcinamida

| Rezultati spektroskopskih mjerenja               |                                                    |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu} / \text{cm}^{-1}$ | 662; 668; 1221; 1411; 1427; 1630; 1678; 3179; 3347 |

3.2.3. *Reakcija s L-ornitin hidrokloridom: izolacija kompleksa*  
 $[MoO_2(C_{19}H_{19}N_2O_5)(CH_3OH)]Cl \cdot CH_3OH$  (ML5<sub>cikl</sub>)

Reakcijska smjesa se po hlađenju ostavi stajati nekoliko dana na sobnoj temperaturi. Zeleni produkt se odfiltrira uz sniženi tlak i pere s 5 mL metanola. Kristali se suše uz sniženi tlak u atmosferi argona. Dobiveno je 420 mg (42%)  $[MoO_2(C_{19}H_{19}N_2O_5)(CH_3OH)]Cl \cdot CH_3OH$ .

Produkt je podvrgnut kemijskoj analizi, te mu je snimljen IR spektar. Iz izoliranog produkta odabran je jedinični kristal koji je podvrgnut difrakciji rentgenskih zraka na monokristalu (tablica 8).

Tablica 8. Rezultati kemijske i spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka na jediničnom kristalu kompleksa  $[MoO_2(C_{19}H_{19}N_2O_5)(CH_3OH)]Cl \cdot CH_3OH$ .

| Rezultati kemijske analize ω / %                                                         |                                                             |                        |      |                             |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------|------|-----------------------------|-------|
|                                                                                          | C                                                           | H                      | N    | Cl                          | Mo    |
| eksperimentalno dobiveno                                                                 | 43,96                                                       | 4,56                   | 5,01 | 6,20                        | 16,63 |
| računato za formulu<br>C <sub>21</sub> H <sub>27</sub> ClMoN <sub>2</sub> O <sub>8</sub> | 44,49                                                       | 4,80                   | 4,94 | 6,25                        | 16,92 |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>                      |                                                             |                        |      |                             |       |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>                                       | 909; 934; 1428; 1454; 1600; 1624; 1668; 2938;<br>3028; 3172 |                        |      |                             |       |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku                          |                                                             |                        |      |                             |       |
| kristalni<br>sustav                                                                      | prostorna<br>grupa                                          | $a, b, c$ / Å          |      | $\alpha, \beta, \gamma$ / ° | $Z$   |
| triklinski                                                                               | $P\bar{1}$                                                  | 9,6417; 10,134; 12,701 |      | 79,83; 78,28; 78,09         | 2     |

### 3.3. Reakcije spojeva vanadija (IV) s aminokiselinama

#### 3.3.1. Reakcija s D,L-asparaginom: izolacija polioksovanadata

$\{[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4]_2(\mu\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_3\text{O})_4\} [\text{V}_9\text{V}(\text{V}^{\text{IV}})\text{O}_{28}]$  i kumarin-3-karboksamida,  $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NO}_3$

D,L-asparagin (660 mg, 5 mmol) otopi se u 20 mL vode te doda otopina salicilaldehida (610 mg, 5 mmol) u 20 mL etanola i vodena otopina natrijevog acetata (1,36 g, 10 mmol u 10 mL vode). U tako priređenu otopinu doda se vodena otopina vanadil sulfat (1 g, 5 mmol u 10 mL vode). Reakcijska smjesa postaje tamnocrvena i trenutno nastaje bijeli kristalni produkt. Smjesa se miješa 30 minuta na sobnoj temperaturi te filtrira. Filtrat se ostavi stajati na hladno. Smjesa zelenožutih i bezbojnih kristala izolira se filtracijom uz sniženi tlak i suspendira u vodi. Dolazi do otapanja zelenožutog produkta. Iz vodene otopine dolazi do kristalizacije narančastih kristala stajanjem.

Kristalima je snimljen IR spektar. Iz izoliranog produkta izdvojen je monokristal zelenožutog produkta za rentgensku strukturnu analizu. Bezbojni kristali identificirani su usporedbom s literaturnim podacima i kumarin-3 karboksamidom dobivenim iz reakcije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i asparagina te je potvrđeno nastajanje kumarin-3-karboksamida (bezbojni kristali). Zeleno-žuti produkt identificiran je kao  $\{[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4]_2(\mu\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_3\text{O}^+)_5\} [\text{V}_9^{\text{V}}(\text{V}^{\text{IV}})\text{O}_{28}]$ . Narančasti kristali izolirani stajanjem vodene otopine dekavanadata identificirani su kao  $\{[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4]_2(\mu\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_3\text{O}^+)_4\} [\text{V}_9^{\text{V}}(\text{V}^{\text{IV}})\text{O}_{28}]$ .<sup>76</sup>

Tablica 9. Rezultati spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka na jediničnom kristalu kompleksa  $\{[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4]_2(\mu\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_3\text{O}^+)_4\} [\text{V}_9^{\text{V}}(\text{V}^{\text{IV}})\text{O}_{28}]$ .

|                                                                                                                                                                                                                                                          |                 |                                                    |                        |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------|------------------------|---|
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                                                                                                                                                                                                                       |                 |                                                    |                        |   |
| Značajne IR vrpce C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> NO <sub>3</sub> $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>                                                                                                                                                        |                 | 618; 770; 1008; 1162; 1388; 1564; 1714; 3146; 3390 |                        |   |
| Značajne IR vrpce {[Na(H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> ] <sub>2</sub> (μ-H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ) <sub>4</sub> } [V <sub>9</sub> <sup>V</sup> (V <sup>IV</sup> )O <sub>28</sub> ] $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup> |                 | 616; 639; 998                                      |                        |   |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku                                                                                                                                                                                          |                 |                                                    |                        |   |
| kristalni sustav                                                                                                                                                                                                                                         | prostorna grupa | a, b, c / Å                                        | α, β, γ / °            | Z |
| triklinski                                                                                                                                                                                                                                               | P $\bar{1}$     | 8,5215; 10,4739; 11,3115                           | 68,455; 87,095; 66,914 | 2 |

### 3.3.2. Reakcija s L-glutaminom: izolacija kompleksa $[VO(C_{12}H_{12}N_2O_4)(OC_2H_5)(HOC_2H_5)]$

U vodenu otopinu L-glutamina (730 mg, 5 mmol u 20 mL vode) doda se etanolna otopina salicilaldehida (610 mg, 5 mmol u 20 mL etanola) te otopina natrijevog acetata (1,36 g, 10 mmol u 10 mL vode). U otopinu se potom doda otopina vanadil sulfata (1 g, 5 mmol u 10 mL vode). Tamnocrvena suspenzija miješa se 1,5 h i profiltrira a filtrat je ostavlja stajati na hladno. Nakon 20 dana tamnocrveni kristalni produkt se odfiltrira uz sniženi tlak (800 mg).

Produkt je podvrgnut termogravimetrijskoj analizi i snimljen mu je IR spektar. Iz izoliranog produkta izdvojen je monokristal pogodan za rentgensku strukturnu analizu (tablica 10).

Tablica 10. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka u jediničnom kristalu kompleksa  $[VO(C_{12}H_{12}N_2O_4)(OC_2H_5)(HOC_2H_5)]$ .

|                                                                 |                                                       |                                                                         |                                    |          |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| Rezultati termogravimetrijske analiza                           |                                                       |                                                                         |                                    |          |
| temperaturni interval / °C                                      |                                                       | 50–500                                                                  |                                    |          |
| Δ <i>m</i> / %                                                  |                                                       | 78,6                                                                    |                                    |          |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                              |                                                       |                                                                         |                                    |          |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / cm <sup>−1</sup>              |                                                       | 561; 634; 827; 918; 976; 1037; 1085; 1290; 1364; 1406; 1449; 1642; 3390 |                                    |          |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku |                                                       |                                                                         |                                    |          |
| kristalni sustav                                                | prostorna grupa                                       | <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> / Å                                      | <i>α</i> , <i>β</i> , <i>γ</i> / ° | <i>Z</i> |
| rompski                                                         | <i>P</i> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> 2 <sub>1</sub> | 7,5393; 9,7339; 24,964                                                  | 90; 90; 90                         | 4        |

### 3.3.3. Reakcija vanadil sulfata sa salicilidenskim derivatom L-ornitin hidroklorida

#### a) Reakcija s vanadil sulfatom

U vodenu otopinu L-ornitin hidroklorida (840 mg, 5 mmol u 10 mL vode) doda se etanolna otopina salicilaldehida (1,22 g, 10 mmol u 20 mL etanola) te otopina natrijevog acetata (1,36 g, 10 mmol u 10 mL vode). Kroz otopinu se propušta argon 15 minuta te se potom doda otopina vanadil sulfata (1 g, 5 mmol u 10 mL vode). Tamnocrvena smjesa miješa se 2 sata uz propuhivanje argona, filtrira i filtrat se ostavi stajati na hladno (2 dana). Nastali zeleno smeđi

produkt je izoliran filtracijom uz sniženi tlak (800 mg) i dobiven je izrazito nestabilan produkt koji se gotovo momentalno raspada na zraku.

Produktu je snimljen IR spektar (tablica 11).

Tablica 11. Rezultati spektroskopske analize za VL5

| Rezultati spektroskopske analize                   |                                                          |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$ | 909; 934; 1428; 1454; 1600; 1624; 1668; 2938; 3028; 3172 |

**b) Reakcija oksobis(pentan-2,4-dionato)vanadija(IV),  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  s *N*-saliciliden- L-ornitinom (L5): izolacija  $[\text{VO}(\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_4)(\text{OCH}_3)]$**

U otopinu  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (270 mg, 1 mmol u 25 ml suhog metanola) doda se L5 (230 mg, 1 mmol). Smjesa se zagrijava uz refluks 4 sata. Nakon 45 minuta od početka zagrijavanja otopina mijenja boju u tamno-crvenu. Reakcijska smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat se ostavi stajati na sobnoj temperaturi. Dolazi do nastajanja tamnog produkta koji se profiltrira uz sniženi tlak, ispere s nekoliko mililitara hladnog metanola te suši na zraku. Izolirano je 70 mg produkta nakon sušenja na zraku.

Produktu je podvrgnut kemijskoj i termogravimetrijskoj analizi, te mu je snimljen IR spektar (tablica 12).

U otopinu  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (270 mg, 1 mmol u 25 mL suhog metanola) doda se L5 (230 mg, 1 mmol). Smjesa se zagrijava uz refluks 4 sata. Nakon 45 minuta otopina mijenja boju u tamno-crvenu. Reakcijska smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat se ostavi stajati na sobnoj temperaturi. Dolazi do nastajanja tamnog produkta koji se profiltrira uz sniženi tlak, pere sa nekoliko mililitara hladnog metanola te suši na zraku. Izolirano je 70 mg produkta nakon sušenja na zraku.

Produktu je podvrgnut kemijskoj i termogravimetrijskoj analizi, te mu je snimljen IR spektar (tablica 12).

Tablica 12. Rezultati kemijske, termogravimetrijske i spektroskopske analize kompleksa  $[\text{VO}(\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_4)(\text{OCH}_3)]$ .

| Rezultati kemijske analize (ω %)                                                    |                                                                                |      |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------|
|                                                                                     | C                                                                              | H    | N    | V     |
| eksperimentalno dobiveno                                                            | 54,65                                                                          | 4,46 | 7,0  | 11,65 |
| računato za formulu C <sub>19</sub> H <sub>19</sub> N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> V | 54,20                                                                          | 4,51 | 6,65 | 12,10 |
| Rezultati termogravimetrijske analize                                               |                                                                                |      |      |       |
| temperaturni interval / °C                                                          | 50–520                                                                         |      |      |       |
| Δ <i>m</i> / %                                                                      | 79,24                                                                          |      |      |       |
| Spektroskopska mjerenja                                                             |                                                                                |      |      |       |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>                                  | 566; 631; 772; 814; 859; 919; 963; 1276; 1319; 1441; 1549;<br>1597; 1626; 1682 |      |      |       |

### 3.4. Reakcije molibdovanadata

#### 3.4.1. Reakcija s L-asparaginskom kiselinom. : izolacija $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ i $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{C}_{11}\text{H}_8\text{NO}_5)_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$ .

$[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (370 mg, 1 mmol) i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (60 mg, 0,2 mmol) otope se u 30 mL metanola uz zagrijavanje. Smjesa se profiltrira i doda L-aspartat (270 mg, 2 mmol) i tetrabutilamonijev bromid (1,61 g, 5 mmol) i 10 mL metanola. U reakcijsku smjesu doda se 100  $\mu\text{L}$  trietilamina. Zelena otopina zagrijava se na temperaturi vrelišta otopine 16 sati pri čemu dolazi do promjene boje otopine u crvenosmeđu. Smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat upari na približno 15 mL, filtrira i ostavi stajati na sobnoj temperaturi.

Kroz par sati pojavljuju se svijetložuti igličastih kristali identificirani kao  $(\text{Bu}_4\text{N})_2(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$  a kroz sljedećih nekoliko sati dolazi do kristalizacije i narančastih kristala  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{C}_{11}\text{H}_8\text{NO}_5)_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$  uz žuti produkt i obezbojenja matičnice.

Iz izoliranog produkta izdvojeni su monokristali za rentgensku strukturnu analizu, i žutom kristalnom produktu snimljen je IR spektar (tablica 13).

Tablica 13. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka u jediničnom kristalu kompleksa  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ .

|                                                                 |                 |                                       |                 |   |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|---|
| Rezultati termogravimetrijske analize                           |                 |                                       |                 |   |
| temperaturni interval / °C                                      |                 | 220-500                               |                 |   |
| Δm / %                                                          |                 | 38,74                                 |                 |   |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                              |                 |                                       |                 |   |
| Značajne IR vrpce / cm <sup>-1</sup>                            |                 | 742; 800; 955; 1469; 2875; 2935; 2965 |                 |   |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku |                 |                                       |                 |   |
| kristalni sustav                                                | prostorna grupa | a, b, c / Å                           | α, β, γ / °     | Z |
| monoklinski                                                     | C 2/c           | 29,1892; 18,4805; 30,9641             | 90; 107,185; 90 | 8 |

**a) Utjecaj stehiometrije: izolacija  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})(\text{H}_3\text{O})[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]$  i  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{C}_{11}\text{H}_8\text{NO}_5)_2]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$ .**

Ponavljanjem reakcije uz promjenu količine vanadijevog kompleksa u ekvimolarnom omjeru prema  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (260 mg, 1 mmol) izoliran je narančasti produkt nastao stajanjem (8 sati). Kristali su profiltrirani uz sniženi tlak i isprani s hladnim metanolom. Izolirano je 60 mg produkta. Iz matičnice je izolirana smjesa bezbojnog igličastog produkta  $((\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})(\text{H}_3\text{O})[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}])$ , žutih pločica i male količine crnih kristala (50 mg).

Iz izoliranog produkta izdvojeni su monokristali za rentgensku strukturnu analizu, pri čemu su prikupljeni podaci dani u tablici 14.

Tablica 14. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize te difrakcije rentgenskih zraka na jediničnom kristalu kompleksa  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{C}_{11}\text{H}_8\text{NO}_5)_2]\cdot\text{CH}_3\text{OH}$ .

| Rezultati termogravimetrijske analize                           |                 |                                                                                                                     |                             |         |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------|
| temperaturni interval / °C                                      |                 | 20-80                                                                                                               | 80-200                      | 200-500 |
| Δm / %                                                          |                 | 4,21                                                                                                                | 5,03                        | 42,74   |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                              |                 |                                                                                                                     |                             |         |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / cm <sup>-1</sup>              |                 | 479; 540; 565; 693; 764; 807; 906; 941; 973; 1284; 1385; 1400; 1424; 1450; 1551; 1561; 1593; 1635; 1655; 2963; 3449 |                             |         |
| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku |                 |                                                                                                                     |                             |         |
| kristalni sustav                                                | prostorna grupa | $a, b, c$ / Å                                                                                                       | $\alpha, \beta, \gamma$ / ° | $Z$     |
| rompski                                                         | $P\ 2_12_12_1$  | 14,695; 15,0159; 25,569                                                                                             | 90; 90; 90                  | 4       |

Tablica 15. Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na jediničnom kristalu kompleksa  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})(\text{H}_3\text{O}^+)[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]$ .

| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku |                 |                           |                             |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|-----|
| kristalni sustav                                                | prostorna grupa | $a, b, c$ / Å             | $\alpha, \beta, \gamma$ / ° | $Z$ |
| monoklinski                                                     | $P 2_1/c$       | 16,0254; 18,2401; 17,9714 | 90; 107,185; 90             | 4   |

**b) Utjecaj otapala: diklormetan i trifluoetanol**

Reakcija uz stehiometrijski omjer  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2] : [\text{VO}(\text{acac})_2] : \text{salH} : \text{L-Asp} : \text{Bu}_4\text{NBr}$  1:1:2:2:5 ponovljena je u diklormetanu i trifluoroetanolu, pri čemu su alikvoti reakcijske smjese uzimani nakon 5 i 24 sata za diklormetan, te nakon 5, 24, 48 i 72 sata za trifluoroetanol. Iz svih sustava bilo je moguće u čvrstom stanju izolirati samo L-aspartat.

**c) Utjecaj ishodnih supstancija:  $\text{VOSO}_4$  i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$** 

Ponavljanjem reakcije uz stehiometrije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2] : \text{VOSO}_4 : \text{salH} : \text{L-Asp} : \text{Bu}_4\text{NBr}$  1:1:2:2:5 uz iznimku korištenja vanadil sulfata umjesto  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$ , izolirana je smjesa  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{HL}_2)_2]$  i crnog produkta (60 mg).

Tablica 16. Rezultati spektroskopske analize kompleksa  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{HL}_2)_2]$ 

| Rezultati spektroskopskih mjerenja               |                                                                                     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu} / \text{cm}^{-1}$ | 672; 755; 806; 900; 940; 971; 1127; 1253; 1278; 1383; 1423; 1448; 1551; 1584; 1631. |

**d) Reakcija bez dodatka  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$ : izolacija  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{HL}_2)_2]$** 

Ponavljanjem reakcije uz izostavljanje dodatka  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  iz intenzivno žute otopine zagrijavanjem nakon 30-45 minuta došlo je do kristalizacije produkta. Reakcijska smjesa je nakon 3 sata ohlađena na sobnu temperaturu i produkt je izoliran filtracijom uz sniženi tlak te isperan sa 5 mL hladnog metanola i osušen u eksikatoru (60 mg).

Produkt je podvrgnut termogravimetrijskoj analizi i snimljen mu je IR spektar (tablica 17).

Tablica 17. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize kompleksa  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{HL}_2)_2]$ .

| Rezultati termogravimetrijske analize            |                                                                                                             |         |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| temperaturni interval / °C                       | 120–250                                                                                                     | 250–500 |
| $\Delta m / \%$                                  | 2,29                                                                                                        | 35,45   |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja               |                                                                                                             |         |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu} / \text{cm}^{-1}$ | 531; 565; 642; 763; 810; 887; 898; 906; 916; 926; 931; 1267; 1348; 1380; 1400; 1448; 1556; 1599; 1615; 1697 |         |

### 3.4.2. Reakcija s D,L-asparaginom: izolacija $[\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(12-x)}\text{O}_{44}]^{n-}$

$[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (370 mg, 1 mmol) i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (60 mg, 0,2 mmol) otopi se u 30 mL metanola uz zagrijavanje. Smjesa se profiltrira i doda se D,L-asparagin (270 mg, 2 mmol), tetrabutilamonijev bromid (1,61 g, 5 mmol) i 10 mL metanola. U reakcijsku smjesu doda se 100  $\mu\text{L}$  trietilamina.

Otopina se zagrijava na temperaturi vrelišta 5- 6 sati uz refluks pri čemu dolazi do promjene boje otopine u crvenosmeđu. Smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat upari na približno 10 mL, filtrira i ostavi stajati na sobnoj temperaturi. Nakon 1-2 dana stajanjem izlazi smjesa produkata.

Nakon 24 sata izolirano je 150 mg smjese produkata. Pod lupom su primijećene bijele iglice, žute pločice te tamne iglice. Smjesu nije bilo moguće razdvojiti na temelju topljivosti. Iz matičnice stajanjem ponovno izlazi smjesa produkata (70 mg).

Iz izoliranog produkta izdvojen je monokristal za rentgensku strukturnu analizu (Tablica 19).

Tablica 18. Rezultati difrakcije rentgenskih zraka u jediničnom kristalu za  $[\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(12-x)}\text{O}_{44}]^{n-}$ .

| Rezultati difrakcije rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku |                 |                              |                                  |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------------|-----|
| kristalni sustav                                                | prostorna grupa | $a, b, c / \text{\AA}$       | $\alpha, \beta, \gamma / ^\circ$ | $Z$ |
| kubični                                                         | $I m\bar{3}m$   | 17,6607; 17,6607; 17,6607(4) | 90, 90, 90                       | 2   |

Ponavljanjem reakcije uz praćenje reakcije infracrvenom spektroskopijom *in-situ* 24 sata, izolirana je mala količina svijetlozelenog produkta. Produktu je snimljen infracrveni spektar, te je podvrgnut kemijskoj analizi (tablica 19).

Tablica 19. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize za  $[\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(12-x)}\text{O}_{44}]^{n-}$ .

| Rezultati termogravimetrijske analize              |                         |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| temperaturni interval / °C                         | 220–500                 |
| $\Delta m$ / %                                     | 38,74                   |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                 |                         |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$ | 954; 878; 786; 741; 590 |
| ICP-AES                                            | 44 (% Mo)               |

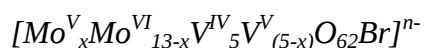
### 3.4.3. Reakcija s L-glutaminom

$[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (370 mg, 1 mmol) i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (60 mg, 0,2 mmol) otope se u 30 mL metanola uz zagrijavanje. Smjesa se profiltrira, doda L-glutamin (270 mg, 2 mmol), tetrabutilamonijev bromid (1,61 g, 5 mmol) i 10 mL metanola. U reakcijsku smjesu se doda 100  $\mu\text{L}$  trietilamina. Otopina se zagrijava na temperaturi vrelišta smjese 5,5 sati pri čemu je došlo do promjene boje otopine u crvenosmeđu. Smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat upari na približno 10 mL. Ponovo se profiltrira i ostavi stajati na sobnoj temperaturi.

Kroz par sati dolazi do kristalizacije smjese bezbojnih i žutih kristala. Smjesa kristala se profiltrira uz sniženi tlak i ispere sa par mililitara metanola te suši na zraku (150 mg).

Produkt izoliran iz matičnice također je smjesa kristala. Izolirani produkti su identificirani usporedbom infracrvenog spektra i difraktograma praha s IR spektrom L-glutamina i  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ .

### 3.4.4. Reakcija s L-ornitinhidrokloridom: izolacija $(\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_4\text{V}_6\text{O}_{28}] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,



$[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (370 mg, 1 mmol) i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (60 mg, 0,2 mmol) otope se u 30 mL metanola uz zagrijavanje. Smjesa se profiltrira i doda L-ornitin hidroklorid (340 mg, 2 mmol), tetrabutilamonijev bromid (1,61 g, 5 mmol) i 10 mL metanola. U reakcijsku smjesu doda se 100  $\mu\text{L}$  trietilamina. Otopina se zagrijava na temperaturi vrelišta 6 sati pri čemu dolazi do promjene boje otopine u crvenosmeđu. Smjesa se ohladi na sobnu temperaturu, profiltrira i filtrat upari na približno 15 mL, ponovo profiltrira i ostavi stajati na sobnoj temperaturi. Stajanjem preko noći dolazi do kristalizacije smjese produkata iz otopine. Smjesa žutih štapića i narančastih pločica  $((\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_4\text{V}_6\text{O}_{28}] \cdot 3\text{H}_2\text{O})$  izolira se filtracijom uz sniženi tlak i

suši na zraku. Iz matičnice stajanjem izlaze gotovo crni krupnokristaliničan produkt (40 mg). Reakcija je ponovljena, pri čemu je vrijeme reakcije produženo na 24 sata. Promjene u reakcijskoj smjesi praćene su *in-line* FT-IR spektroskopijom kako je opisano u analitičkim metodama.

Nakon 12 sati reakcije nastaje tamni sitnokristaliničan produkt, tipa aniona  $[\text{Mo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{13-x}\text{V}^{\text{IV}}_5\text{V}^{\text{V}}_{(5-x)}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ . Po završetku reakcije, smjesa se ohladi na sobnu temperaturu i ostavi stajati nekoliko sati. Produkt se profiltrira uz sniženi tlak, ispere s 10 mL metanola, te suši na zraku (290 mg). Produkt je podvrgnut ICP-AES analizi te mu je snimljen IR spektar (tablica 20).

Tablica 20. Rezultati spektroskopskih analiza  $[\text{Mo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{13-x}\text{V}^{\text{IV}}_5\text{V}^{\text{V}}_{(5-x)}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ .

| Rezultati spektroskopskih mjerenja                 |                                                            |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$ | 528; 776; 816; 868; 949; 988; 1461; 1483; 2873; 2935; 2961 |
| ICP- AES                                           | 39,79 (% Mo), 8,18 (%V)                                    |

#### 3.4.5. Reakcija bez dodatka aminokiseline: izolacija $[\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{13-x}\text{V}^{\text{IV}}_y\text{V}^{\text{V}}_{(5-y)}\text{O}_{62}]^{n-}$

$[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (370 mg, 1 mmol) i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  (60 mg, 0,2 mmol) otope se u 30 mL metanola uz zagrijavanje. Smjesa se profiltrira i doda tetrabutilamonijev bromid (1,61 g, 5 mmol) i 10 mL metanola. U reakcijsku smjesu doda se 100  $\mu\text{L}$  trietilamina. Reakcijska otopina zagrijavana je na temperaturi vrenja 16 sati pri čemu se nakon 4 sata primjećuje pojava tamnih kristala. Reakcija je praćena *in-situ* infracrvenom spektroskopijom. Otopina se ohladi na sobnu temperaturu i profiltrira. pH smjese je iznosio 2,3. Tamni praškasti produkt se profiltrira uz sniženi tlak i ispere s 2 x 5 mL metanola.

Izolirano je 150 mg praškastog produkta nakon sušenja na sobnoj temperaturi uz sniženi tlak. Produkt je podvrgnut ICP-AES, termogravimetrijskoj analizi te mu je snimljen IR spektar (tablica 21).

Tablica 21. Rezultati termogravimetrijske i spektroskopske analize  $[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(5-y)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$

| Rezultati termogravimetrijske analize              |                                                            |         |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------|
| temperaturni interval/ °C                          | 40-240                                                     | 240-450 |
| $\Delta m$ / %                                     | 8,05                                                       | 34,62   |
| Rezultati spektroskopskih mjerenja                 |                                                            |         |
| Značajne IR vrpce $\tilde{\nu}$ / $\text{cm}^{-1}$ | 528; 776; 816; 868; 949; 988; 1461; 1483; 2873; 2935; 2961 |         |
| ICP- AES                                           | 31,16 (% Mo), 8,49 (%V)                                    |         |

### 3.5. MATERIJALI I METODE

#### 3.5.1. Polazne supstancije

Aminokiseline (L-aspraginska kiselina, D,L-asparagin, L-glutamin i L-ornitin hidroklorid), trietilamin i tetrabutilamonijev bromid korišteni su od dobavljača Sigma-Aldrich.

Amonijev heptamolibdat i pentan-2,4-dion korišten je od dobavljača Kemika d.o.o.

Vanadijev (V) oksid i salicilaldehid korišteni su od dobavljača Alpha Aesar.

Metanol, etanol, diklormetan i trifluoroetanol korišteni su od dobavljača Merck d.o.o.

#### 3.5.2. Kemijska analiza

Pripravljenim tvarima određen je sadržaj ugljika, vodika i dušika u Centralnom analitičkom servisu instituta Ruđer Bošković. Sadržaj molibdena određen je metodom opisanom u literaturi.

#### 3.5.3. Nuklearna magnetska rezonancijska (NMR) spektroskopija

1D i 2D NMR spektri snimljeni su na Bruker Avance DRX500 i DPX 300 spektrometrima. Kao interni standard korišten je TMS. Koncentracija uzorka u DMSO- $d_6$  iznosila je 20 mg/mL. Rezolucija za  $^1H$  spektre iznosila je 0,1 Hz, dok je za  $^{13}C$  spektre iznosila 0,3 Hz.

#### 3.5.4. Rentgenska strukturna analiza

Difrakcijski podaci za jedinične kristale prikupljeni su na Oxford diffraction Xcalibur 3 CCD difraktometru pri 295 K.

Strukturnu analizu na jediničnim kristalima proveli su red. prof. dr.sc. Dubravka Matković-Čalogović, izv. prof. dr.sc. Biserka Prugovečki, izv. prof. dr.sc. Mirta Rubčić i red. prof. dr. sc. Gordana Pavlović.

#### 3.5.5. FT-IR spektroskopija

Infracrveni spektri homometalnih sustava snimani su na spektrofotometru Perkin Elmer Fourier-Transform Spectrum RX1 u području od 4000  $cm^{-1}$  do 450  $cm^{-1}$  za uzorke izometalnih vrsta i organskih lignada. Uzorci su pripremani tehnikom KBr pastile.

Infracrveni spektri uzoraka dobivenih iz reakcija heterometalnih vrsta snimani su na Nicolet 6700 FT-IR spektrofotometru opremljenom s IR izvorom KBr beamsplitter, DTGS detektorom and Smart Orbit Diamond horizontal ATR kućištem, rezolucijom 4  $cm^{-1}$  u spektralnom području 4000–400  $cm^{-1}$ . Broj snimaka iznosio je 32.

Reakcije s L-asparaginom, L-ornitin hidrokloridom i bez dodatka aminokiseline praćene su infracrvenom spektroskopijom *in-line*, pri čemu je vrijeme reakcije iznosilo 24 sata, dok su spektri snimani svakih 5 minuta. ATR IR spektri snimani su spektrofotometrom BRUKER MATRIX- MF dijamantnom sondom. Kao spektralno područje koje nosi najviše informacija i pogodno za kvalitativnu obradu je  $650\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ . Analizom glavne komponente (eng. *principal component analysis*) utvrđena je odgovarajuća kvaliteta prikupljenih spektara. Za obradu spektara korišteni su softverski alati UnscramblerX ver 12.0 i OPUS 7.2.

#### 3.5.6. Termogravimetrijska analiza

Termogravimetrijska analiza provedena je na instrument Mettler Toledo TGA/SDTA 851<sup>e</sup> uz korištenje aluminijevih posudica. Sva mjerenja su provedena u struji kisika, uz brzinu zagrijavanja  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  u temperaturnom području od 25 do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.5.7. Određivanja udjela molibdena i vanadija

25 mg uzorka se razori uz dodatak 5 mL dušične kiseline i mikrovalno zračenje. U uzorak je po razaranju dodano  $\text{NH}_4\text{OH}$  sve dok nije nastala bistra otopina (oko 3 mL). Otopina uzorka je kvantitativno prebačena u odmjernu tikvicu od 50 mL te je tikvica nadopunjena deioniziranom vodom do oznake. Kako bi se dobio prihvatljiv koncentracijski raspon na instrumentu otopina je dodatno razrijeđena na način da je iz izvorne otopine uzet 1 mL i prebačen u odmjernu tikvicu od 50 mL, dodano je  $100\text{ }\mu\text{L}$  itrija kao internog standard te nadopunjeno 1% v/v  $\text{HNO}_3$ .

Pripremljene su otopine za kalibracijski pravac poznatih koncentracija za elemente molibden i vanadij. Određivanje sadržaja molibdena i vanadija u otopini uzoraka provedeno je atomskom emisijskom spektrometrijom metodom direktne kalibracije s induktivno spregnutom plazmom.

Sadržaj molibdena i vanadija u % izračunava se sljedećom jednadžbom:

$$\frac{c(\mu\text{g} / \text{mL}) \times V_{\text{otopina1}}(\text{mL})}{m(\text{mg})} \times \frac{V_{\text{otopina2}}(\text{mL})}{V_{\text{pipetirano2}}(\text{mL})} \times \frac{1}{10000}$$

pri čemu je

$c(\mu\text{g}/\text{mL})$  = očitana koncentracija

$V_{\text{otopina1}}(\text{mL})$  = volumen otopljenog uzorka po razaranju (50 mL)

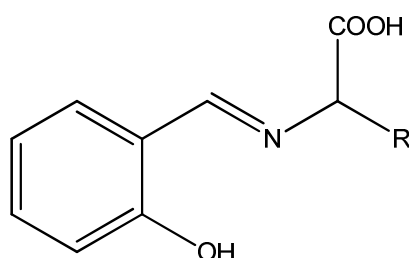
$V_{\text{otopina2}}(\text{mL})$  = završni volumen uzorka (50 mL)

$V_{\text{pipetirano2}}(\text{mL})$  = volumen dodanog uzorka otopine 1 u otopinu 2

Masa analiziranog uzorka iznosila je približno 25 mg.

## § 4. REZULTATI I RASPRAVA

Aminokiseline korištene u istraživanju odabrane su na temelju kiselo-baznih svojstava i duljine bočnog lanca (tablica 22). Upravo o svojstvima bočnog lanca ovisiti će način na koji će se Schiffove baze vezati na ion metala.



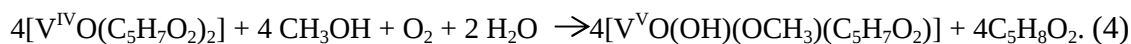
Slika 19. Prikaz strukturne formula liganda, R-bočni aminokiselinski ostatak.

Obzirom da okso vrste molibdena i vanadija kao i miješani polioksometalati ovise i o pH, aminokiselinski ostatak djelovati će i kao korektor pH vrijednosti. U tablici 22 dane su  $pK_a$  vrijednosti karboksilne i amino skupine kao i R skupine bočnog lanca odabranih aminokiselina.

Tablica 22. Prikaz svojstava odabranih aminokiselina.

| Aminokiselina | bočni lanac (R)                                 | broj<br>nefunkcionalizira<br>nih C atoma<br>bočnog lanca | $pK_a(\text{COOH})$ | $pK_a(\text{NH}_2)$ | $pK_a(\text{R})$ |
|---------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| L-aspartat    | $-\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{OH}$       | 1                                                        | 2,09                | 9,82                | 3,86             |
| D,L-asparagin | $-\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NH}_2$     | 1                                                        | 2,02                | 8,80                | -                |
| L-glutamin    | $-(\text{CH}_2)_2\text{C}(\text{O})\text{NH}_2$ | 2                                                        | 2,17                | 9,13                | -                |
| L-ornitin     | $-(\text{CH}_2)_3\text{NH}_2$                   | 3                                                        | 1,71                | 8,69                | 10,76            |

Kao polazni spojevi u reakcijama oksovanadija(IV) korišteni su  $\text{VOSO}_4$  za reakcije u vodenoj otopini, a  $[\text{VO}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_2]$  za reakcije u metanolu kao otapalu. Nužno je napomenuti, da  $[\text{VO}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_2]$  u metanolu podliježe oksidaciji pri čemu su R. Grybos i suradnici<sup>77</sup> ustanovili da je konačni produkt oksidacije spoj  $[\text{VO}(\text{OH})(\text{OCH}_3)(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)]$  čije se nastajanje može prikazati jednadžbom reakcije



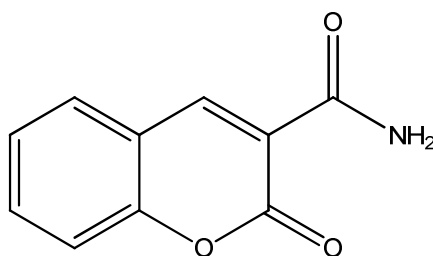
Kao prekursor kompleksa molibdena(VI) korišten je salicilaldehidatni kompleks molibdena(VI)  $[\text{MoO}_2(\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_2)_2]$ .

Reakcije molibdovanadata izvođene su u metanolu s  $[\text{VO}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2)_2]$  i  $[\text{MoO}_2(\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_2)_2]$  kao ishodnim supstancijama uz dodatak salicilaldehida i tetrabutilamonijevog bromida, te odgovarajuće aminokiseline i trietilamina. Tetrabutilamonijev bromid dodan je u reakcije molibdovanadata u svrhu pospješivanja kristalizacije iz sustava zbog njegove konformacijske fleksibilnosti.

## 4.1. Reakcije nastajanja izopolioksometalata

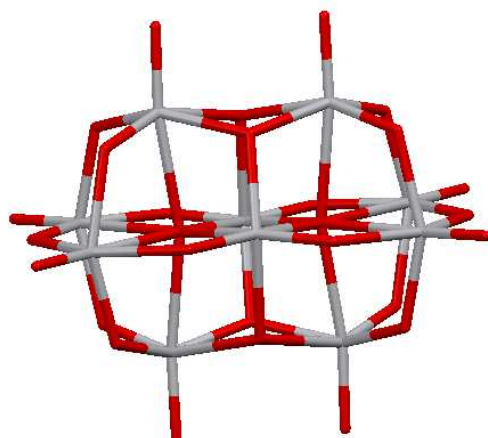
### 4.1.1. Reakcije s *D,L*-asparaginom

I molibden i vanadij pokazali su katalitičku aktivnost u reakcijama s polaznim *D,L*-asparaginom pri čemu je u oba slučaja nastao kumarin-3-karboksamid kao jedan od produkata reakcije (slika 20).



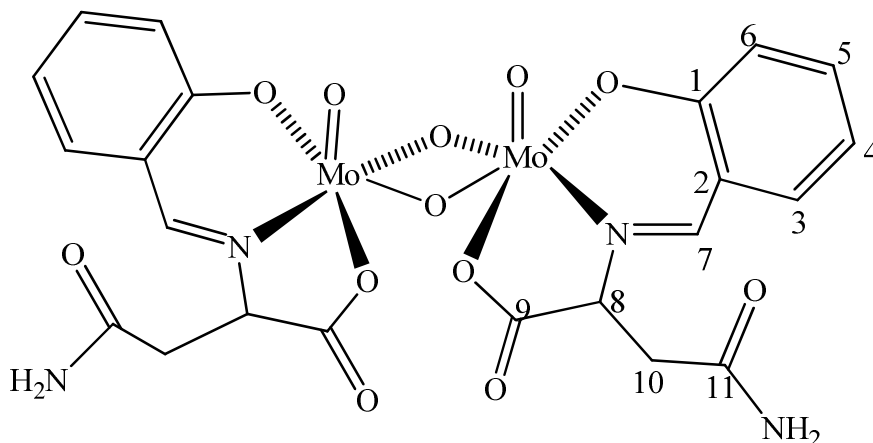
Slika 20. Strukturna formula kumarin-3-karboksamida

U reakciji s vanadil sulfatom izoliran je produkt kojem je riješena kristalna struktura difrakcijom rentgenskih zraka na monokristalnom uzorku, molekulske formule  $4(\text{H}_3\text{O}^+)[\{\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_4\}_2(\mu\text{-H}_2\text{O})_2\}\{\text{V}_9^{\text{V}}(\text{V}^{\text{IV}})\text{O}_{28}\}]$  (slika 21). EPR spektar u skladu je s literaturnim podacima. U infracrvenom spektru opažene su vrpce pri 989, 639 i  $616\text{ cm}^{-1}$  koje su također u skladu s literaturnim podacima i odgovaraju vibracijama istezanja  $\text{V}=\text{O}_t$ ,  $\text{V}-\text{O}_b-\text{V}$  i  $\text{V}-\text{O}_c-\text{V}$  veza. Potpuno oksidirani oblik dekavanadatnog aniona opisan je u literaturi.<sup>78</sup>



Slika 21. Strukturni prikaz dekavanadata  $[V^V_9V^{IV}O_{28}]^{7-}$ . Vanadij je prikazan sivom, a kisik crvenom bojom.

Kada je kao ishodna supstancija korišten  $[MoO_2(sal)_2]$  u metanolu kao otapalu, uz kumarin-3-karboksamid bilo je moguće izolirati i dinuklearni kompleks molibdena(VI)  $[Mo_2O_4(L3)_2]$  čija je pretpostavljena strukturna formula prikazan na slici 22, a čiji je sastav potvrđen  $^{13}C$  i  $^1H$  NMR spektroskopijom (tablica 23).



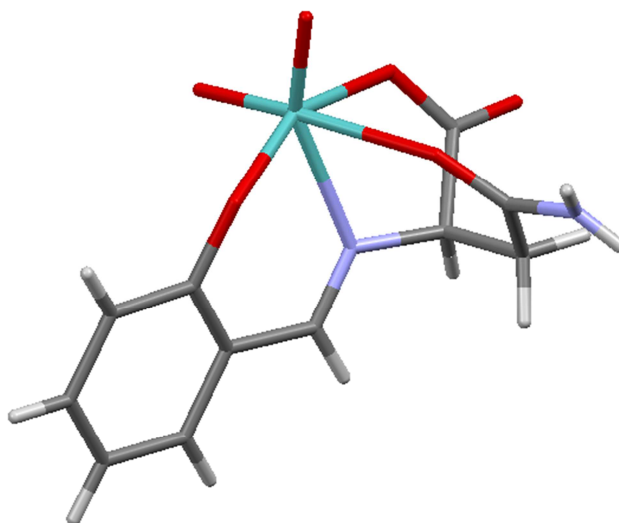
Slika 22. Strukturna formula  $[Mo_2O_4(L3)_2]$ . Atomi ugljika su označeni brojem i odgovaraju oznakama u NMR spektrima.

Tablica 23. Kemijski pomaci u  $^1\text{H}$  i  $^{13}\text{C}$  NMR spektrima za ligand L3 ( $\delta$  /ppm)

| Atom            | $^1\text{H}$ | $^{13}\text{C}$ |
|-----------------|--------------|-----------------|
| 1               | -            | 159,74          |
| 2               | -            | 121,53          |
| 3               | 7,67         | 134,79          |
| 4               | 7,11         | 121,34          |
| 5               | 7,61         | 135,99          |
| 6               | 6,99         | 118,55          |
| 7               | 8,76         | 164,89          |
| 8               | 4,92         | 65,91           |
| 9               | -            | 174,67          |
| 10              | 2,93         | 39,21           |
| 11              | -            | 170,79          |
| NH <sub>2</sub> | 7,34; 7,31   | -               |

U infracrvenom spektru kompleksa  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\text{L3})_2]$  opažaju se dvije oštre vrpce karakteristične za simetrično i asimetrično istezanje  $\text{Mo}=\text{O}_t$  veze pri 944 i 908  $\text{cm}^{-1}$  te oštra vrpca pri 761  $\text{cm}^{-1}$  koja upućuje na prisutnost premošćujućeg kisikova atoma ( $\text{Mo}-\text{O}_b$ ). Takva spektralna kombinacija vrpce karakteristična je za  $[\text{Mo}_2\text{O}_4]^{2+}$  jezgru. Vrpca opažena na 1667  $\text{cm}^{-1}$  odgovara istezanju imino skupine ( $-\text{C}=\text{N}-$ ) te se istovremeno primjećuje izostanak asimetričnog N–H istezanja karakterističnog za slobodnu amino- skupinu bočnog lanca asparagina pri 3067  $\text{cm}^{-1}$ . Pomaci  $^1\text{H}$  i  $^{13}\text{C}$  NMR spektara također su potvrdili nastajanje *N*-saliciliden-*D,L*-asparaginatnog liganda. Dinuklearni kompleks molibdena  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\text{L3})_2]$  zrcalne je simetrije u kojem svaki ligand L3 koordinira atom molibdena tridentatno, preko iminskog dušika, kisika karboksilne skupine aminokiselinskog dijela i oksid kisika iz salicilaldehidnog prekursora. Uočena zrcalna simetrija može se pripisati činjenici da je u pripravi kompleksa korišten racemat asparagina pri čemu je stereocentar aminokiselinskog dijela zadržao konfiguraciju. Termogravimetrijska analiza pokazuje da do gubitka mase od 60,56 % dolazi u jednom koraku, u temperaturnom rasponu 200–600 °C, a što ujedino potvrđuje izostanak otapala bilo koordiniranog ili solvativirajućeg. Gubitak mase odgovara gubitku dvije molekule liganda pri čemu zaostaje  $\text{MoO}_3$  kao ostatak.

U reakciji s  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i u diklormetanu kao otapalu izoliran je samo mononuklearni oktaedarski kompleks, molekulske formule  $[\text{MoO}_2(\text{R-L3})]$  u kojem je ligand vezan tetradentatno na molibden (slika 24).

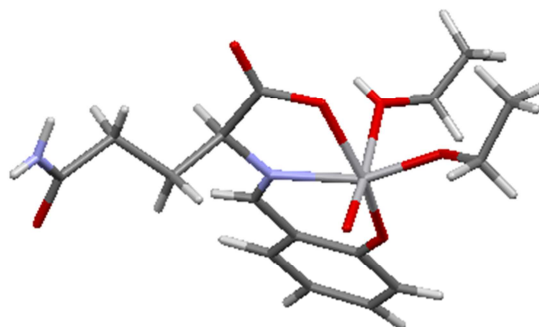


Slika 24. Prikaz molekulske strukture kompleksa  $[\text{MoO}_2(\text{R-L3})]$ , pri čemu je ion molibdena označen svijetloplavom, kisik crvenom, dušik plavom, ugljik sivom, a vodik bijelom bojom.

Vrpce opažene u infracrvenom spektru na  $944$  i  $928\text{ cm}^{-1}$  koje se pripisuju asimetričnom i simetričnom istezanju  $\text{Mo}=\text{O}_t$  veze te izostanak vrpce u području oko  $800\text{ cm}^{-1}$  karakteristične za vibracije  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  veze potvrđuju prisutnost  $\text{cis-}[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgre. Nastanak Schiffove baze potvrđen je prisutnošću vrpce karakteristične za vibracije  $-\text{C}=\text{N}-$  veze pri  $1665\text{ cm}^{-1}$ .

#### 4.1.2. Reakcija s *L*-glutaminom

U reakciji vanadil sulfata i *L*-glutamina nastao je monokristalni produkt kojemu je bilo moguće odrediti molekulsku i kristalnu strukturu  $[\text{VO}(\text{L4})(\text{OC}_2\text{H}_5)(\text{HOC}_2\text{H}_5)]$  (slika 25). Termogravimetrijska analiza je pokazala da dolazi do gubitka mase od  $78,6\%$  u temperaturnom rasponu  $50\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ . Gubitak mase je konstantan, ali uočene promjene u krivulji gubitka mase upućuje da je riječ o tri koraka koji se preklapaju u temperaturnim intervalima. Prvi potencijalni korak počinje pri  $50\text{ }^\circ\text{C}$  te završava oko  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , drugi korak završava u interval između  $150$  i  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , a treći korak kojem pripada najveći gubitak mase završava oko  $500\text{ }^\circ\text{C}$ . Prvi gubitak mase može se pripisati gubitku koordiniranog etanola, drugi gubitak mase pripada izlaženju etoksidnog aniona, a treći gubitak mase termičkom raspadu iminskog dijela kompleksa.



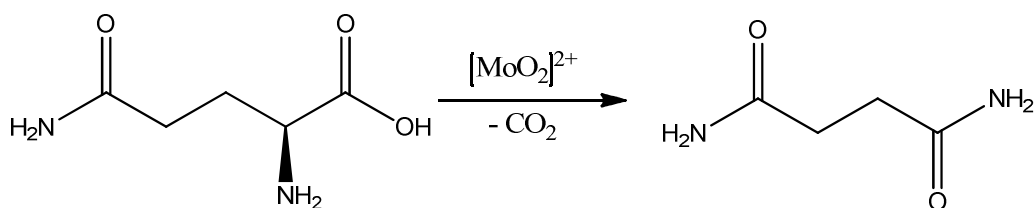
Slika 25. Prikaz strukturne formule  $[\text{VO}(\text{L4})(\text{OC}_2\text{H}_5)(\text{HOC}_2\text{H}_5)]$  štapićima. Vanadijev ion prikazan je svijetlosivom bojom, dok su atomi kisika, dušika, ugljika i vodika prikazani crvenom, svijetloplavom, sivom odnosno bijelom bojom.

U infracrvenom spektru opažena je vrpca koja je u skladu s literaturnim podacima i odgovara istezanju  $\text{V}=\text{O}_t$  pri  $976\text{ cm}^{-1}$ . Vrpca pri  $1642\text{ cm}^{-1}$  pripisuje se istezanju nastale imino ( $-\text{C}=\text{N}-$ ) skupine u ligandu L4, dok vrpca na  $3389\text{ cm}^{-1}$ , karakteristična za  $\text{O}-\text{H}$  istezanje, potječe iz koordiniranog etanola.<sup>79</sup>

Da je etanol koordiniran na atom metala potvrđuje i početak gubitka mase tijekom termičke analize pri zagrijavanju na  $50\text{ °C}$ , dok je za solvate karakterističan gubitak mase već na sobnoj temperaturi. Vrpca pri  $1290\text{ cm}^{-1}$  odgovara  $\text{C}-\text{O}$  istezanju etanola i etoksi liganda.

Ligand (*S*)-(*E*)-5-amino-2-((2-oksido benziliden)amino)-5-oksopentanoat, sa zadržanim stereocentrom polazne aminokiseline u *E*-konformaciji u odnosu na iminsku vezu, je koordiniran tridentatno preko dušika nastale imino skupine, kisika karboksilne skupine i kisika salicilaldehidnog prstena. Etoksidni anion koordiniran na vanadij zauzima mjesto u ravnini dok je etanol koordinira ion vanadija aksijalno.

U reakciji  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i L-glutamina izoliran je, uz gotovo kvantitativno iskorištenje, sukcinamid, čije je nastajanje prikazano na slici 26. Reakcijom oksidativne dekarboksilacije dolazi do nastanka sukcinamida uz oslobađanje  $\text{CO}_2$ . Molibdenski ostatak iz reakcijske smjese nije bilo moguće identificirati budući da se najvjerojatnije radi o produktu raspada.



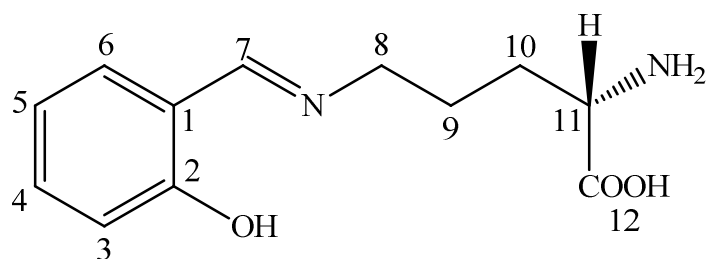
Slika 26. Prikaz oksidativne dekarboksilacije L-glutamina

Oksidativnom dekarboksilacijom nastaje simetrična molekula sukcinamid. U infracrvenom spektru opažaju se vrpce karakteristične za C–H ravnolančana istezanja veza pri  $2935\text{ cm}^{-1}$  te vrpce značajne za vibracije C(=O)NH<sub>2</sub> veza pri  $3170$  i  $3334\text{ cm}^{-1}$  koje su u skladu sa literaturnim podacima i vrpcama amidne skupine bočnog lanca L-glutamina. Izostanak vrpce značajnih za vibracije –COOH skupine pri  $1500\text{ cm}^{-1}$ , potvrđuju gubitak iste.

#### 4.1.3. Reakcije s L-ornitin hidrokloridom

Reakcijom salicilaldehida i L-ornitin hidroklorida nastaje Schiffova baza

(S)-2-amino-5-((2-hidroksibenziliden)amino)pentanska kiselina (slika 27), čija molekulska formula je potvrđena <sup>13</sup>C i <sup>1</sup>H NMR spektroskopijom (tablica 24). Dolazi do nastajanja imina reakcijom amino skupine bočnog lanca L-ornitina i salicilaldehida.



Slika 27. Strukturna formula monoiminskog liganda

(S)-2-amino-5-((2-hidroksibenziliden)amino)pentanske kiseline (5-*N*-saliciliden-L-ornitina, L5).

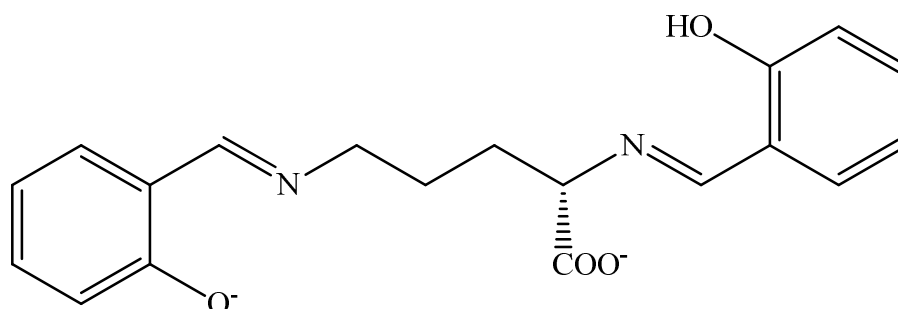
Tablica 24. Kemijski pomaci u  $^1\text{H}$  i  $^{13}\text{C}$  NMR spektrima za ligand L5 ( $\delta$  /ppm)

| Atom | $^1\text{H}$ | $^{13}\text{C}$             |
|------|--------------|-----------------------------|
| 1    | -            | 118,50                      |
| 2    | -            | 160,75                      |
| 3    | 6,86         | 116,40                      |
| 4    | 7,31         | 132,12                      |
| 5    | 6,88         | 118,29                      |
| 6    | 7,42         | 131,47                      |
| 7    | 8,55         | 160,75                      |
| 8    | 3,58         | 57,97                       |
| 9    | 1,76–1,66    | 28,67                       |
| 10   | 1,76–1,66    | 26,65                       |
| 11   | 3,14         | 53,88                       |
| 12   | -            | nije bilo moguće asignirati |

U infracrvenom spektru primjećuje se promjena u području N–H simetrične i asimetrične vibracije amino skupine bočnog lanca na  $3092\text{ cm}^{-1}$ , odnosno izostanak iste. Vrpce u spektralnom području  $2600\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$  su preklapajuće i široke, pretpostavljeno zbog vodikovih veza O–H vibracija skupine salicilaldehidnog prstena sa zwitterionskim dijelom molekule. Nastanak iminske veze potvrđuje i prisutnost  $\text{--C=N--}$  istezanja pri  $1604\text{ cm}^{-1}$ .

U reakciji vanadilsulfata, L-ornitin hidroklorida i salicilaldehida u molnom omjeru 1:1:2 nastao produkt koji je bio nestabilan pa je bilo moguće snimiti jedino infracrveni spektar u kojem je prisutna vrpca pri  $963\text{ cm}^{-1}$  karakteristična za  $\text{V=O}_t$  istezanje te vibracija iminske grupe pri  $1624\text{ cm}^{-1}$ . Na temelju dobivenih podataka nije bilo moguće identificirati izolirani produkt.

Iz reakcije vanadil sulfata, L-ornitina i salicilaldehida u molnom omjeru 1:1:1, te reakcijom  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  s ligandom L5, dobiveni su kompleksni spojevi za koje je pretpostavljena molekulska formula  $[\text{VO}(\text{OR})(\text{sal}_2\text{L5})]$ , gdje je OR metoksi odnosno etoksi skupina. Na slici 28 prikazana je strukturna formula liganda (S)-2-((2-hidroksibenziliden)amino)-5-((2-oksido benzilidene)amino)pentanoata ( $\text{sal}_2\text{L5}$ ).

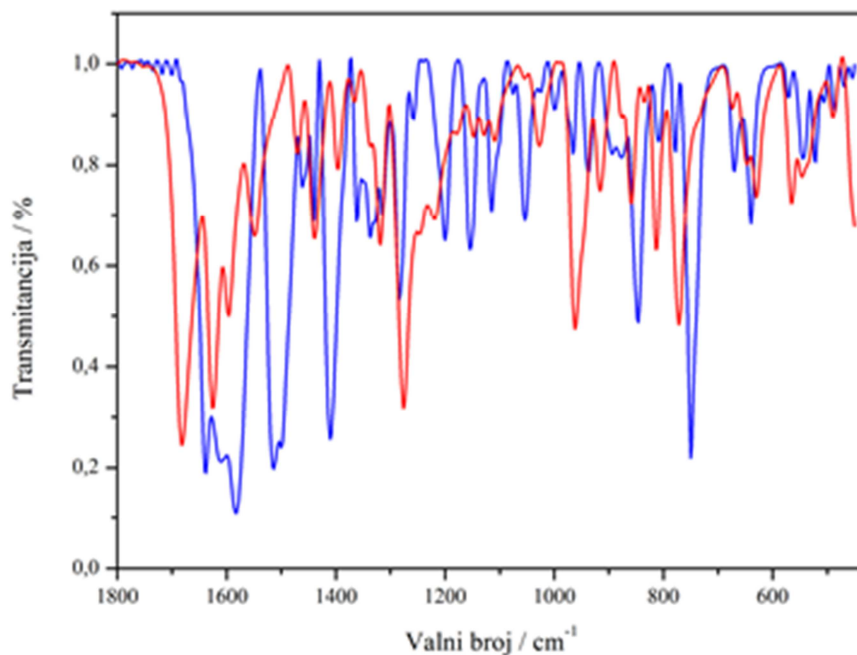


Slika 28. Predložena strukturna formula

(S)-2-((2-hidroksibenziliden)amino)-5-((2-oksido-1,3-benzodioxol-5-yl)methylidene)amino)pentanoata (sal<sub>2</sub>L5).

U infracrvenom spektru opaža se istezanje veze V=O<sub>t</sub> pri 962 cm<sup>-1</sup>. Vrpce pri 1036 cm<sup>-1</sup> i 1276 cm<sup>-1</sup> odgovaraju vibraciji veze –C–O metoksi odnosno etoksi skupine koordinirane na atom vanadija. Opažena je odsutnost vrpca pri 1500 cm<sup>-1</sup> i 850 cm<sup>-1</sup> koje odgovaraju savijanju veze N–H–N, odnosno njihovu vezi NH<sub>2</sub> koje su prisutne kod monoiminskog liganda (L5). Izostanaki navedenih vrpca potvrđuje da je došlo do stvaranja iminske veze s α-amino skupinom ornitina. Usporede li se infracrveni spektri kompleksa MoO<sub>2</sub>L5<sub>cikl</sub> i [VO(OCH<sub>3</sub>)(sal<sub>2</sub>L5)], primjećuje se značajna razlika u vrpcama koje potječu od piperazinskog prstena (slika 29). Iz navedenih podataka može se zaključiti da u sustavu u kojem je prisutan vanadij dolazi do stvaranja diimina, ali ne i ciklizacije te nastajanja piperidinskog prstena.

Rezultati termogravimetrijske analize pokazuju gubitak mase u temperaturnom intervalu od 50–520 °C, pri čemu dolazi do promjene nagiba krivulje. Prvi potencijalni skok pripisuje se gubitku alkoksi skupine koordinirane na atom vanadija, dok drugi gubitak mase odgovara termičkom raspadu organskog liganda. Produkt termičkog raspada kompleksa je narančasti V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

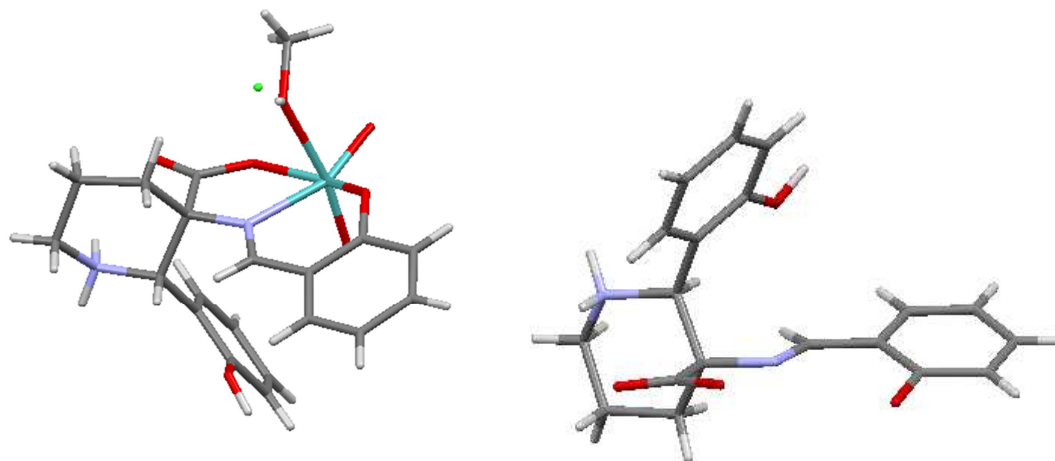


Slika 29. Usporedba IR spektara pripravljenog liganda (L5) i  $[\text{VO}(\text{OCH}_3)(\text{sal}_2\text{L5})]$

Reakcijom  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i L-ornitina nastao je monokristalan produkt  $[\text{MoO}_2(\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_2\text{O}_5)(\text{CH}_3\text{OH})]\text{Cl}\cdot\text{CH}_3\text{OH}$  kojem je bilo moguće odrediti molekulska i kristalnu strukturu (slika 30). Izolirani kompleks molibdena oktaedarske je geometrije u kojem ligand koordinira ion molibdena tridentatno dušikovim atomom imino skupine, kisikovim atomom karboksilne skupine te kisikovim atomom jedne salicilaldehidatne podjedinice. Ligand vezan na atom molibdena sadrži dvije salicilne podjedinice i piperidinski prsten uz zadržane funkcionalne skupine aminokiseline, odnosno, dolazi do formiranja diimina iz dvije molekule salicilaldehida i jedne molekule ornitina, te ciklizacije u piperidinski prsten.

U infracrvenom spektru izoliranog kompleksa  $[\text{MoO}_2(\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_2\text{O}_5)(\text{CH}_3\text{OH})]\text{Cl}$  prisutna je vrpca N–H istezanja pri  $3172\text{ cm}^{-1}$  a pripisuje se N–H istezanju piperidinskog prstena. Pri  $1664\text{ cm}^{-1}$  prisutna je oštra vrpca koja je pripisana vibraciji  $\text{C}=\text{N}$ -veze. Vrpce karakteristične za asimetričnu i simetričnu vibraciju istezanja veza  $\text{cis-}[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgre opažene su pri  $909$  i  $934\text{ cm}^{-1}$ , dok su vrpce na  $2938$  i  $3028\text{ cm}^{-1}$  pripisane vibracijama C–H veza piperidinskog prstena. Široka vrpca u području od  $3000$  do  $3500\text{ cm}^{-1}$  može se pripisati

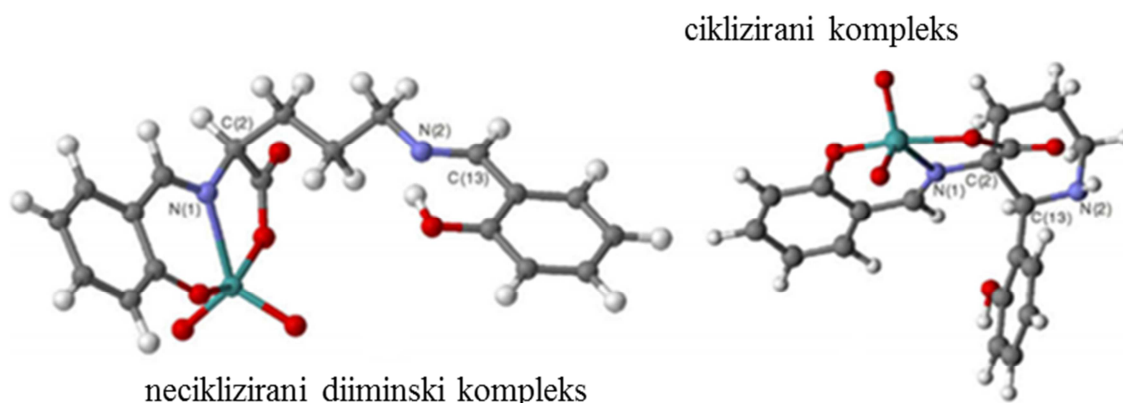
vibraciji istezanja O–H veze protoniranog salicilnog prstena zbog prisutnih vodikovih veza u molekuli.<sup>80</sup>



Slika 30. Prikaz molekulске strukture a)  $[\text{MoO}_2(\text{L5}_{\text{cikl}})(\text{CH}_3\text{OH})]\text{Cl}$  i b) liganda (S)-2-(2-hidroksifenil)-3-((E)-(2-oksido benziliden)amino)piperidin-3-karboksilata ( $\text{L5}_{\text{cikl}}$ ) štapićima. Ion molibdena prikazan je zelenom, atomi kisika crvenom, ugljika sivom a vodika bijelom bojom.

U nastalom ligandu ostaje zadržana enantiomernost  $\alpha$ -ugljika, koji potječe iz aminokiseline, dok je molekula uslijed nastale imino skupine u *E*-konformaciji, pretpostavljeno zbog smanjenja repulzija salicilnog i piperidinskog ostatka s *O,N,O* donornim atomima liganda, (S)-2-(2-hidroksifenil)-3-((E)-(2-oksido benziliden)amino)piperidin-3-karboksilata.

U reakcijama s asparaginom i glutaminom, nedvojbeno je potvrđen nastanak Schiffove baze iz  $\alpha$ -amino skupine, pa je predložen mehanizam reakcije u kojoj prvotno dolazi do nastanka diiminskog spoja iz dvije molekule salicilaldehida i jedne molekule ornitin hidroklorida, a potom do zatvaranja piperidinskog prstena Mannichovom reakcijom koja je literaturno opisana.<sup>81</sup> Kako bi se objasnila uloga molibdena u zatvaranju piperidinskog prstena, autori su proveli komputacijske studije, pri čemu je utvrđeno da je kompleks koji sadrži neciklizirani diiminski ligand za svega  $2,8 \text{ kcal mol}^{-1}$  manje stabilan od kompleksa u kojem je koordiniran ligand  $\text{L5}_{\text{cikl}}$  na diksomolibdensku jezgru. Na slici 31 prikazane su strukturne formule kompleksa s diiminskim ligandom te izostrukturnog kompleksa s (S)-2-(2-hidroksifenil)-3-((E)-(2-oksido benziliden)amino)piperidin-3-karboksilata ( $\text{L5}_{\text{cikl}}$ ) kao ligandom.



Slika 31. Strukturne formule necikliziranog diiminskog kompleksa [MoO<sub>2</sub>sal<sub>2</sub>L<sub>5</sub>] i kompleksa s ligandom u kojem je zatvoren piperidinski prsten [MoO<sub>2</sub>L<sub>5</sub>cikl] korištene u izračunima.<sup>81</sup>

Zbog steričkih repulzija prisutnih u [MoO<sub>2</sub>(L<sub>5</sub>cikl)(CH<sub>3</sub>OH)]<sup>+</sup>, a koje su posljedica postojanja velikih substituenata na susjednim položajima šesteročlanog prstena, očekivana je veća razlika u energiji. Zamjeni li se, pak, [MoO<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> jezgra –CH<sub>2</sub> skupinom, energetska razlika se povećava na 6,7 kcal mol<sup>-1</sup>.

Osnovne pretpostavke o mehanizmu uključuju aktivaciju C(2) kao nukleofila, što je moguće postići ili pomoću uklanjanja vezanog H atoma bazom (pri čemu dolazi do nastajanja karbaniona) ili putem keto-enol tautomerije. Razlika energije između keto-i enolnog oblika u necikliziranom diiminu iznosi 16,3 kcal mol<sup>-1</sup> u korist keto oblika, što je značajno niže nego u slučaju u kojem je dioksomolibdenska jezgra zamijenjena –CH<sub>2</sub> skupinom, gdje je razlika jednaka 26,4 kcal mol<sup>-1</sup>. Geometrija liganda oko [MoO<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> jezgre pridonosi učinkovitoj delokalizaciji naboja putem rezonancijskih učinaka sve do C(3) atoma.

Alternativni put aktivacije C(2) atoma preko H prijenosa na susjedni imin N(1) atom manje je vjerojatan. U tom slučaju, nakon protoniranja, N(1) brzo izlazi iz koordinacijske sfere molibdena, koja iskrivljuje prsten koji sadrži [MoO<sub>2</sub>]<sup>2+</sup> jezgru i destabilizira strukturu za nekoliko desetaka kcal mol<sup>-1</sup>. Slično tome, N(2) atom Schiffove baze je preslab da izravno deprotonira C(2) atom. Također, da bi došlo do ciklizacije, mora doći do prijenosa protona s atoma kisika O(6) na atom dušika N(2), pri čemu dolazi do povećanja elektrofilnosti susjednog C(13) atoma, čineći ga mnogo skloniji napadu nukleofilnog C(2) atoma, koji

završava ciklizaciju. Prilaz C(2) i C(13) reakcijskih centara olakšan je zbog strukturne mobilnosti alifatskog  $-(CH_2)_3$  lanca. Posljedično dolazi do nastajanja zwitterionske vrste koja sadrži pozitivno nabijen amonijev i negativno nabijen fenolni prsten. Dodatni izračuni potvrđuju ovaj zwitterionski oblik kao nestabilan, s time da se proton vraća od N(2) na O(6) atom. Nastajanje enolnog oblika (nukleofilna aktivacija C(2) atoma) praćena prijenosom vodika sa O(6) na N(2) su najvjerojatniji koraci inicijacije u eksperimentalnim uvjetima uz  $CH_3OH$  kao otapalo. Kao najveća barijera identificirana je keto-enolna tautomerija, te je stoga i najvjerojatniji korak koji određuje brzinu ciklizacije (reakcije).

#### 4.1.4. Usporedba katalitičke uloge vanadija(IV) i molibdena(VI) u reakcijama oksidativne dekarboksilacije

Iz literature je poznato da prilikom pripreme kompleksa  $[\text{VO}(\text{L3})(\text{py})(\text{H}_2\text{O})]$ , iz matičnice stajanjem nastaje kumarin-3-karboksamid. Autori I. Cavaco i J. Costa-Pessoa, su predložili mehanizam oksidativne dekarboksilacije asparagina.<sup>82</sup>

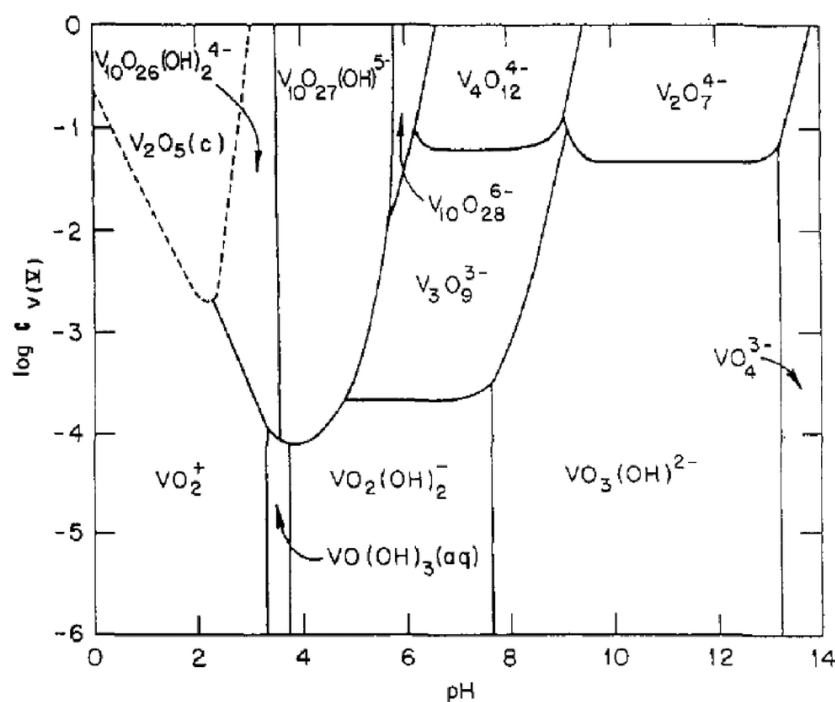
U svrhu potvrde mehanizma i katalitičke, odnosno oksidacijske, uloge vanadija napravljeni su eksperimenti u kojima je i) vanadij dodan u katalitičkoj količini, ii) reakcija vođena bez prisustva kisika uz propuhivanje argonom te iii) uz prisustvo peroksida i vanadija u katalitičkoj količini. U eksperimentima u kojima je korištena katalitička količina vanadija (oko 5 %), iskorištenje reakcije bilo je 24 %, s obzirom na kumarin-3-karboksamid, ali je bilo potrebno u otopinu uvoditi zrak, dok je u prisustvu vanadija u ekvimolarnoj količini uz dodatak peroksida iskorištenje bilo 37 %. Kumarin-3-karboksamid nije izoliran iz reakcijske smjese koja je provedena u inertnoj atmosferi.

Usporede li se ti rezultati s rezultatima opisanim u literaturnom izvoru, te s rezultatima dobivenim iz reakcije vanadil sulfata s L-glutaminom, u kojoj nastaje oktaedarski kordiniran kompleks vanadija sa Schiffovom bazom izvedenom iz salicilaldehida i aminokiseline, može se pretpostaviti sljedeće: u prvom koraku dolazi do nastanka analognog kompleksa s asparaginom, ali peto i šesto koordinacijsko mjesto zauzima molekula kisika, odnosno peroksida i nastaje  $[\text{VO}(\text{O}_2)(\text{L3})]$  kao intermedijar, nakon toga dolazi do oksidativne dekarboksilacije na aminokiselinskom ostatku i obnove  $[\text{VO}]^{2+}$  jezgre. Ciklizacija kumarinskog prstena vjerojatnija je uz oksidativnu dekarboksilaciju, a ne iz diamida i salicilaldehida u otopini kako su predložili Cavaco i Costa-Pessoa.<sup>83</sup>

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da vanadij ima ulogu katalizatora, a ne oksidansa, te da dolazi do obnove  $[\text{VO}]^{2+}$  jezgre.

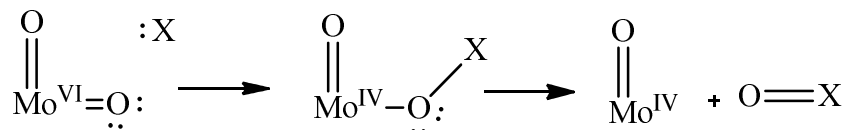
Nastajanje dekavanadata može se objasniti promjenom pH sustava, obzirom da nastajanjem kumarin-3-karboksamida dolazi do nastajanja amonijevog karbonata (produkta oksidativne dekarboksilacije i deaminacije). Istraživanjem nije ni potvrđena ni opovrgnuta katalitička aktivnost dekavanadata. U reakcijama koje su provedene s vanadil sulfatom u katalitičkoj količini, nastajanje dekavanadata nije primjećeno. U prilog činjenici da je nastajanje dekavanadata ovisno o pH otopine ide i prikaz raspodjele oksovrsta vanadija u ovisnosti o pH i koncentraciji (slika 32). Prema literaturnim podacima, u uvjetim reakcije, preferirana je mononuklearna vrsta, a raspodjela okso vrsta vanadija u ovisnosti o pH i

logaritmu koncentracije očekivano je nešto drugačija za sustav etanol : voda 1:1 u odnosu na vodenu otopinu.



Slika 32. Raspodjela okso vrsta vanadija u vodenoj otopini u ovisnosti o pH i molarnoj koncentraciji.<sup>84</sup>

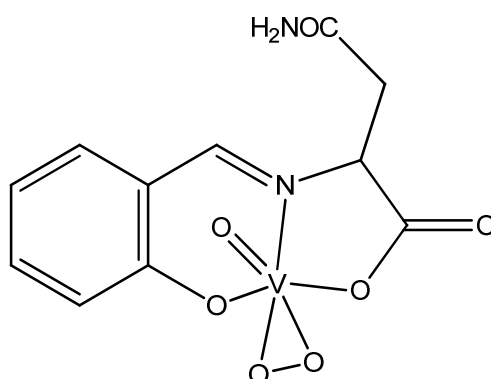
Usporedivši katalitičku aktivnost molibdena i vanadija u sustavu s asparaginom, moguće je zaključiti da oba metalna centra posjeduju usporedivu katalitičku ulogu u oksidativnoj dekarboksilaciji asparagina.<sup>85</sup> Međutim, sam mehanizam i uvjeti katalize na  $[MoO_2]^{2+}$  jezgri su drugačijeg tipa. Naime, sve reakcije priprave kompleksa molibdena(VI) bile su provedene u suhim uvjetima i u inertoj atmosferi. Poznate su i dobro opisane reakcije prijenosa kisika u enzimima koji sadrže  $[MoO_2]^{2+}$  jezgru (slika 33) pri čemu dolazi do formiranja  $\sigma$ -veze između supstrata i kisika dioksomolibdenske jezgre, a potom i do transfera  $\pi$ - elektrona  $Mo=O$  veze na metalni centar i posljedično redukcije  $Mo(VI)$  u  $Mo(IV)$ , što u konačnici dovodi do slabljenja  $Mo-O$  veze i njena pucanja<sup>86-88</sup>

Slika 33. Shematski prikaz reakcija prijenosa kisika na  $[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgri.

Činjenica da iz reakcije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  u diklormetanu nije izoliran kumarin-3-karboksamid, te da je izoliran mononuklearni kompleks dioksomolibdena(VI) koordiniran tetradentatno sa *N*-saliciliden-D,L-asparaginatom, dok je iz metanola izoliran dinuklearni kompleks oksomolibdena (VI) koordiniran tridentatno s navedenim ligandom, upućuje na mogućnost prijenosa atoma kisika s dioksomolibdenske vrste i posljedičnu stabilizaciju u dinuklearnu  $[\text{Mo}_2\text{O}_4]^{2+}$  jezgru.

S druge strane, nastajanje zrcalno simetričnog dinuklearnog kompleksa u reakciji provedenoj u metanolu pri čemu ostaje zadržan stereocentar liganda, dok u reakciji provedenoj u diklormetanu dolazi do inverzije *S*-enantiomorfa, upućuje na stereoselektivnost  $[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgre u ovisnosti o otapalu, što otvara nove mogućnosti uporabe  $[\text{MoO}_2]^{2+}$  jezgre u reakcijama stereoselektivne sinteze i katalize.

Uzevši u obzir i produkte reakcija vanadija i molibdena s L-glutaminom, kada se radi o sustavu s vanadijem do ciklizacije i nastajanja kumarinskog derivata dolazi uz nastajanje perokso kompleksa vanadija kao intermedijera, a čija je strukturna formula prikazana na slici 34.

Slika 34. Prikaz predložene molekulske formule intermedijarnog kompleksa  $[\text{VO}(\text{O}_2)(\text{L3})]$ .

Nastajanje sukcinamida u reakciji s glutaminom potvrđuje da prvo dolazi do oksidativne dekarboksilacije aminokiseline na  $[\text{MoO}_2]^{2+}$ , a potom, ili istovremeno, do ciklizacije u kumarinski derivat u slučaju L-asparagina.

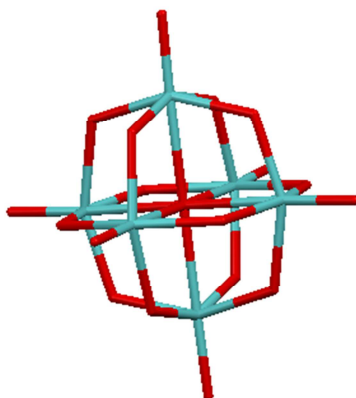
## 4.2. Reakcije molibdovanadata

### 4.2.1. Reakcije s *L*-asparaginskom kiselinom

Iz smjese produkata reakcije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  s *L*-aspartatom uz tetrabutilamonijev bromid i trietilamin u reakcijskom omjeru 5:1:10:25, izdvojen je monokristal kojem je bilo moguće odrediti kristalnu i molekulsku strukturu. Ustanovljeno je da se radi o reduciranom polioksomolibdatu  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ .

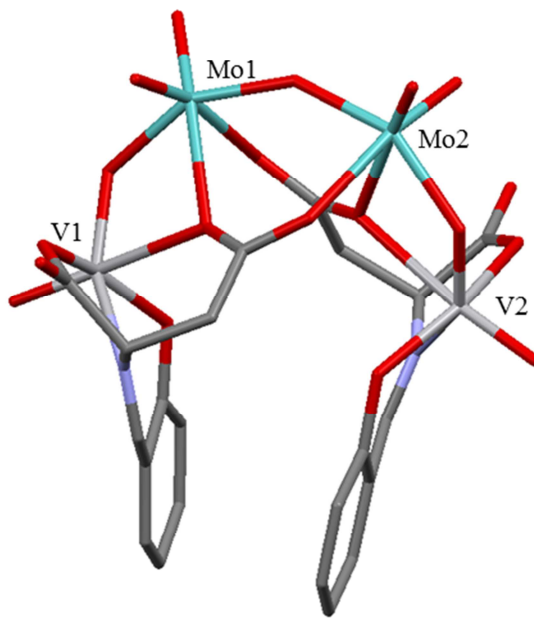
Tijekom termičke razgradnje u temperaturnom interval od 220– 420 °C dolazi do 38 %-tnog gubitka mase što odgovara raspadu tetrabutilamonijevog kationa.

Produktu je snimljen IR spektar, u kojem su vidljive oštre vrpce jakog intenziteta pri 956 i  $800\text{ cm}^{-1}$  što odgovara istezanju veza  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  i  $\text{Mo}=\text{O}_t$ , i u skladu je s literaturnim podacima. Pri  $746\text{ cm}^{-1}$  prisutna je vrpca slabog intenziteta kao izraženo rame vrpce na  $800\text{ cm}^{-1}$  što upućuje na istezanje veze  $\text{Mo}-\text{O}_c$  (kisikov atom koordiniran s 6 atom molibdena) i karakteristična je za Lindquistov tip aniona,  $[\text{Mo}_6\text{O}_{19}]^{n-}$ . Vrpce srednjeg intenziteta pri 2875, 2935 i  $2965\text{ cm}^{-1}$  (ravnolančana istezanja  $\text{C}-\text{H}$  veza) karakteristične su za tetrabutilamonijev kation.



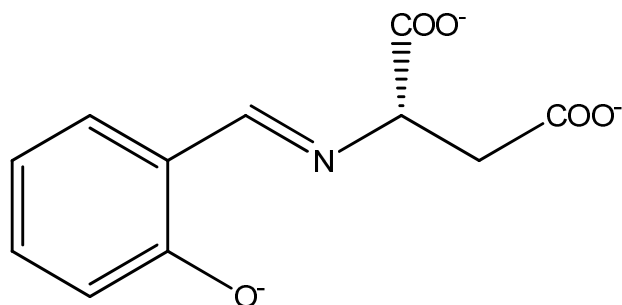
Slika 35. Prikaz molekulske strukture  $[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{3-}$  aniona Lindquist tipa. Molibdenovi ioni prikazani su svijetloplavom, a atomi kisika crvenom bojom.

Nakon izolacije  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$  iz matičnice je izoliran  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}_2)_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$  kojem je također bilo moguće odrediti kristalnu i molekulsku strukturu (slika 36).



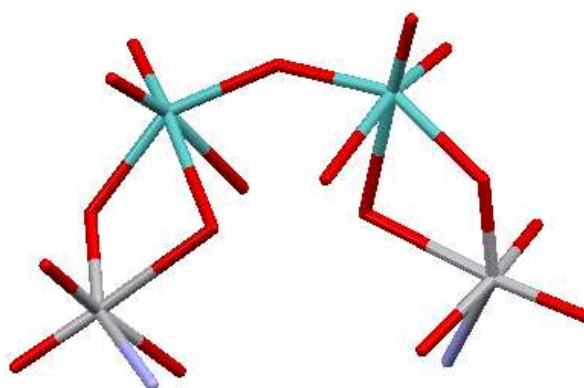
Slika 36. Prikaz molekulske strukture  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}_2)_2]^{2-}$  aniona. Ioni molibdena prikazani su zelenom, ioni vanadija svijetlosivom, atomi kisika crvenom, dušika plavom i ugljika sivom bojom.

Kompleksni anion  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}_2)_2]^{2-}$  sastoji se od četiri atoma metala, oktaedarske koordinacije, od kojih je središnja dinuklearna  $[\text{Mo}_2\text{O}_7]^{2+}$  vrsta, dok su  $[\text{VO}]^{3+}$  jezgre povezane jednim premošćujućim kisikom na atom molibdena. Ligand koordinira atom vanadija tetradentatno, kisikovim atomom karboksilne skupine aminokiselinskog ostatka aksijalno, kisikovim atomom  $\alpha$ - karboksilne skupine aminokiselinskog ostatka, kisikom oksidne skupine salicilaldehidne podjedinice te dušikovim atomom iminske skupine ekvatorijalno. Kisikov atom karboksilne skupine aminokiselinskog ostatka, koji koordinira atom vanadija ujedno je koordiniran i na susjedni atom molibdena, čime preuzima premošćujuću ulogu, dok drugi atom kisika karboksilne skupine koordinira Mo2 atom, što dodatno pridonosi stabilizaciji tetranuklearne okso vrste. Iz ukupne koordinacije, ligand se opisuje kao pentadentatni, pri čemu se zadržava enantiomer polazne aminokiseline (slika 37).



Slika 37. Strukturna formula liganda (*S*)-(*E*)-2-((2-oksido-1-fenilviniliden)amino)sukcinata (L2)

Koordinacijska sfera  $\{\text{Mo}_2\}$  podjedinice može se usporediti s dva oktaedra povezana vrhom i odgovara  $\{\text{Mo}_2\text{O}_{11}\}$  vrsti, što je u suprotnosti s Lipscombovim pravilom (slika 38). Do stabilizacije nastale vrste dolazi funkcionalizacijom  $\{\text{Mo}_2\text{O}_{11}\}$  jezgre kompleksom oksovanadija(IV) i (*S*)-(*E*)-2-((2-oksido-1-fenilviniliden)amino)sukcinata.



Slika 38. Prikaz okruženja  $\{\text{Mo}_2\text{O}_{11}\}$  vrste. Ioni molibdena prikazani su zelenom, ioni vanadija srebrnom, atomi kisika crvenom i dušika plavom bojom.

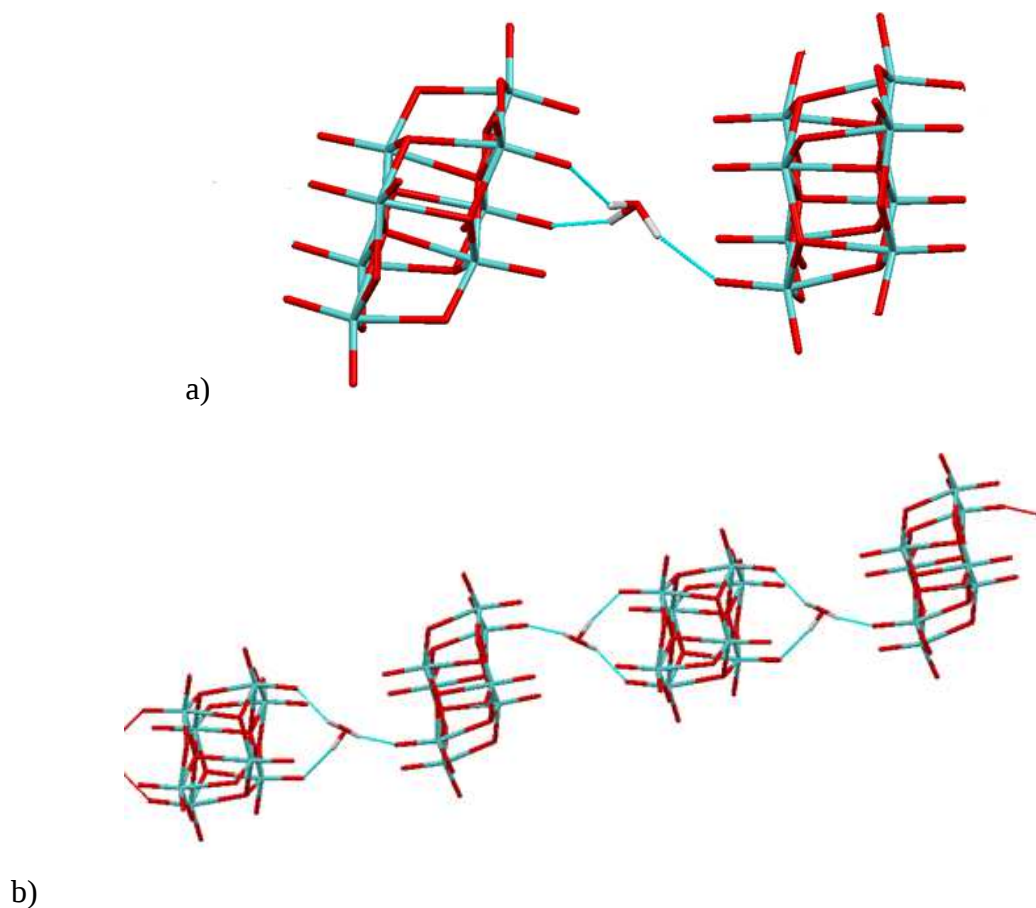
Termogram uzorka pokazuje tri značajna slijedna gubitka mase od čega prvi odgovara gubitku jedne molekule metanola u temperaturnom intervalu od 20 do 80 °C i iznosi 4 %, drugi gubitak mase odgovara gubitku raspadu trietilamina u području od 80 do 180 °C i iznosi 5 %, a treći gubitak mase od 180 do 500 °C te iznosa od 43 % može se pripisati raspadu tetrabutilamonijevog kationa i iminskog liganda. I DSC analiza

(Bu<sub>4</sub>N)(Et<sub>3</sub>NH)[Mo<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>9</sub>(L2)<sub>2</sub>]·CH<sub>3</sub>OH potvrdila je stupnjevite promjene u navedenom temperaturnom intervalu s najznačajnijom entalpijskom promjenom pri 250 °C.

U infracrvenom spektru produkta opažene vrpce pri 941, 906, 807 i 693 cm<sup>-1</sup> upućuju na prisutnost [Mo<sub>2</sub>O<sub>5</sub>]<sup>2+</sup> kationa i karakteriziraju redom asimetričnu i simetričnu vibraciju istezanja Mo=O<sub>t</sub> te Mo–O<sub>b</sub>–Mo veza. Vrpca pri 973 cm<sup>-1</sup> odgovara istezanju V=O<sub>t</sub> veze, dok vrpca na 764 cm<sup>-1</sup> V–O<sub>b</sub>–V veze. Prisutnost liganda potvrđuje vrpca pri 1655 cm<sup>-1</sup>, karakteristična za –C=N– vibraciju nastale iminske veze dok izostanak vrpce pri 1700 cm<sup>-1</sup> upućuje na koordinaciju liganda preko C=O karboksilne skupine bočnog lanca. Vrpce u području od 1400-1595 cm<sup>-1</sup> karakteristične su za vibracije karboksilatnih veza.

Kao prvi produkt reakcije u kojem je molarni odnos [MoO<sub>2</sub>(sal)<sub>2</sub>] i [VO(acac)<sub>2</sub>] iznosio 1 : 1 izoliran je (Bu<sub>4</sub>N)(Et<sub>3</sub>NH)[Mo<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>9</sub>(L3)<sub>2</sub>]·CH<sub>3</sub>OH, dok su iz matičnice uz miješane MoV komplekse izolirani već opisani (Bu<sub>4</sub>N)<sub>3</sub>[Mo<sup>V</sup>Mo<sup>VI</sup>O<sub>19</sub>] i bijeli monokristaličan produkt (Bu<sub>4</sub>N)(Et<sub>3</sub>N)(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)<sub>1/2</sub>[β-Mo<sub>8</sub>O<sub>26</sub>] kojemu je određena kristalna i molekulska struktura (slika 39a).

Jedno od svojstava polioksometalatnih vrsta je njihova strukturna ili kemijska kiralnost, koja može biti posljedica funkcionalizacije polioksometalatne vrste optički aktivnim molekulama ili posljedica strukturne konformacije oktaedarskih građevnih jedinica. Oktamolibdatni anion prikazan na slici 39a, podliježe konformacijskoj izomeriji zbog intramolekulskih vodikovih veza s oksonijevim ionom te gradi beskonačnu uzvojniciu P–konformacije (slika 39b). Konačno, molekulska formula poliokso vrste može se zapisati kao [Mo<sub>4</sub>O<sub>13</sub>(H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>)Mo<sub>4</sub>O<sub>13</sub>]<sub>n</sub>.



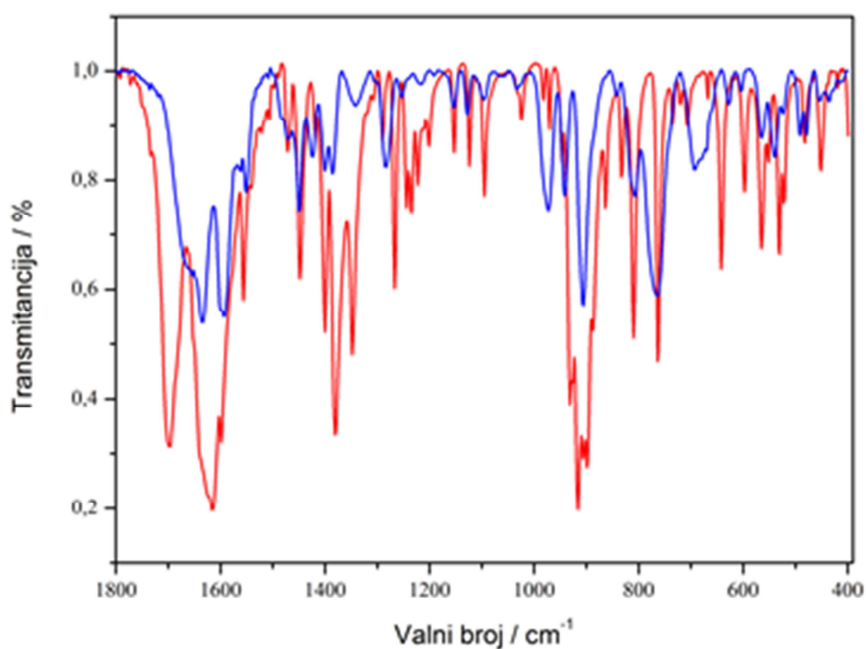
Slika 39. a) Prikaz strukturne formule  $[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]^{2-}$  aniona s intermolekulskim vodikovim vezama; b) Prikaz kiralnosti  $\text{P-}[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]^{2-}$  aniona kao posljedice izmjenivanja usmjerenja intermolekulskih vodikovih veza terminalnih kisikovih atoma s oksonijevim ionom.

Iz reakcije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  s L-asparaginskom kiselinom uz dodatak tetrabutilamonijevog bromida izoliran je žuti sitnokristaličan produkt, koji je podvrgnut termogravimetrijskoj analizi. U području 140–240 °C dolazi do gubitka mase od 2,29 % dok u području 240–500 °C taj gubitak iznosi 35,45 %. Diferencijalna pretražna kalorimetrija ukazuje na značajnu energetska promjenu pri drugom gubitku mase oko 340 °C, što je u skladu s energetska promjenama primijećenima kod izoliranih produkata koji sadrže tetrabutilamonijev kation i organski ligand.

U infracrvenom spektru produkta primjetne su četiri oštre vrpce u spektralnom području karakterističnom za istezanja  $\text{Mo}=\text{O}_t$  veze, na 931, 926, 916 i 906  $\text{cm}^{-1}$ , te dvije vrpce pri 887 i 810  $\text{cm}^{-1}$  karakteristične za prisutnost  $\text{Mo}-\text{O}_b$  veze. Takva kombinacija vrpce upućuje na postojanje dvije različite  $[\text{Mo}_2\text{O}_5]^{2+}$  jezgre. Usporede li se infracrveni spektri produkta koji

sadrži  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}2)_2]^{2-}$  anion sa spektrom nastalog produkta (slika 40), primjetna je strukturna analogija. Vrpca pri  $1267\text{ cm}^{-1}$  u skladu je s literaturnim podacima za slobodnu COH vibraciju bočnog lanca asparaginske kiseline koja ne sudjeluje u vodikovoj vezi, što dodatno potvrđuju i vrpce u spektralnom području od  $1200\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ . Izostanak N–H simetričnog i asimetričnog istezanja prisutnog u spektru L-asparaginske kiseline pri  $3024$  i  $2960\text{ cm}^{-1}$  potvrđuje nastanak iminske veze.

Na temelju podataka dobivenih iz infracrvenog spektra produkta i usporedbom s infracrvenim spektrom molibdovanadata  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}2)_2]^{2-}$ , te rezultata termogravimetrijske analize može se pretpostaviti da je nastao produkt sastava  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{HL}2)_2]$ .



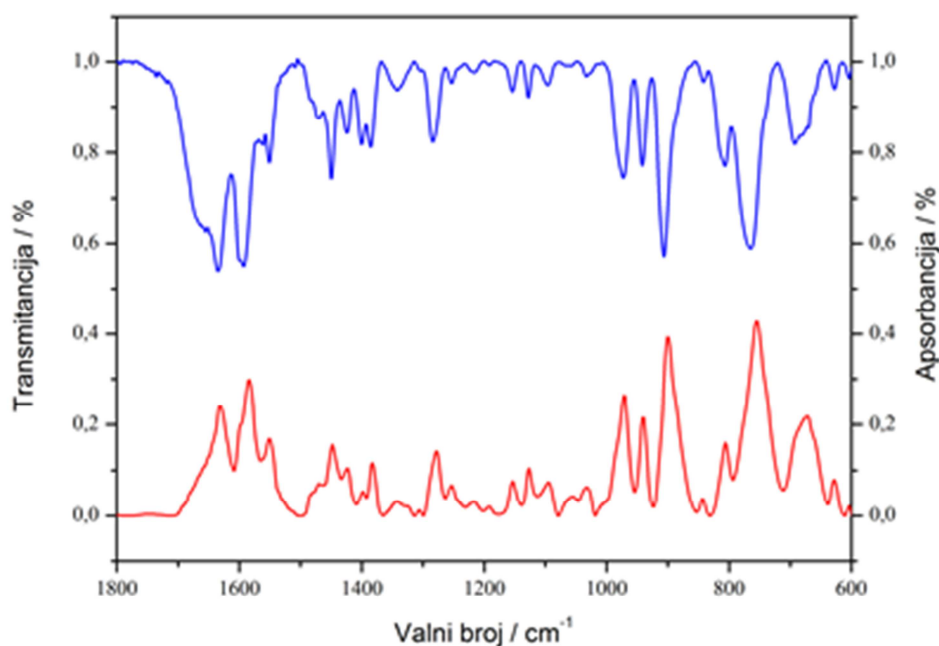
Slika 40. Usporedba IR spektra  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}2)_2]^{2-}$  aniona (plavo) i  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{L}2\text{H})_2]$  (crveno).

U literaturi je opisana priprava i molekulska i kristalna struktura  $(\text{NH}_4)_6[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_{24}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]^{89}$  u kojoj oksalatni anion koordinira isključivo atom vanadija didentatno. Autori su pripravili seriju molibdovanadata i kod svih pripremljenih spojeva oksalatni ligand je koordiniran na vanadijev ion.

Kako bi se ispitao utjecaj ishodnih supstancija, odnosno izvora okso vrsta vanadija i molibdena, provedeni su eksperimenti u kojima su korištene različite ishodne supstancije. U

jednom eksperimentu korišten je vanadil sulfat, dok je u drugom eksperimentu uz  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  dodan i amonijev heptamolibdat. Ostali reakcijski uvjeti nisu mijenjani.

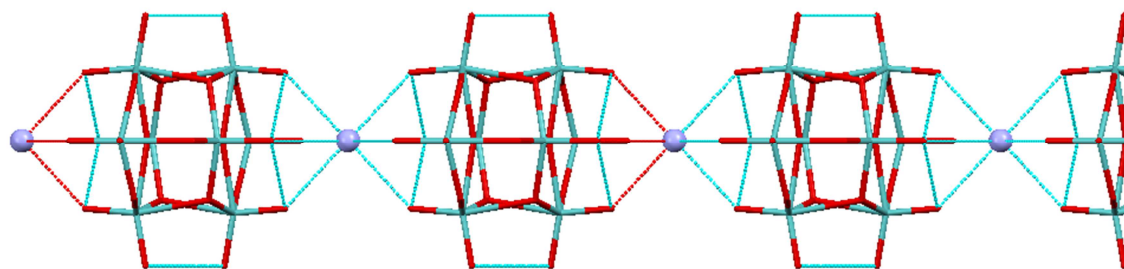
Usporedbom infracrvenih spektara (slika 41)  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}_2)_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$  i crvenog produkta izoliranog iz reakcijske smjese u kojoj je korišten vanadil sulfat kao ishodna supstanca, primjetno je preklapanje vrpce u spektralnom području  $650\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  koje odgovara  $\text{V}=\text{O}$ ,  $\text{Mo}=\text{O}$ ,  $\text{V}-\text{O}_b-\text{V}$  i  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  vibracijama.



Slika 41. Usporedba IR spektra  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}_3)_2]^{2-}$  aniona (plavo) i produkta izoliranog iz reakcije s vanadil sulfatom (crveno).

Iz reakcijske smjese u koju je dodan i amonijev heptamolibdat izoliran je svjetlo plavi produkt kojem je bilo moguće odrediti molekulsku i kristalnu strukturu  $(\text{NH}_4)_y[\beta\text{-Mo}^{\text{V}}\text{Mo}^{\text{VI}}_{(8-x)}\text{O}_{26}] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Utvrđeno je da je nastao  $\beta$ -oktamolibdatni anion, slične strukture kao  $\beta$ -oktamolibdatni anion izolirani iz reakcije bez dodatka heptamolibdata. Oktamolibdatne jedinice povezane su vodikovim vezama preko amonijevog iona u ravnolančanu strukturu. Ustanovljena je prisutnost intermolekulskih vodikovih veza  $\text{N}-\text{H}\cdots\text{O}$  vrste, a plava boja produkta dokaz je da je došlo do djelomične redukcije  $\text{Mo}(\text{VI})$  u  $\text{Mo}(\text{V})$ .

U infracrvenom spektru primjećene su vrpce pri 952, 900, 858, 710 i 626  $\text{cm}^{-1}$  koje su u skladu s literaturnim podacima za vibracije  $\text{Mo}=\text{O}_t$  i  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  veza, dok vrpce pri 1628 i 3476  $\text{cm}^{-1}$  odgovaraju literaturnim podacima za vibracije svijanja i istežanja  $\text{H}-\text{O}-\text{H}$  odnosno  $\text{O}-\text{H}$  veza, a što je u skladu s činjenicom da se radi o hidratu.



Slika 42. Prikaz molekulske strukture  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{NH}_4^+)\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n^-$  aniona štapićima, prikazan je pogled oktamolibdatnih jedinica vezanih vodikovim vezama  $\text{N}-\text{H} \cdots \text{O}$  tipa preko amonijevog iona, kao dokaz ravnolančanog polimera  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{NH}_4^+)\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n^-$ .

Kao i kod već opisanog kiralnog tetrabutilamonijevog oksonijevog oktamolibdata, gdje je svojstvo kiralnosti postignuto slaganjem uzvojnice preko oksonijevog iona, u amonijevom oktamolibdatu dolazi do polimerizacije preko amonijevog kationa (slika 42), čime je pokazana mogućnost utjecanja na procese povezivanja jedinica ugradnjom kationa različitih geometrija. Iz matičnice, nakon izolacije reduciranog oktamolibdata, stajanjem nastaje  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ .

Iz eksperimenata provedenih u trifluoroetanolu i diklormetanu kao otapalu, nije bilo moguće izolirati polioksometalatne vrste.

U tablici 25 prikazani su rezultati eksperimenata provedenih s L- asparaginskom kiselinom, pri čemu  $\{\text{Mo}_6\}$  označava Lindquistov anion miješanih oksidacijskih stanja molekulske formule  $[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{2-}$ ,  $\{\text{Mo}_2\text{V}_2\}$  označava polinuklearni kompleks  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}2)_2]^{2-}$ , analogno tome  $\{\text{Mo}_4\}$  predstavlja  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{L}2\text{H})_2]$ , dok  $\{\text{Mo}_8\}$  označava  $[\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]^{2-}$  anion i  $\{\text{Mo}_8'\}$   $[\beta\text{-Mo}^{\text{V}}\text{Mo}^{\text{VI}}_{(8-x)}\text{O}_{26}]^{(2+x)-}$  anion.

Tablica 25. Rezultati eksperimenata provedenih s L-asparaginskom kiselinom; produkt 1 označava produkt najvećeg masenog udjela, dok produkt 2 označava produkt izoliran iz matičnice.

| [MoO <sub>2</sub> (sal) <sub>2</sub> ]<br>/mol | [VO(acac) <sub>2</sub> ]<br>/mol | otapalo                              | t/h   | produkt 1                         | produkt 2                              |
|------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------------------|----------------------------------------|
| 1                                              | 0,2                              | CH <sub>3</sub> OH                   | 16    | {Mo <sub>6</sub> }                | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> }      |
| 1                                              | 1                                | CH <sub>3</sub> OH                   | 16    | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> } | {Mo <sub>6</sub> }, {Mo <sub>8</sub> } |
| 1                                              | 1                                | CH <sub>3</sub> OH                   | 24    | {Mo <sub>6</sub> }                | -                                      |
| 1                                              | 1                                | CH <sub>3</sub> OH                   | 4     | L-asparagin                       | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> }      |
| 1 (+1 {Mo <sub>7</sub> })                      | 1                                | CH <sub>3</sub> OH /H <sub>2</sub> O | 16    | {Mo <sub>8</sub> '}               | {Mo <sub>6</sub> }                     |
| 1                                              | 1                                | CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>      | 24-72 | L-asparagin                       | -                                      |
| 1                                              | 1                                | F <sub>3</sub> EtOH                  | 24-72 | L-asparagin                       | -                                      |
| 1                                              | 0                                | CH <sub>3</sub> OH                   | 3     | {Mo <sub>4</sub> }                | -                                      |
| 1                                              | 1mol(VOSO <sub>4</sub> )         | CH <sub>3</sub> OH                   | 16    | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> } | -                                      |

Dobiveni rezultati potvrđuju da je miješani polinuklearni anion [Mo<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>9</sub>(L<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]<sup>2-</sup> (slika 38) intermedijarna vrsta u nastajanju Lindquistovog aniona [Mo<sup>V</sup>Mo<sub>5</sub><sup>VI</sup>O<sub>19</sub>]<sup>2-</sup>. Povezivanje građevnih jedinica potpomognuto je funkcionalizacijom polioksido vrsta. Na temelju rezultata eksperimenata provedenih s [MoO<sub>2</sub>(sal)<sub>2</sub>] i [VO(acac)<sub>2</sub>], kao ishodnim supstancijama, uz različite molarne omjere i reakcijska vremena, utvrđeno je da preferirano nastaje [Mo<sup>V</sup>Mo<sub>5</sub><sup>VI</sup>O<sub>19</sub>]<sup>3-</sup> vrsta. Vrijeme reakcije potrebno za potpunu konverziju u produkt [Mo<sup>V</sup>Mo<sub>5</sub><sup>VI</sup>O<sub>19</sub>]<sup>3-</sup> iznosi 24 sata. [Mo<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>9</sub>(L<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]<sup>2-</sup> intermedijarni je anion koji povezivanjem dovodi do nastajanja konačnog {Mo<sub>6</sub>} produkta. U eksperimentima u kojima je omjer [MoO<sub>2</sub>(sal)<sub>2</sub>] i [VO(acac)<sub>2</sub>] iznosio 1:1, primjećena je i manja količina oktamolibdatnog [β-Mo<sub>8</sub>O<sub>26</sub>]<sup>2-</sup> aniona što upućuje na mogućnost daljnje agregacije u reakcijskim uvjetima. Kako je iz eksperimenta bez dodatka [VO(acac)<sub>2</sub>] izoliran kompleks [Mo<sub>4</sub>O<sub>11</sub>(L<sub>3</sub>H)<sub>2</sub>], razvidno je da stabilnost pojedine polioksidovrste ovisi o reakcijskim uvjetima.

Dinuklearna građevna jedinica {Mo<sub>2</sub>} je funkcionalizirana vanadijevim kompleksom s *N*-saliciliden-L-aspartatom(L<sub>2</sub>). Sam kompleks dodatno je stabiliziran koordinacijom karboksilne skupine bočnog lanca aminokiselinskog ostatka koja premošćuje središnje ione molibdena, što je ujedno i razlog sporijeg povezivanja u {Mo<sub>6</sub>}.

U eksperimentu u kojem je kao polazna supstanca korišten vanadil sulfat, također je nastao miješani polinuklearni kompleks dok je iz eksperimenta u kojem je korišten i amonijev heptamolibdat uz [MoO<sub>2</sub>(sal)<sub>2</sub>] i [VO(acac)<sub>2</sub>], nastao je reducirani oblik [β-Mo<sub>8</sub>O<sub>26</sub>]<sup>n-</sup> anion miješanih oksidacijskih stanja. Usporede li se molekulske strukture heptamolibdatnog i

oktamolibdatnog aniona, vidljivo je da dodatkom monomerne {Mo} jezgre ne može doći do nastajanja  $\beta$ -oktamolibdatne strukture, što je u skladu s literaturno dostupnim podacima i principima sinteze polioksometalatnih vrsta. Ovisno o pH sustava, dolazi do hidrolitičke razgradnje kada se polioksometalatnih vrsta koje se koriste kao polazne supstancije. U prvom koraku dolazi do hidrolize heptamolibdata na {Mo<sub>4</sub>} ili {Mo<sub>2</sub>}, te {Mo} podjedinicu, koje se zatim povezuju u  $\beta$ -oktamolibdatni anion. U opisanom eksperimentu molarni omjer Mo:V iznosio je 8:1, dok je u eksperimentu u kojem je pripravljen {Mo<sub>6</sub>} anion, molarni omjer Mo:V iznosio 5:1. Sve to dodatno upućuje da dolazi do hidrolize heptamolibdata u {Mo<sub>4</sub>} podjedinice, a zatim do ponovnog povezivanja.

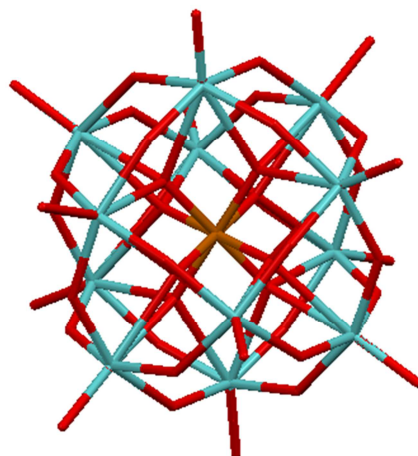
Usporede li se rezultati eksperimenata provedenih u trifluoroetanolu i diklormetanu s rezultatima eksperimenata provedenih u metanolu s fizikalnim svojstvima metanola, trifluoroetanolu i diklormetana te literaturno najzastupljenijim otapalima u postupcima pripreme polioksometalata, vode i acetonitrila (tablica 26), relativna permitivnost otapala jest ključno svojstvo u pripravi polioksometalatnih vrsta budući da su polioksometalati tvari čija je površina izrazito elektronegativna. Rezultati provedenih istraživanja uz korištenje različitih otapala u skladu su sa svojstvima polioksometalata.

Tablica 26. Fizikalna svojstva otapala korištena tijekom pripreme polioksometalata

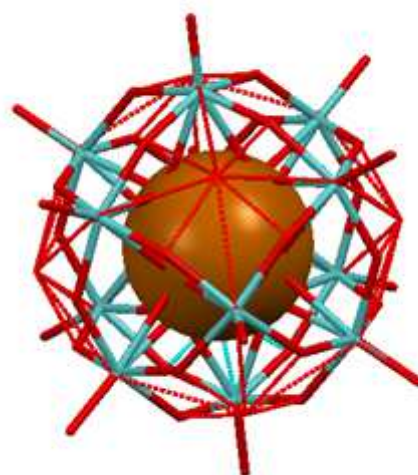
| Otapalo                            | $t_v$ / °C | pKa        | $\epsilon_r$ | POM nastajanje |
|------------------------------------|------------|------------|--------------|----------------|
| CH <sub>3</sub> OH                 | 65         | 15,5       | 32,7         | +              |
| CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>    | 40         | -          | 8,93         | -              |
| F <sub>3</sub> CCH <sub>2</sub> OH | 78         | 11,4; 12,4 | 8,55         | -              |
| CH <sub>3</sub> CN                 | 82         | 25         | 37,5         | +              |
| H <sub>2</sub> O                   | 100        | 15,7       | 80,1         | +              |

#### 4.2.2. Reakcije s D,L-asparaginom i L-glutaminom

Iz reakcijske smjese s D,L- asparaginom izolirana je mala količina svijetlozelenog praškastog produkta  $[H_yBrMo^V_xMo^{VI}_{(12-x)}O_{40}]^{n-}$  (slika 43), dok je iz matičnice izolirana smjesa tamnog kristaliničog produkta i žutih igličastih kristala. Smjesu produkata nije bilo moguće razdvojiti na temelju topljivosti. Iz smjese kristala izdvojen je tamni monokristalni produkt za koji je na temelju preliminarnih rezultata strukturnih istraživanja predložena molekulska formula aniona  $[H_yBrMo^V_xMo^{VI}_{(12-x)}O_{40}]^{n-}$ . Tijekom izlaganja rentgenskom zračenju, dolazi do raspada polioksometalata. Da u izoliranom polioksometalatu nije prisutan vanadij potvrđeno je ICP–AES analizom. U infracrvenom spektru produkta primjetne su vrpce koje odgovaraju ravnolančanim C–H istezanjima karakterističnim za tetrabutilamonijev kation, a koje su u skladu s prethodnim istraživanjima. Da je dio atoma molibdena prisutan u reduciranom obliku potvrđuje plava boja produkta. Iz literature su poznati slični anioni koji umjesto bromida sadrže druge heteroatome te je pretragom Cambridge Structural Database, pronađeno je riješenih kristalnih struktura nekoliko primjera takvih aniona, čiji faktor nepouzdanosti iznosi 8-12 %. Poznata je fotoosjetljivost polioksometalata vrsta, pa je razumljivo upitna stabilnost vrsta koje sadrže bromidni ion pri izlaganju rentgenskom zračenju. Molekulska struktura odgovara Kegginovom tipu polioksometalatne vrste.



a)



b)

Slika 43. Prikaz a) molekulske strukture  $[H_yBrMo^V_xMo^{VI}_{(12-x)}O_{44}]^{n-}$  pri čemu je  $y = 17-x$ ; b) potencijalnih vodikovih veza predloženih na temelju  $O\cdots O$  udaljenosti koje stabiliziraju anion poliookso vrste; ioni molibdena prikazani su svijetloplavom, atomi kisika crvenom, a bromidni ion smeđom bojom.

Žuti kristalni produkt izoliran iz reakcijske smjese identificiran je kao već opisani djelomično reducirani Lindquistov anion  $(Bu_4N)_3[Mo^VMo_5^{VI}O_{19}]$ .

Iz reakcije u kojoj je korišten L-glutamin također je izoliran djelomično reducirani Lindquistov anion ali uz vrlo nisko iskorištenje. Reakcija je provedena 24 sata, a ukoliko se provodi 5 ili 16 sati izolirana je smjesa L-glutamina i djelomično reduciranog Lindquistovog aniona  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$ .

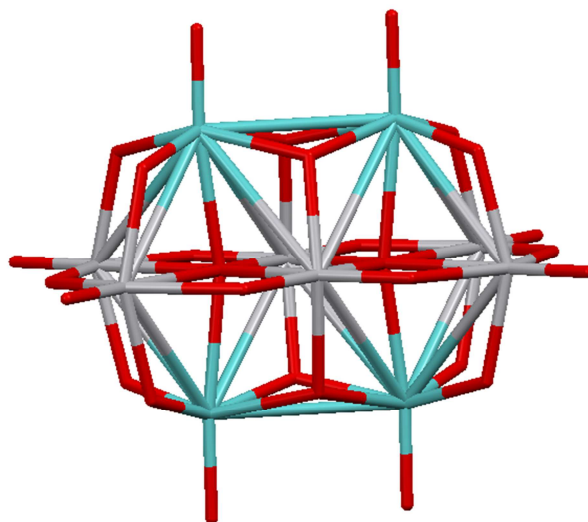
#### 4.2.3. Reakcija s L-Ornitin hidrokloridom

Iz reakcije u kojoj je kao aminokiselina korišten L-ornitin hidroklorid, izoliran je  $(\text{Bu}_4\text{N})_n[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(5-y)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ .

U infracrvenom spektru primjetne su vrpce srednjeg intenziteta pri 2875, 2935 i 2965  $\text{cm}^{-1}$  (ravnolančana C–H istezanja) karakteristične za tetrabutilamonijev kation. U području otiska prsta glavna vrpce pri 942  $\text{cm}^{-1}$  karakteristična je za istezanje  $\text{Mo}=\text{O}_t$  veze, dok najintenzivnija vrpca spektra pri 860  $\text{cm}^{-1}$  odgovara vibraciji  $\text{Mo}-\text{O}_b-\text{Mo}$  veze, dok su vrpce pri 760 i 740  $\text{cm}^{-1}$  u skladu s literaturnim podacima za istezanja  $\text{V}-\text{O}_b-\text{V}$  veze. Vrpce pri 985 i 1000  $\text{cm}^{-1}$  odgovaraju vibraciji istezanja  $\text{V}=\text{O}_t$  veze. Takva raspodjela vrpce u infracrvenom spektru odgovara literaturnim podacima za poliokso molibdovanadate Kegginovog tipa.<sup>90</sup> Grijanjem produkta u dušičnoj kiselini nastaje blijedo narančasti talog, koji je smjesa  $\text{MoO}_3$  i  $\text{V}_2\text{O}_5$ , što potvrđuje prisutnost oba metala u produktu. Analiza udjela molibdena i vanadija ICP-AESom, pri čemu utvrđen omjer Mo:V iznosi 13:5. Argentometrijski je potvrđena prisutnost bromida u uzorku.

Na temelju rezultata i interpretacije analitičkih podataka molekulska struktura pretpostavljeno je da se radi o anionu  $[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(5-y)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ , koji se ubraja u poliokso vrstu *super* Kegginovog tipa. Da su u anionu prisutna miješana oksidacijska stanja metala potvrđuje tamna boja produkta te primjetan magnetizam prilikom provedbe analiza.

Monokristalnom narančastom produktu izoliranom iz matičnice, bilo je moguće odrediti molekulsku i kristalnu strukturu te je ustanovljeno da se radi o spoju formule  $(\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_4\text{V}_6\text{O}_{28}]$ . Anion je dekavanadatnog tipa, pri čemu su 4 atoma vanadija iznad i ispod ravnine heksavanadatnog prstena zamjenjena s četiri atoma molibdena (slika 44).



Slika 44. Prikaz molekulske stukture  $[\text{Mo}_4\text{V}_6\text{O}_{28}]^{2-}$ . Ioni molibdena prikazani su svijetloplavom, vanadija svijetlosivom, a atomi kisika crvenom bojom.

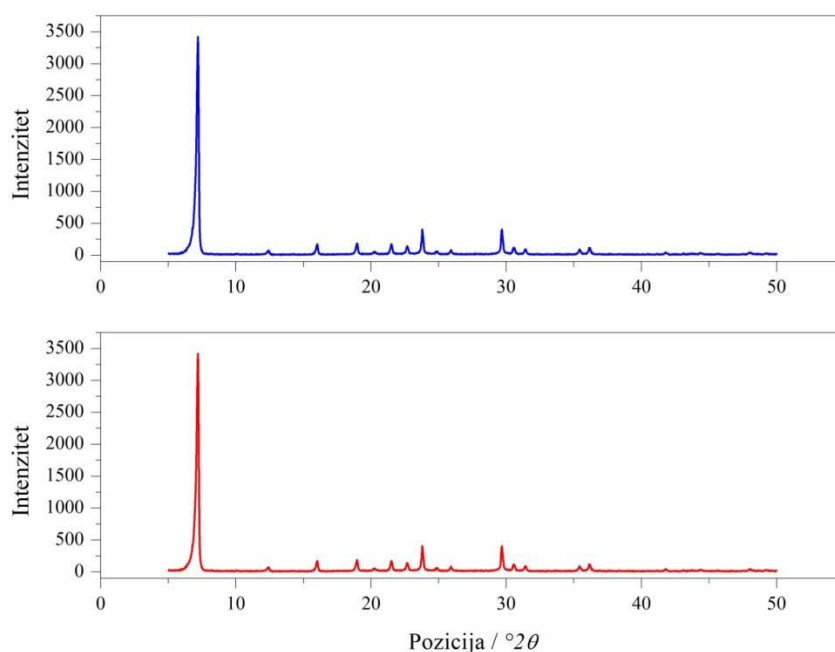
#### 4.2.4. Reakcija bez dodatka aminokiseline

Kako bi se pobliže razjasnila uloga aminokiselina u reakcijskim sustavima, provedene su reakcije bez dodatka aminokiselina. Izoliran je tamnoplavi kristaličan produkt.

Infracrveni spektar uzorka odgovara spektru produkta izoliranog iz reakcije s L-ornitin hidrokloridom formule  $[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_5^{\text{IV}}\text{V}_{(5-x)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ , pri čemu je primjetna razlika u području oko  $1000$  i  $500\text{ cm}^{-1}$ . Vibracijske vrpce su prisutne u oba uzorka, ali je njihov omjer različit, što je karakteristično za Kegginov tip poliokso vrsta.

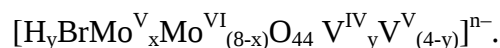
Analiza udjela molibdena i vanadija ICP-AESom, rezultirala je omjerom Mo:V u molekulskoj strukturi 2:1. Argentometrijski je potvrđena prisutnost bromida.

Difrakcijom rentgenskih zraka u polikristalnom uzorku i usporedbom dobivenog difraktograma s izračunatim difraktogramom praha za  $[\text{H}_y\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(12-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{40}]^{n-}$  vidljivo je da je došlo do nastanka istog produkta (slika 45). Na temelju analitičkih podataka, pretpostavljena je molekulska formula aniona  $[\text{H}_y\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(8-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{44}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(4-y)}^{\text{V}}]^{n-}$ .



Slika 45. Usporedba difraktograma polikristalnog uzorka

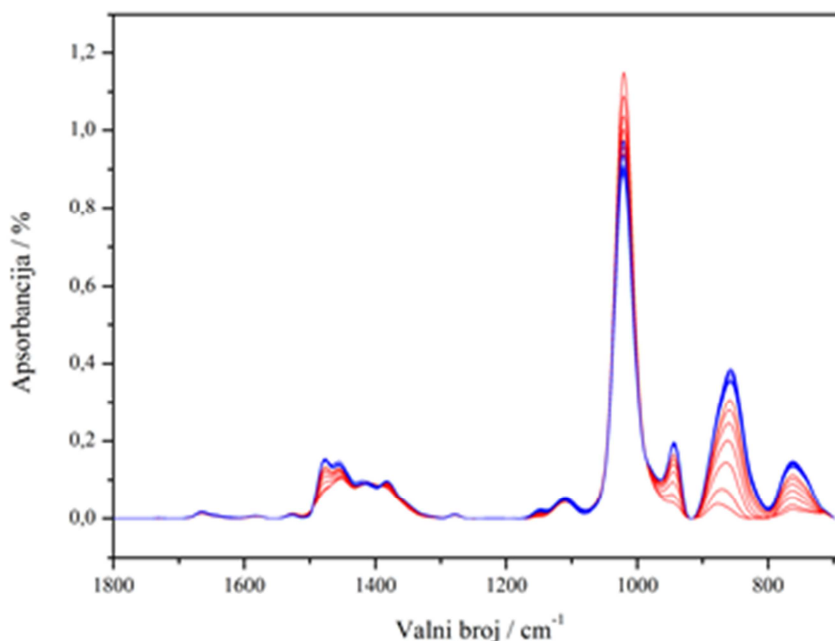
$[\text{H}_y\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(8-x)}\text{O}_{44}\text{V}^{\text{IV}}_y\text{V}^{\text{V}}_{(4-y)}]^{n-}$  (crveno) i računatog difraktograma



#### 4.2.5. Kvalitativna in-line vremenski ovisna infracrvena spektroskopija reakcijskih smjesa

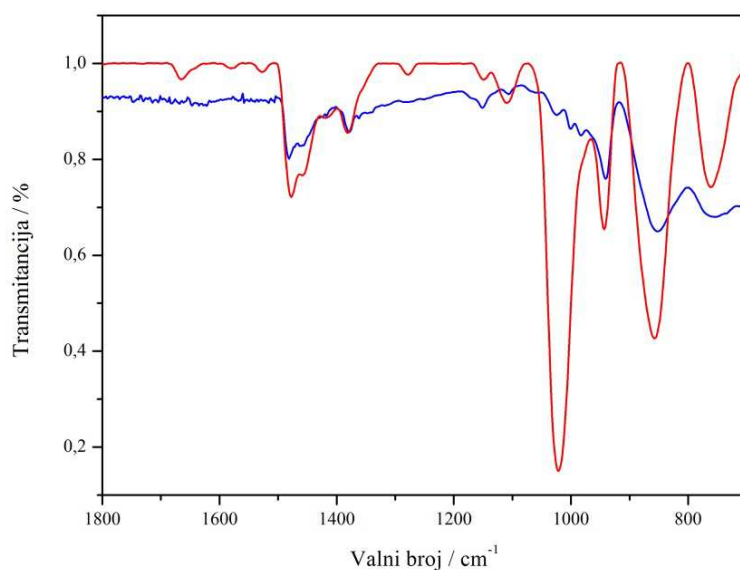
Kako bi se opisali reakcijski sustavi, obzirom na veliki broj izoliranih smjesa produkata, reakcije s L-asparaginom, L-ornitinom sa i bez dodatka aminokiseline praćene su nfracrvenom spektroskopijom *in-line*.

Na slici 46 prikazani su vremenski ovisni infracrveni spektri prikupljeni iz eksperimenta bez dodatka aminokiseline, iz koje je vidljivo da do najvećih promjena dolazi tijekom prvog sata reakcije. Najveće spektralne promjene vidljive su u području od 650–1000  $\text{cm}^{-1}$ . Vrpca najvećeg intenziteta odgovara C–O vibraciji metanola, i preklapa se sa V=O<sub>t</sub> vibracijom.



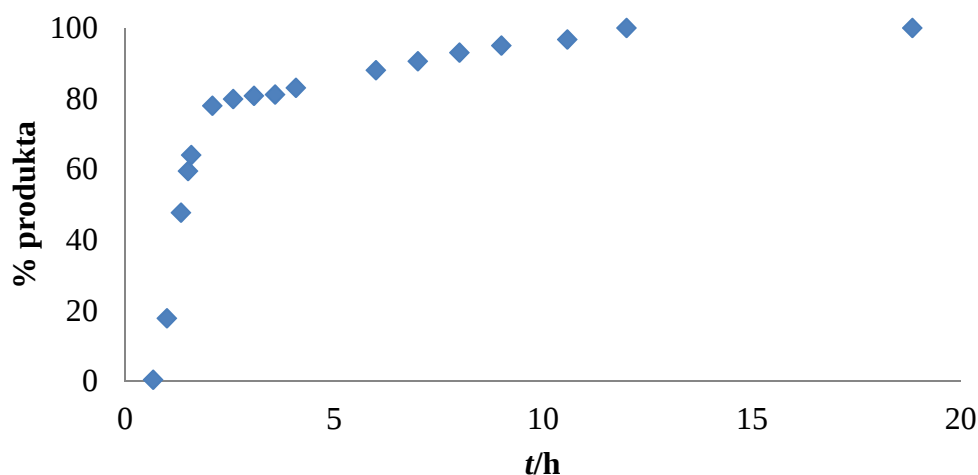
Slika 46. Prikaz vremenski ovisnih IR spektara reakcijske smjese snimanih in situ. Spektari snimani tijekom prvog sata prikazani su crvenom bojom, a spektari snimani tijekom sljedeća 23 sata plavom bojom. Vrijeme  $t=0$  je pridruženo kada je temperature reakcijske smjese dosegla temperaturu vrelišta.

Usporede li se spektralna područja glavnih komponenti i produkta (slika 47) zaključuje se da u spektralnom području od 800 do 850  $\text{cm}^{-1}$  ne dolazi do preklapanja vrpce, te da je moguće opisati nastajanje produkta. Spektari su snimani izotermno, na temperaturi vrelišta smjese, pri čemu je  $t=0$  pridruženo trenutku postizanja temperature vrelišta. Na sobnoj temperaturi nisu uočene značajne vrpce niti jedne od polaznih supstancija. Uočena je vrpca koja odgovara istezanju  $\text{V}=\text{O}_t$  veze pri 998  $\text{cm}^{-1}$  dok je vrpca karakteristična za asimetrično istezanje veze  $\text{Mo}=\text{O}_t$  prisutna i u spektru produkta i ishodne supstancije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$ . Iako ta vrpca nije prisutna u spektru reakcijske smjese u vremenu  $t=0$ , nije moguće nedvojbeno zaključiti o udjelu pojedine supstancije u produktu.



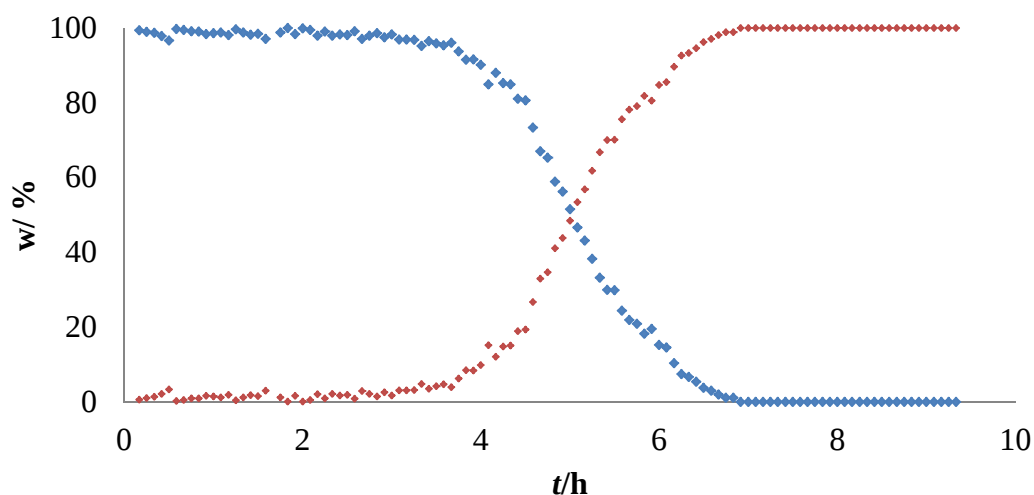
Slika 47. Usporedba spektra reakcijske smjese u  $t = 10\text{h}$  (crveno) sa spektrom produkta (plavo)

Integracijom vrpci karakterističnih za produkt i pridruživanjem najvišoj vrijednosti 100 % konverzije, izračunat je relativan nastanak produkta koji je prikazan na slici 48. Reakcijska smjesa kroz sat vremena postiže konverziju od približno 80 %, a potom kroz devet sati konvertira sljedećih 20 %. Nakon 10 sati nije primjetna promjena u reakcijskoj smjesi. Zbog niske koncentracije reakcijske smjese, nije bilo moguće razlučiti sve prisutne tvari.



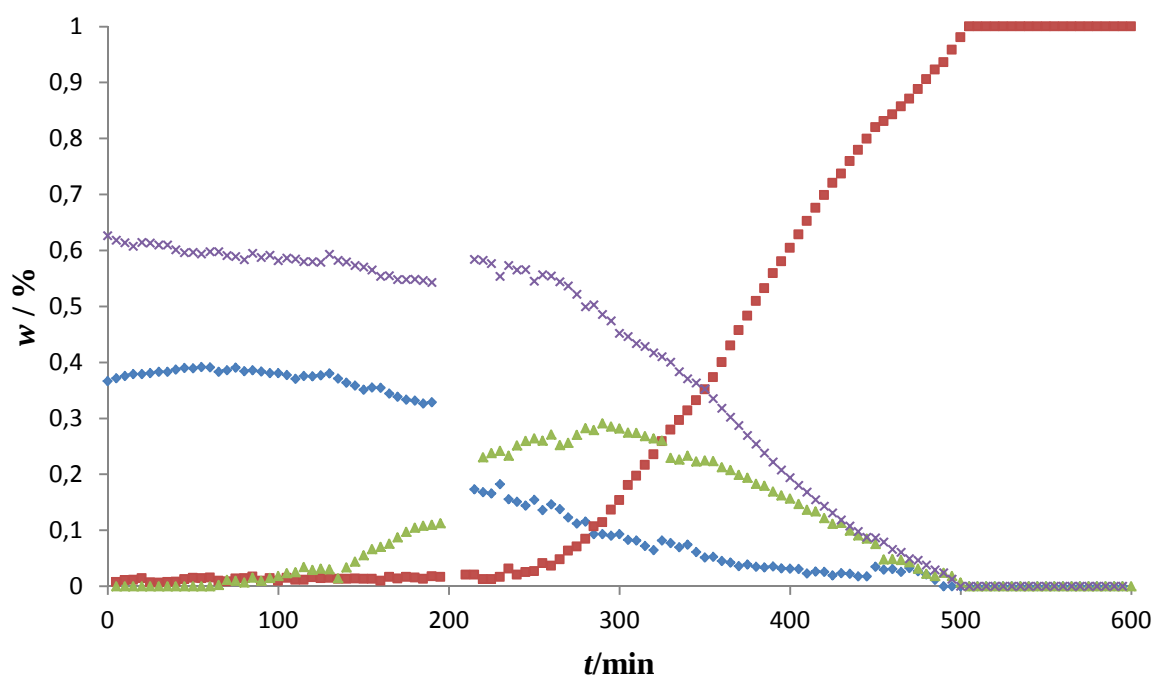
Slika 48. Profil reakcije praćene infracrvenom spektroskopijom, pri čemu je  $t=0$  vrijeme postizanja temperature vrelišta.

Praćenje reakcije s L-ornitin hidrokloridom, kao polaznom supstancijom, infracrvenom spektroskopijom *in-line*, pri čemu je vrijeme reakcije iznosilo 24 sata, dok je interval snimanja iznosio 5 minuta, te obradom prikupljenih spektara izračunat je reakcijski profil metodom multivarijantne rezolucije krivulje (eng. *multivariate curve resolution*) pri čemu je obrađeno spektralno područje od 650 do 960  $\text{cm}^{-1}$  te od 1100 do 1800  $\text{cm}^{-1}$ . Izračunati spektar produkta u potpunosti odgovara spektru izoliranog produkta iz reakcijske smjese, dok spektar polazne komponente jest kombinacija spektara koja upućuje na nastanak miješane vrste naznačene kao međuprodukt. U prva 3 sata reakcije nema primjetnih promjena u infracrvenom spektru, nakon čega dolazi do potpune konverzije u sljedeća 3 sata (slika 49).



Slika 49. Profil reakcije s L-ornitinom, pri čemu je produkt prikazan crvenom, a intermedijar plavom bojom

Metodom multivarijantnog razlučenja krivulje u spektralnom području od 650 do 960  $\text{cm}^{-1}$  te od 1100 do 1800  $\text{cm}^{-1}$ , razlučeni su spektri 4 komponentne, čije su promjene u koncentracijskom profilu smjese dane na slici 50. Od razlučenih spektara, dva spektra odgovaraju spektrima polaznih tvari korištenih u reakciji, dok treći spektar odgovara spektru intermedijarnog produkta u kojem su vidljive vremenski ovisne promjene u spektralnom području koje je karakteristično za nastali iminskog ligand od 1400 do 1700  $\text{cm}^{-1}$  te vrpce u spektralnom području od 850–900  $\text{cm}^{-1}$ . Spektar komponente čija je promjena koncentracije u smjesi naznačena crvenom bojom odgovara spektru nastalog produkta.



Slika 50. Vremenski ovisna promjena relativnog masenog udjela vrsta u reakcijskoj smjesi s L-ornitinom dobivena multivarijantnom rezolucijom krivulja vremenski ovisnih infracrvenih spektara, pri čemu je prikazan relativna koncentracija produkta crvenom, a intermedijara zelenom bojom.

Iz prikaza vidljiv je nastanak intermedijara te njegova konverzija u produkt. Vrijeme reakcije iznosi 5 sati.

## 4.2.6. Uloga aminokiselina u nastanku polioksometalatnih vrsta

U tablici 27 dan je pregled rezultata provedenih eksperimenata s aminokiselinama. Pri nižim pH vrijednostima dolazi do nastanka polioksometalatnih vrsta, što je u skladu s literaturnim podacima. Primjetno je, da u reakcijama s L-asparaginskom kiselinom nastaje  $\{\text{Mo}_6\}$  Lindquistov anion, dok u reakciji s L-ornitinhidrokloridom i bez dodatka aminokiseline nastaju  $\{\text{Mo}_{12}\}$  heteropoli vrste, a primarno Kegginova i *super*-Kegginova poliokso vrsta. Poliokso vrsta nižeg stupnja polimerizacije nastala je u reakciji s L-asparaginskom kiselinom kao posljedica funkcionalizacije primarne  $\{\text{Mo}_2\}$  jedinice kompleksom vanadija s *N*-saliciliden–L-aspartatom. Dodatak L-ornitina ne sprječava polimerizaciju.

Tablica 27. Pregled odabranih eksperimenata pri čemu  $\{\text{Mo}_6\} = [\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{2-}$ ,  $\{\text{Mo}_2\text{V}_2\} = [\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}3)_2]^{2-}$ ,  $\{\text{Mo}_8\} = [\beta\text{-Mo}_8\text{O}_{26}]^{2-}$ ,  $\{\text{Mo}_{12}\text{Br}\} = [\text{H}_y\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(12-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{40}]^{n-}$ ,  $\{\text{Mo}_{13}\text{V}_5\} = [\text{Br Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_5^{\text{IV}}\text{V}_{(5-x)}^{\text{V}}\text{O}_{62}]^{n-}$ ,  $\{\text{Mo}_8\text{V}_4\} = [\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(8-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{44}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(4-y)}^{\text{V}}]^{n-}$ ,  $\{\text{Mo}_4\text{V}_6\} = [\text{Mo}_4\text{V}_6\text{O}_{28}]^{2-}$ , produkt 1 označava primarni reakcijski produkt, dok produkt 2 označava produkt izoliran iz matičnice nakon izolacije produkta 1.

| [MoO <sub>2</sub> (sal) <sub>2</sub> ]<br>/eq | VO(acac) <sub>2</sub> ]<br>/eq | t/ h | produkt 1                          | produkt 2                             | pH reakcijske<br>smjese |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Asp, (pK <sub>a</sub> (R)= 3,86)              |                                |      |                                    |                                       |                         |
| 1                                             | 0,2                            | 16   | {Mo <sub>6</sub> }                 | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> }     | 2,4                     |
| 1                                             | 1                              | 16   | {Mo <sub>2</sub> V <sub>2</sub> }  | {Mo <sub>8</sub> },{Mo <sub>6</sub> } |                         |
| 1                                             | 1                              | 24   | {Mo <sub>6</sub> }                 |                                       |                         |
| D,L-Asn                                       |                                |      |                                    |                                       |                         |
| 1                                             | 1                              | 6    | D,L-Asn                            | {Mo <sub>12</sub> Br}                 | 5,6                     |
| 1                                             | 1                              | 24   | {Mo <sub>12</sub> Br}              |                                       |                         |
| L-Gln                                         |                                |      |                                    |                                       |                         |
| 1                                             | 1                              | 5    | L-Gln                              |                                       | 4,64                    |
| 1                                             | 1                              | 24   | {Mo <sub>6</sub> }                 | {Mo <sub>8</sub> }                    | 5,55                    |
| 1                                             | 1                              | 48   | {Mo <sub>6</sub> }                 |                                       |                         |
| L-Orn, (pK <sub>a</sub> (R) = 10,76)          |                                |      |                                    |                                       |                         |
| 1                                             | 1                              | 24   | {Mo <sub>13</sub> V <sub>5</sub> } | {Mo <sub>4</sub> V <sub>6</sub> }     | 2,1                     |
| bez dodatka aminokiseline                     |                                |      |                                    |                                       |                         |
| 1                                             | 1                              | 24   | {Mo <sub>8</sub> V <sub>4</sub> }  |                                       | 2,3                     |

Ujedno, iz eksperimenata provedenih s L-asparaginskom kiselinom nije bilo moguće izolirati miješane, već samo molibdatne polioksometalate, što je u skladu s primijećenim nastankom najmanjeg funkcionaliziranog polioksometalata. Vrijednosti pH reakcijskih smjesa u reakcijama u kojima nije korištena aminokiselina, te s L-asparaginskom kiselinom i L-ornitinom, su usporedive, što upućuje na važnost kelatirajuće sposobnosti aminokiselinskog ostatka.

U tablici 28 dan je pregled svojstava aminokiselina upotrebljenih u istraživanju sa rezultatima dobivenih polioksometalata, pri čemu je kao produkt naznačena vrsta koja je izolirana nakon 24 sata reakcije.

Tablica 28. Rezultati provedenog istraživanja pri čemu je dan pregled osnovnih svojstava odabranih aminokiselina i izoliranog produkta iz reakcijske smjese nakon 24 sata. C (nf) označava broj nefunkcionaliziranih atoma ugljika bočnog lanca aminokiseline.  $\{\text{Mo}_6\} = [\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]^{2-}$ ,  $\{\text{Mo}_{12}\text{Br}\} = [\text{H}_y\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(12-x)}\text{O}_{40}]^{n-}$ ,  $\{\text{Mo}_{13}\text{V}_5\} = [\text{Br Mo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{13-x}\text{V}^{\text{IV}}_5\text{V}^{\text{V}}_{(5-x)}\text{O}_{62}]^{n-}$ ,  $\{\text{Mo}_8\text{V}_4\} = [\text{BrMo}^{\text{V}}_x\text{Mo}^{\text{VI}}_{(8-x)}\text{O}_{44} \text{V}^{\text{IV}}_y\text{V}^{\text{V}}_{(4-y)}]^{n-}$  pri čemu \* označava nisko iskorištenje reakcije.

| Aminokiselina             | bočni lanac (R)                                      | C (R) | pK <sub>a</sub> (COOH) | pK <sub>a</sub> (NH <sub>2</sub> ) | pK <sub>a</sub> (R) | POM                                |
|---------------------------|------------------------------------------------------|-------|------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| L-Asp                     | -CH <sub>2</sub> C(O)OH                              | 1     | 2,09                   | 9,82                               | 3,86                | {Mo <sub>6</sub> }                 |
| D,L-Asn                   | -CH <sub>2</sub> C(O)NH <sub>2</sub>                 | 1     | 2,02                   | 8,80                               | -                   | *{Mo <sub>12</sub> Br}             |
| L-Gln                     | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C(O)NH <sub>2</sub> | 2     | 2,17                   | 9,13                               | -                   | *{Mo <sub>6</sub> }                |
| L-Orn                     | -(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>     | 3     | 1,71                   | 8,69                               | 10,76               | {Mo <sub>13</sub> V <sub>5</sub> } |
| bez dodatka aminokiseline |                                                      |       |                        |                                    |                     | {Mo <sub>8</sub> V <sub>4</sub> }  |

Rezultati upućuju da L-asparaginska kiselina sprečava rast polinuklearne okso vrste u odnosu na reakciju bez dodatka aminokiseline, iz koje je izolirana dodekanuklearna miješana vrsta. Polinuklearnom intermedijarna vrsta izolirana iz reakcije s L-asparaginskom kiselinom, u kojoj je aspartatni derivat liganda pentadentatno koordinira atom vanadija i oba atoma

molibdena, čime dodatno stabilizira polinuklearnu vrstu i usmjerava prema nastanku heksamolibdatnog aniona Lindquistovog tipa. L-ornitin, pak, pogoduje nastanku miješanih vrsta oktadeka nuklearnosti. Polioksomolibdatne vrste nastaju pri nižim pH vrijednostima, što nije karakteristično za polioksovanadate, stoga je nastanak molibdatne vrste u reakciji s L-asparaginskom kiselinom u skladu sa očekivanjima. Nastanak molibdovanadata u reakciji s L-ornitinom (koja sadrži bazičnu amino skupinu) i bez dodatka aminokiseline, je u skladu s podacima dostupnim u literaturi.

## § 5. ZAKLJUČAK

- I.** Ispitane su reakcije  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  s odabranim aminokiselinama (D,L-asparaginom, L-glutaminom i L-ornitinom). Ispitivane reakcije provedene su bez prisustva kisika:
- Reakcijom  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  s D,L-asparaginom u metanolu kao otapalu nastaje zrcalno simetričan dinuklearni kompleks, u kojem ligand (*E*)-4-amino-2-((2-oksido benziliden)amino)-4-oksobutanoat koordinira tridentatno molibdenov ion. Reakcijom nastaje i kumarin-3-karboksamid, kao produkt oksidativne dekarboksilacije i deaminacije katalizirane dioksomolibdenom(VI).
  - U reakciji koja je provedena u diklormetanu kao otapalu nastao je mononuklearni kompleks u kojem ligand (*R*)-(*E*)-4-amino-2-((2-oksido benziliden)amino)-4-oksobutanoat tetradentano koordinira molibden(VI).
  - U reakciji  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  s L-glutaminom nastaje sukcinamid kao produkt oksidativne dekarboksilacije.
  - U reakciji  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  s L-ornitinom nastaje mononuklearni diokso vrsta molibdena(VI) pri čemu nastali ligand (*S*)-2-(2-hidroksifenil)-3-((*E*)-(2-oksido benziliden)amino)piperidin-3-karboksilat koordinira ion molibdena tridentatno. Templatnom sintezom na ionu molibdena dolazi do stvaranja diimina iz 2 molekule salicilaldehida i L-ornitina, a potom dolazi do zatvaranja piperidinskog prstena nastalog Mannichovom reakcijom.
- II.** Ispitane su reakcije spojeva oksovanadija(IV) s odabranim aminokiselinama (D,L-asparaginom, L-glutaminom i L-ornitinom). Ispitivane reakcije provedene su uz prisustvo kisika.
- Reakcijom  $\text{VOSO}_4$  u smjesi etanol – voda uz dodatak natrijevog acetata s D,L-asparaginom izoliran je kumarin-3-karboksamid i dekavanadat. Dolazi do oksidativne dekarboksilacije i deaminacije aminokiselinskog ostatka te zatvaranja kumarinskog

prstena. Dokazano je kako nastajanje perokso vrsta vanadija ima ključnu ulogu u katalizi oksidativne dekarboksilacije.

- Reakcijom vanadil sulfata, salicilaldehida i L-glutamina izoliran je mononuklearni kompleks oksovanadija(V) u kojem ligand (S)-(E)-5-amino-2-((2-oksidobenziliden)amino)-5-oksopentanoat koordinira ion vanadija tridentatno.
- U reakciji  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  sa (S)-2-amino-5-((2-hidroksibenziliden)amino)pentanskom kiselinom, u metanolu kao otapalu, nastaje mononuklearni kompleks vanadija(V). Kompleks pripravljen reakcijom  $\text{VOSO}_4$  s L-ornitinom i salicilaldehidom iz smjese etanol-voda uz dodatak natrijevog acetata u molarnom omjeru 1:1:1 je analogne molekulske strukture. Kada je molarni omjer iznosio 1:1:2, nije bilo moguće izolirati stabilni produkt kojem bi bilo moguće odrediti sastav.

**III.** Ispitane su reakcije i opisani produkti molibdovanadata s četiri odabrane aminokiseline (L-asparaginskom kiselinom, D,L-asparaginom, L-glutaminom i L-ornitinom) i produkt reakcije bez dodatka aminokiseline u metanolu kao otapalu.

- U reakciji s L-asparatom nastala je tetranuklearna oksovrsta  $[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9]^{6-}$  u kojoj nastali iminski ligand, (S)-(E)-2-((2-oksidobenzilidene)amino)sukcinat koordinira atom vanadija tetradentatno. Promjena polazne oksovrste vanadija (IV) u vanadil sulfat nije utjecala na nastajanje polinuklearne okso vrste.
- Reakcijom  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  i  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  u molarnom omjeru 5:1 s L-asparaginskom kiselinom nastaje reducirana heksamolibdatna vrsta  $(\text{Bu}_4\text{N})_3[\text{Mo}^{\text{V}}\text{Mo}_5^{\text{VI}}\text{O}_{19}]$  Lindquistovog tipa, dok je kao drugi produkt iz matičnice izoliran  $\beta$ -oktamolibdatni anion  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{H}_3\text{O})\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$  u kojem je prisutna kiralnost P—uzvojnice, kao posljedica povezivanja oktamolibdatnih jedinica vodikovim vezama preko oksonijevog iona.
- Reakcijom amonijevog heptamolibdata,  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$ ,  $[\text{VO}(\text{acac})_2]$  s L-asparaginskom kiselinom nastaje produkt koji sadrži  $\beta$ -oktamolibdatni anion  $[\text{Mo}_4\text{O}_{13}(\text{NH}_4)\text{Mo}_4\text{O}_{13}]_n$  pri čemu dolazi do nastanka lančastog polimera a što je rezultat povezivanja oktamolibdata vodikovim vezama.

- Reakcijom s D,L-asparaginom, nastaje reducirana polioksomolibdatna vrsta Kegginovog tipa strukture  $[H_yBrMo^V_xMo^{VI}_{(12-x)}O_{40}]^{n-}$ , koja sadrži endohedarski bromidni anion.
- Reakcijom s L-glutaminom nastaje reducirana heksamolibdatna vrsta  $(Bu_4N)_3[Mo^VMo_5^{VI}O_{19}]$  Lindquistovog tipa.
- Reakcijom s L-ornitinom nastaje oktaidekanuklearna reducirana polioksosvrsta koja sadrži  $[Mo^V_xMo^{VI}_{13-x}V^{IV}_yV^V_{(5-y)}O_{62}Br]^{n-}$  anion *super*-Kegginovog tipa endohedarski bromidni ion. Kao drugi produkt reakcije nastaje i tetrabutylamonijev molibdovanadat  $[Mo_4V_6O_{28}]^{2-}$  dekavanadatnog tipa.
- U reakciji bez dodatka aminokiseline nastaje reducirana polioksosvrsta koja sadrži  $[BrMo^V_xMo^{VI}_{13-x}V^{IV}_5V^V_{(5-x)}O_{62}]^{n-}$  anion Kegginovog tipa i endohedarski bromidni ion.
- Kelatni potencijal bočnog lanca aminokiseline u ovisnosti o  $pK_a$  vrijednosti sprečava ili potiče rast polioksometalatih vrsta. Ukoliko je bočni lanac aminokiseline neutralnih kiselobaznih svojstava, polioksosvrste nastaju uz nisko iskorištenje. Uočeno je da bočni lanac L-asparaginske kiseline koja sadrži karboksilnu skupinu, sprečava rast polinuklearne okso vrste, dok bočni lanac L-ornitina, koji sadrži bazičnu amino skupinu potiče rast polinuklearnih vrsta
- U svim polioksosvrstama Kegginovog i *super*-Kegginovog tipa strukture aniona prisutan je endohedarski bromidni anion.

#### IV.

- Bez prisustva okso vrste molibdena(VI) ili vanadija(IV) ne dolazi do stvaranja imina reakcijom amino skupine  $\alpha$ - atoma ugljika aminokiseline i salicilaldehida.
- Iz reakcija provedenih u diklormetanu i trifluoroetanolu kao otapalu nisu izolirane molibdovanadatne oksovrste zbog male električne permitivnosti otapala.

## § 6. POPIS OZNAKÂ, KRATICÂ I SIMBOLÂ

|                                        |                                                                                   |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Bu <sub>4</sub> N                      | tetrabutilamonijev ion                                                            |
| D,L-asn                                | D,L-asparagin                                                                     |
| Et <sub>3</sub> NH                     | triethylamonijev ion                                                              |
| gly                                    | glicin                                                                            |
| L2                                     | (S)-(E)-2-((2-oksido benzilidene)amino)sukcinat                                   |
| L3                                     | (E)-4-amino-2-((2-oksido benziliden)amino)-4-oksobutanoat                         |
| L4                                     | (S)-(E)-5-amino-2-((2-oksido benziliden)amino)-5-oksopentanoat                    |
| L5                                     | (S)-2-amino-5-((2-hidroksiben ziliden)amino)pentanska kiselina                    |
| L5cikl                                 | (S)-2-(2-hidroksifenil)-3-((E)-(2-oksido benziliden)amino)piperidin-3-karboksilat |
| L-asp                                  | L-asparaginska kiselina                                                           |
| L-gln                                  | L-glutamin                                                                        |
| L-orn                                  | L-ornitin                                                                         |
| [MoO <sub>2</sub> (sal) <sub>2</sub> ] | dioksobis(salicilaldehidato)molibden(VI)                                          |
| py                                     | piridin                                                                           |
| sal <sub>2</sub> L5                    | (S)-2-((2-hidroksiben ziliden)amino)-5-((2-oksido benzilidene)amino)pentanoat     |
| [VO(acac) <sub>2</sub> ]               | oksobis(pentan-2,4-dionato)vanadij(IV)                                            |

## § 7. LITERATURNI IZVORI

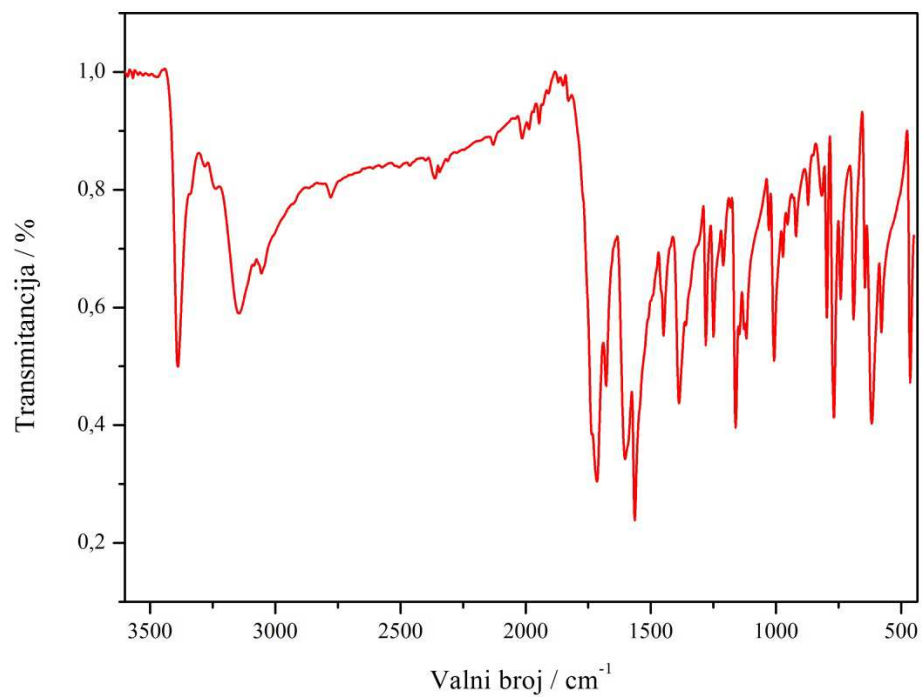
1. A. M. Evangelou, *Crit. Rev. Oncol. Hematol.* **42** (2002) 249–265.
2. H. Sakurai, Y. Kojima, Y. Yoshikawa, K. Kawabe i H. Yasui, *Coord. Chem. Rev.* **226** (2002) 187–198.
3. C. Li, W. Qi, H. Cao, Y. Qi, S. Zhang, S. Xu, J. Sun i S. Guo, *Biomed. Pharmacoter.* **79** (2016) 78–86.
- 4 M.J. Romao, *Dalton Trans.* (2009) 4053–4068.
5. D. Rehder, *Inorg. Chem. Commun.* **6** (2003) 604–617.
6. D. Rehder, *Chem. Int. Ed. Engl.* **30** (1991) 148–154.
7. D. Fenske, M. Gnida, K. Schneider, W. Meyer-Klaucke, J. Schemberg, V. Henschel, A.K. Meyer, A. Knochel i A. Muller, *Chem.Biochem* **6**(2005) 405–413.
8. J.B. Howard, D.C.Rees, *Chem. Rev.* **96** (1996) 2695–2982.
9. J. F. Keggin, *Nature* **132** (1933) 351.
10. J. F. Keggin, *F. Proc. R. Soc. Lond. A Mater.* **144** (1934) 75–100.
11. M. Hutin, M. H. Rosnes, D.–L. Long i L. Cronin, *Comprehensive Inorganic Chemistry II* **2** (2013) 241–269.
12. X. López, J. J. Carbo, C. Bó i J. M. Poblet, *Chem. Soc. Rev.* **41** (2012) 7537–7571.
13. D.–L. Long, P. Kögerler, L. J. Farrugia i L. Cronin, *Angew. Chem. Int. Ed.* **42** (2003) 4180–4183.
14. D.–L. Long i L. Cronin, *Chem. Eur. J.* **12** (2006) 3698–3706.
15. M. T. Pope i A. Müller, *Angew. Chem. Int. Ed Engl.* **30** (1991) 34–48.
16. A. Müller, E. Krickemeyer, J. Meyer, H. Bögge, F. Peters, W. Plass, E. Diemann, S. Dilingier, F. Nonnenbruch, M. Randerath i C. Menke, *Angew. Chem. Int. Ed Engl.* **34** (1995) 2122–2124.
17. <http://www.uni-bielefeld.de/chemie/emeriti/ac1-mueller/> (preuzeto 13. travnja 2017.)
18. <http://www.uni-bielefeld.de/chemie/emeriti/ac1-mueller/AMU/researchdetail.htm> (preuzeto 13. travnja 2017.)
19. A. Müller, E. Krickemeyer, H. Bögge, M. Schmidtman i F. Peters, *Angew. Chem. Int. Ed.* **37** (1998) 3359–3363.
20. E. Coronado, C. Giménez–Saiz, C. J. Gómez–García, *Coord. Chem. Rev.* **249** (2005) 1776–1796.
21. G. Absillis, E. Cartuyvels, R. Van Deun i T. N. Parac–Vogt, *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 17400–17408.
22. C. Yang, Q. Jin, H. Zhang, J. Liao, J. Zhu, B. Yu i J. Deng, *Green Chem.* **11** (2009) 1401–1405.

23. E. Cartuyvels, G. Absillis i T. N. Parac-Vogt, *Chem. Commun.* (2008) 85–87.
24. W. Avansi Jr., C. Ribeiro, E. R. Leite i V. R. Mastelaro, *Cryst. Growth Des.* **9** (2009) 3626–3631.
25. B. Hasenknopf, K. Micoine, E. Lacôte, S. Thorimbert, M. Malacria i R. Thouvenot, *Eur. J. Inorg. Chem.* **2008** (2008) 5001–5013.
26. J. Fuchs i R. Palm, *Z. Naturforsch., B: Chem. Sci.* **43** (1988) 1529–1537.
27. A. G. Sykes (ur.), *Advances in Inorganic Chemistry*, vol. 49, *Academic Press*, San Diego, 2000.
28. Y. P. Jeannin, *Chem. Rev.* **98** (1998) 51–76.
29. M. T. Pope, *Heteropoly and Isopoly Oxometalates*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
30. Q. Li, P. F. Wu, Y. Xia, Y. G. Wei i H. Y. Guo, *J. Organomet. Chem.* **691** (2006) 1223.
31. Y. Zhu, Z. Xiao, N. Ge, N. Wang, Y. Wei i Y. Wang, *Cryst. Growth Des.* **6** (2006) 1620–1625.
32. L. Xu, M. Lu, B. B. Xu, Y. G. Wei, Z. H. Peng i D. R. Powell, *Angew. Chem. Int. Ed.* **41** (2002) 4129.
33. T. Yamase i T. Ikawa, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **50** (1977) 746.
34. A. Don i T. J. R. Weakley, *Acta Crystallogr. Sect. B: Struct. Sci.* **37** (1981) 451.
35. Y. Ohashi, K. Yanagi, Y. Sasada i T. Yamase, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **55** (1982) 1254.
36. P. Román, J. M. Gutiérrez-Zorrilla, M. Martínez-Ripoll i S. García-Blanco, *Transition Met. Chem.* **11** (1986) 143.
37. D. Hargman, P. J. Zapf i J. Zubieta, *Chem. Commun.* (1998) 1283.
38. A. Bridgeman, *J. Phys. Chem. A* **106** (2002) 12151.
39. L. Wang, P. Yin, J. Zhang, J. Hao, C. Lv, F. Xiao i Y. Wei, *Chem. Eur. J.* **17** (2011) 4796 – 4801.
40. J. Kobayashi, R. Kawahara, S. Uchida, S. Koguchi i Takeru Ito, *Int. J. Mol. Sci.* **17** (2016), 994.
41. R. S. Rarig i J. Zubieta, *Inorg. Chim. Acta* **312** (2001) 188–194.
42. C. D. Wu, C. Z. Lu, H. H. Zhuang i J. S. Huang, *Inorg. Chem.* **41** (2002) 5636.
43. D. R. Xiao, Y. Hou, E. B. Wang, S. T. Wang, Y. G. Li, L. Xu i C. W. Hu, *Inorg. Chim. Acta* **357** (2004) 2525.
44. D. G. Allis, E. Burkholder i J. Zubieta, *Polyhedron* **23** (2004) 1145.
45. D. G. Allis, R. S. Rarig, E. Burkholder i J. Zubieta, *J. Mol. Struct.* **688** (2004) 11.
46. Y. Q. Lan, S. L. Li, X. L. Wang, K. Z. Shao, D. Y. Du, H. Y. Zang i Z. M. Su, *Inorg. Chem.* **47** (2008) 8179.
47. S. Ikegami i A. Yagasaki, *Materials* **2** (2009) 869–875.
48. B. Chen, Z. Lin, B. Wang, X. Feng, L. Fan, S. Yang, X. Huang i C. Hu, *Cryst. Eng. Comm.* **15** (2013) 7410–7413.
49. S. L. Li, Y. Q. Lan, J. F. Ma, J. Yang, X. H. Wang i Z. M. Su, *Inorg. Chem.* **46** (2007) 8283.
50. J. E. Molinari, L. Nakka, T. Kim i I. E. Wachs, *ACS Catal.* **1** (2011) 1536–1548.

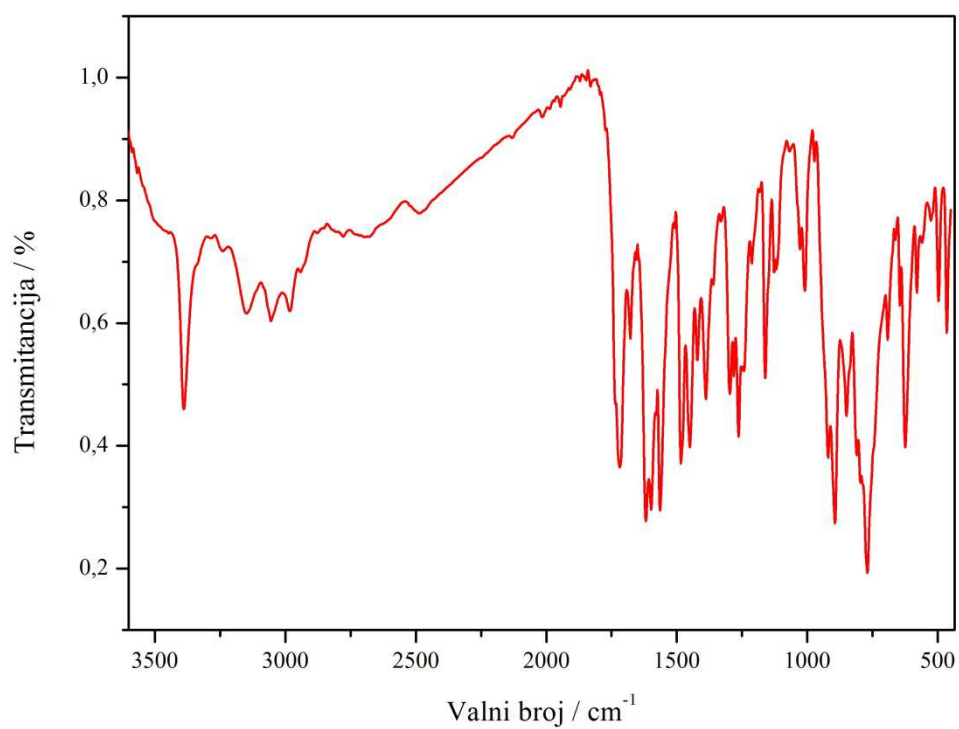
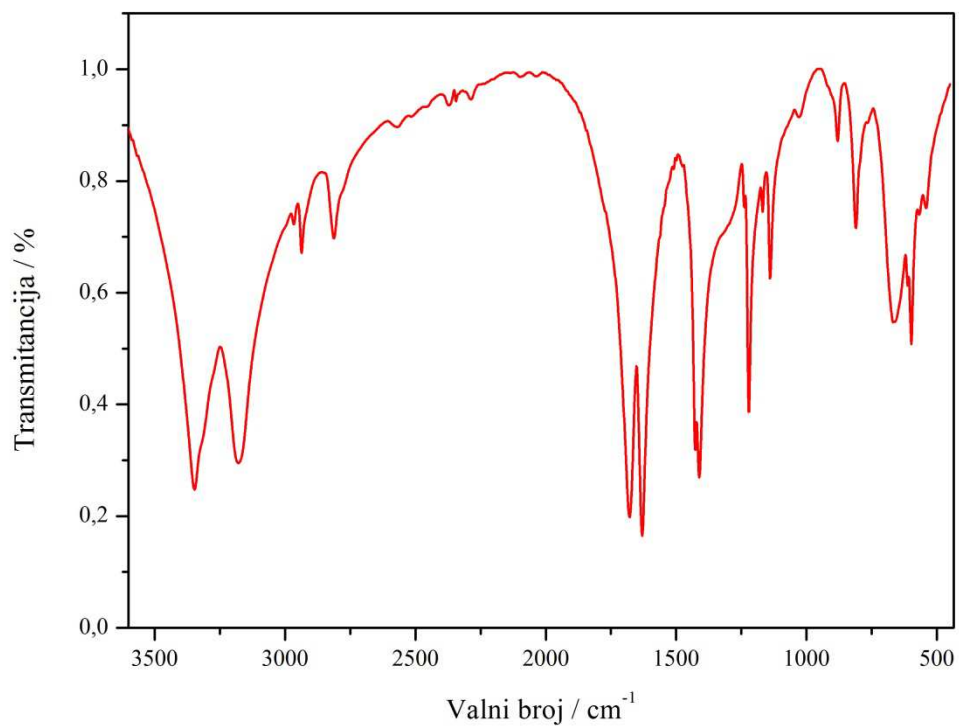
51. F. F. Bamoharram, *Molecules* **14** (2009) 3214–3221.
52. P. Mothé-Esteves, M. Maciel Pereira, J. Arichi i B. Louis, *Cryst. Growth Des.* **10** (2010) 371–378.
53. Y. Xu, L.–B. Nie, D. Zhu, Y. Song, G.–P. Zhou i W.–S. You, *Cryst. Growth Des.* **7** (2007) 925–929.
54. L. Chen, F. Jiang, M. Wu, N. Li, W. Xu, C. Yan, C. Yue i M. Hong, *Cryst. Growth Des.* **8** (2008) 4092–4099.
55. K. Yu. Monakhov, W. Bensch i P. Kögerler, *Chem. Soc. Rev.* **44** (2015) 8443–8483.
56. W. Yang, C. Lu i H. Zhuang, *Inorg. Chem. Commun.* **5** (2002) 865–868.
57. N. Strukan, M. Devčić, B. Kamenar i G. Giester, *Acta. Cryst.* **E58** (2002) 1114–1116.
58. M. Cindrić, N. Strukan, Z. Veksli i B. Kamenar, *Polyhedron* **15** (1996) 2121–2126.
59. M. Cindrić, B. Kamenar i N. Strukan, *Polyhedron* **14** (1995) 1045–1049.
60. B. Kamenar, M. Cindrić i N. Strukan, *Polyhedron* **13** (1994) 2271–2275.
61. N. Strukan, M. Cindrić i B. Kamenar, *Polyhedron* **16** (1997) 629–634.
62. T. Ueda, Y. Nishimoto, R. Saito, M. Ohnishi i J. Nambu, *Inorganics* **3** (2015) 355–369.
63. C.–M. Liu, D.–Q. Zhang, M. Xiong i D.–B. Zhu, *Chem. Commun.* **0** (2002) 1416–1417.
64. X.–M. Zhang, *Coord. Chem. Rev.* **249** (2005) 1201–1219.
65. B. Pignataro (ur.), *New Strategies in Chemical Synthesis and Catalysis*, 1. izd., Wiley–CH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
66. D.–L. Long, E. Burkholder i L. Cronin, *Chem. Soc. Rev.* **36** (2007) 105–121.
67. T.M.Che, V.W. Day, L.C. Francesconi, M.F. Fredrich, W.G. Klemperer i W. Shum *Inorg.Chem.* **24** (1985) 4055–4062.
68. Y. Kikiawa, K. Ogihara i Y. Hayashi, *Inorganics* **3** (2015) 295–308.
69. M. Cindrić, T. Kajfež Novak, S. Kraljević, M. Kralj i B. Kamenar, *Inorg. Chim. Acta* **359** (2006) 1673–1680.
70. B. Kamenar, M. Penavić, B. Korpar–Čolig i M. Cindrić, *Z. Kristallogr.* **210** (1995) 535.
71. M. Cindrić, N. Strukan, M. Devčić i B. Kamenar, *Inorg. Chem. Commun.* **2** (1999) 558–560.
72. M. Inoue i T. Yamase, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **68** (1995) 3055–3063.
73. U. Kortz, M. G. Savelieff, F. Y. A. Ghali, L. M. Khalil, S. A. Maalouf i D. I. Sinno, *Angew. Chem. Int. Ed.* **41** (2002) 4070–4073.
74. R. A. Rowe i M. M. Jones, *Inorg. synth.* **13** (1972) 181.
75. K. Yamanuochi, S. Yamada, *Inorg. Chim. Acta* **9** (1974) 83–86.
76. Z. Zeying, S. Meicheng, Z. Lin, B. Chunan, *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* **3** (1985) 65–67.
77. R. Grybos, A. Samotus, N. Popova i Bogolitsyn, *Transition Met. Chem.* **22** (1997) 61.

78. B. Kamenar, M. Cindrić i N. Strukan, *Acta. Cryst.* **C52** (1996) 1338–1341.
79. M. R. Maurya, *Coord. Chem. Rev.* **237** (2003) 163–181.
80. M. E. Mohamed, A. M. A. Mohammed, *ILCPA* **10** (2013) 1–17.
81. M. Cindrić, G. Galin, D. Matković-Čalogović, P. Novak, T. Hrenar, I. Ljubić, T. Kajfež-Novak, *Polyhedron* **28** (2009) 562–568.
82. I. Cavaco, J. C. Pessoa, M. T. Duarte, R. D. Gillard, P. Matias, *Chem. Commun.* (1996) 1365–1366.
83. J. Costa Pessoa, I. Tomaz, T. Kiss i P. Buglyó, *J. Inorg. Biochem.* **84** (2001) 259–270.
84. J. Livage, *Coord. Chem. Rev.* **178–180** (1998) 999–1018.
85. S. K. Adeniyi-Jones i M. L. Karnovsky, *J. Clin. Invest.* **68** (1981) 365–373.
86. M. A. Pietsch i M. B. Hall, *Inorg. Chem.* **35** (1996) 1273–1278.
87. Z. Xiao, M. A. Bruck, J. H. Enemark, C. G. Young i A. G. Wedd, *Inorg. Chem.* **35** (1996) 7508–7515.
88. G. C. Tucci, J. P. Donahue i R. H. Holm, *Inorg. Chem.* **37** (1998) 1602–1608.
89. M. Cindrić, N. Strukan, V. Vrdoljak, M. Devčić i B. Kamenar, *J. Coord. Chem.* **55** (2002) 705–710.
90. H. Sakurai, Y. Kojima, Y. Yoshikawa, K. Kawabe i H. Yasui, *Coord. Chem. Rev.* **226** (2002) 187–198.

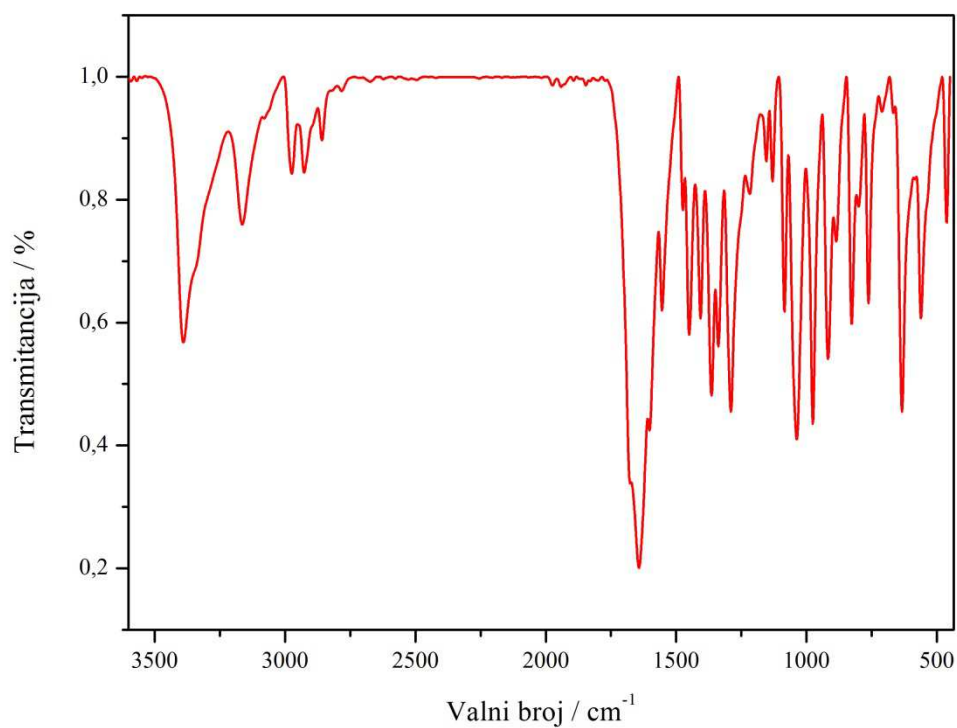
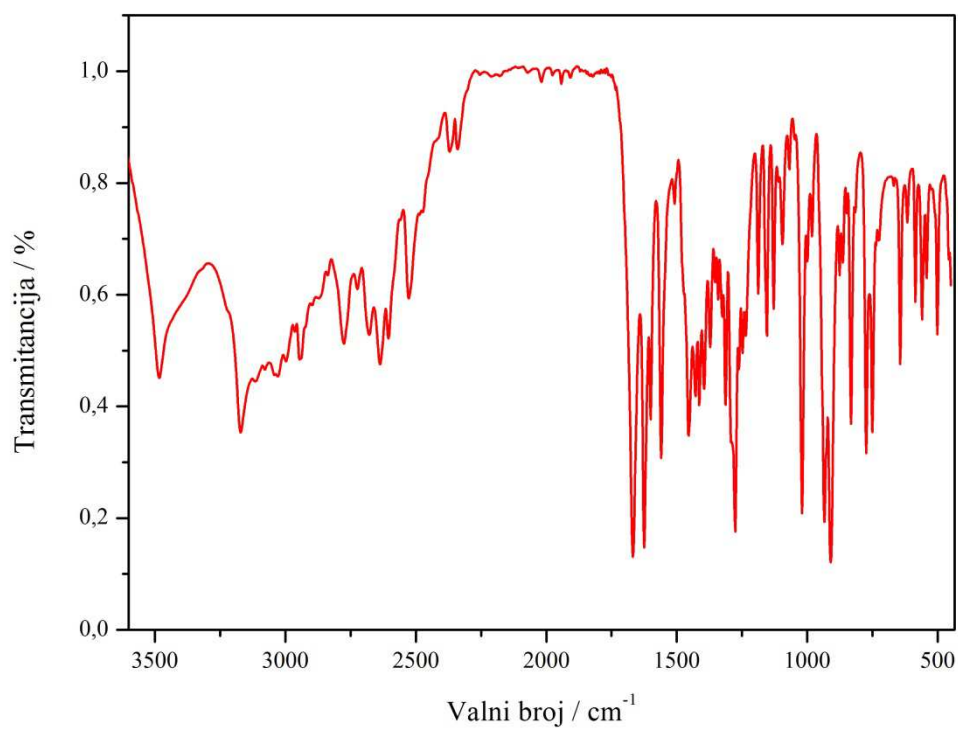
## § 8. DODATAK

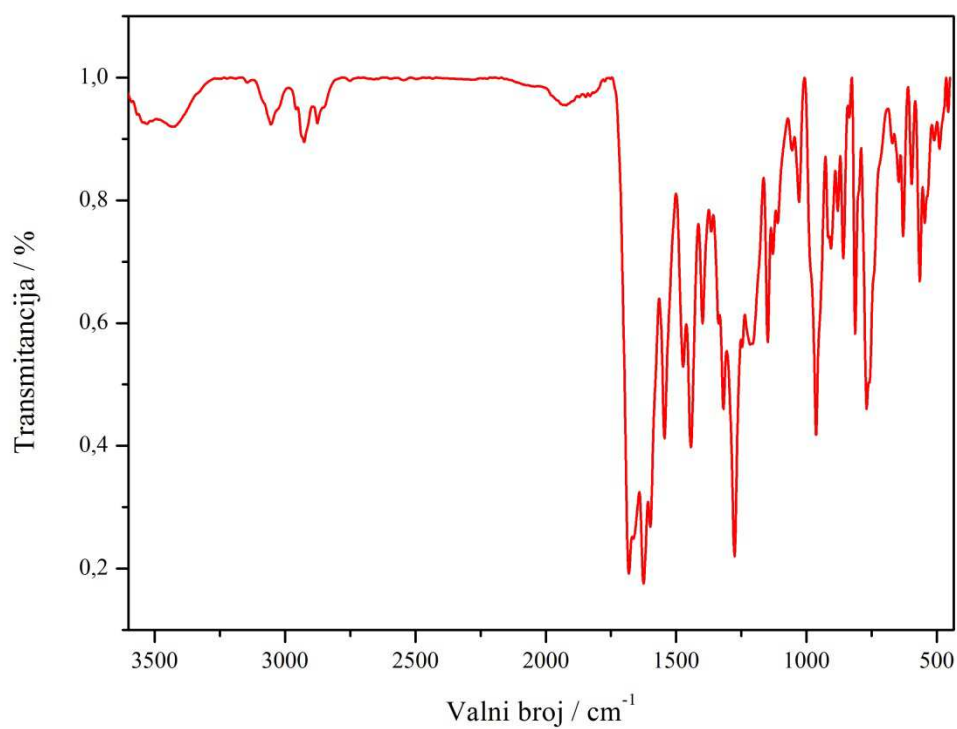


Slika I. Infracrveni spektar kumarin-3- karboksamida

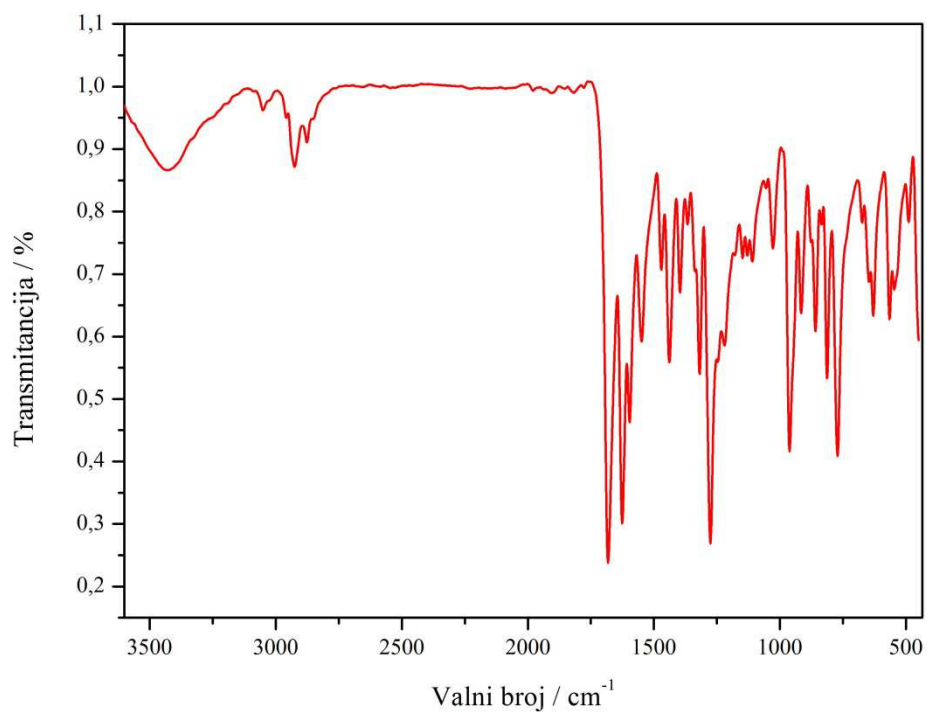
Slika II. Infracrveni spektar  $[\text{Mo}_2\text{O}_4(\text{L}3)_2]$ 

Slika III. Infracrveni spektar sukcinamida

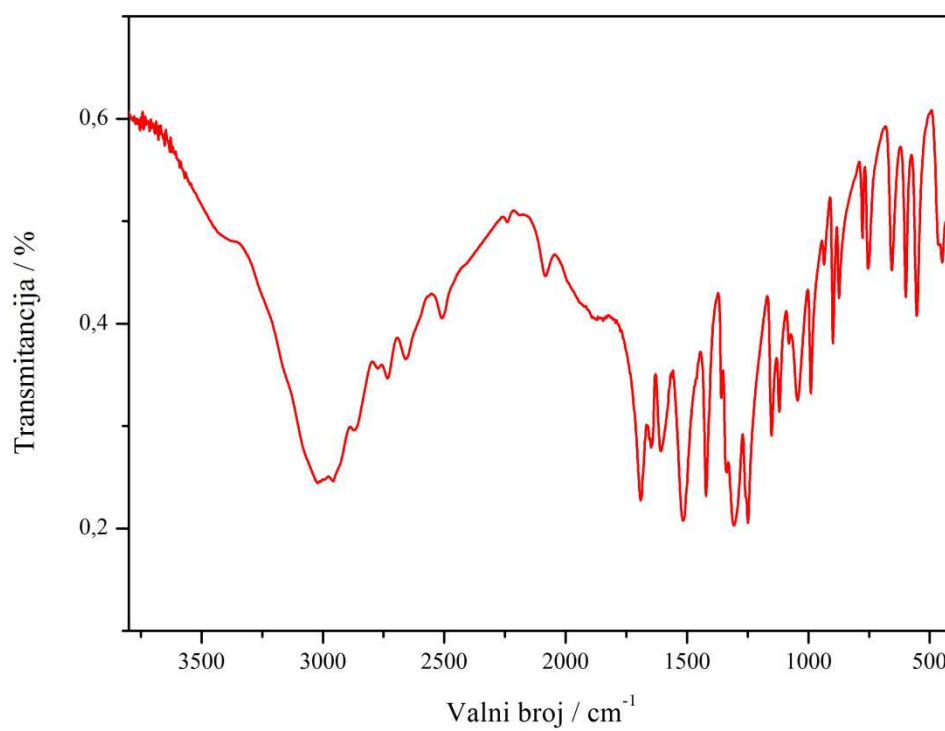
Slika IV. Infracrveni spektar [VO(L4)(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)(HOC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)].Slika V. Infracrveni spektar [MoO<sub>2</sub>(L5cicl)(CH<sub>3</sub>OH)]Cl · CH<sub>3</sub>OH



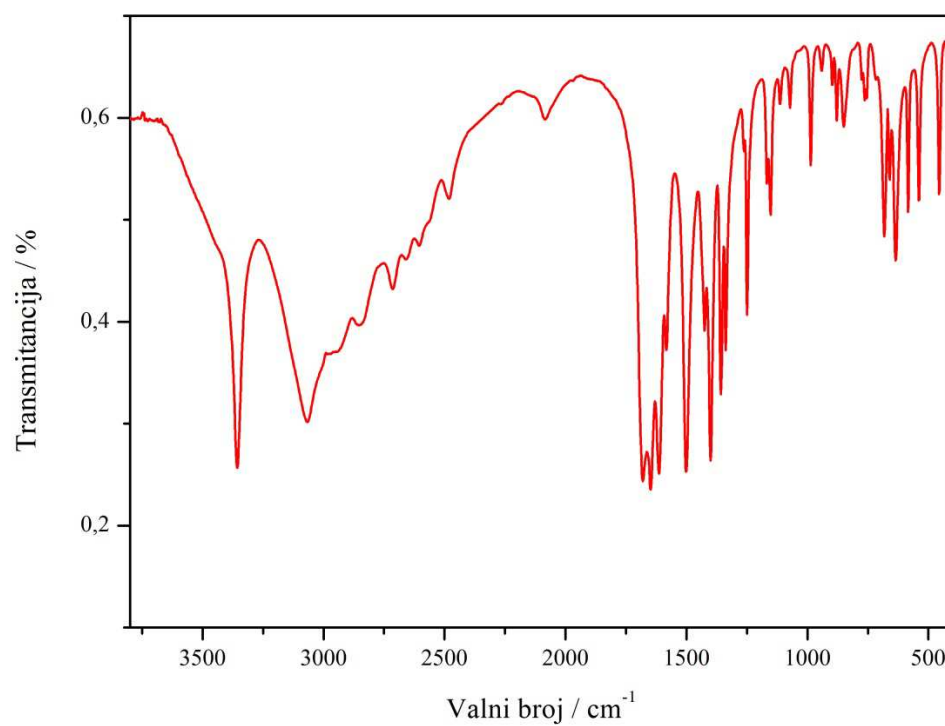
Slika VI. Infracrveni spektar produkta izoliranog iz reakcije vanadilsulfata, salicilaldehida i L-ornitinhidroklorida u molarnom omjeru 1:2:1



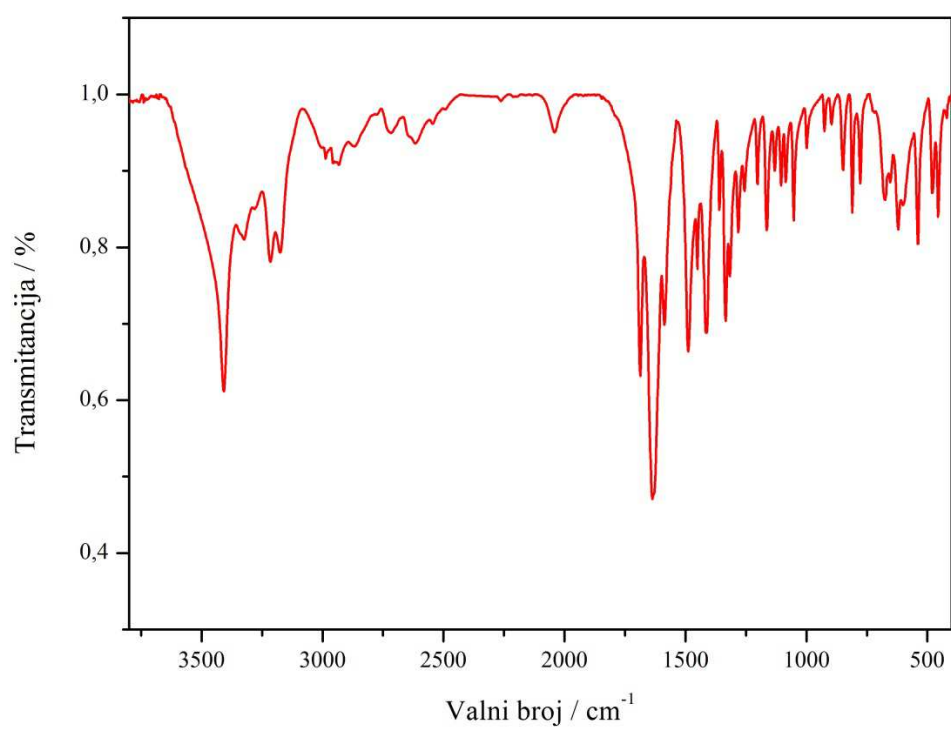
Slika VII. Infracrveni spektar  $[\text{VO}(\text{OCH}_3)(\text{sal}_2\text{L}_5)]$



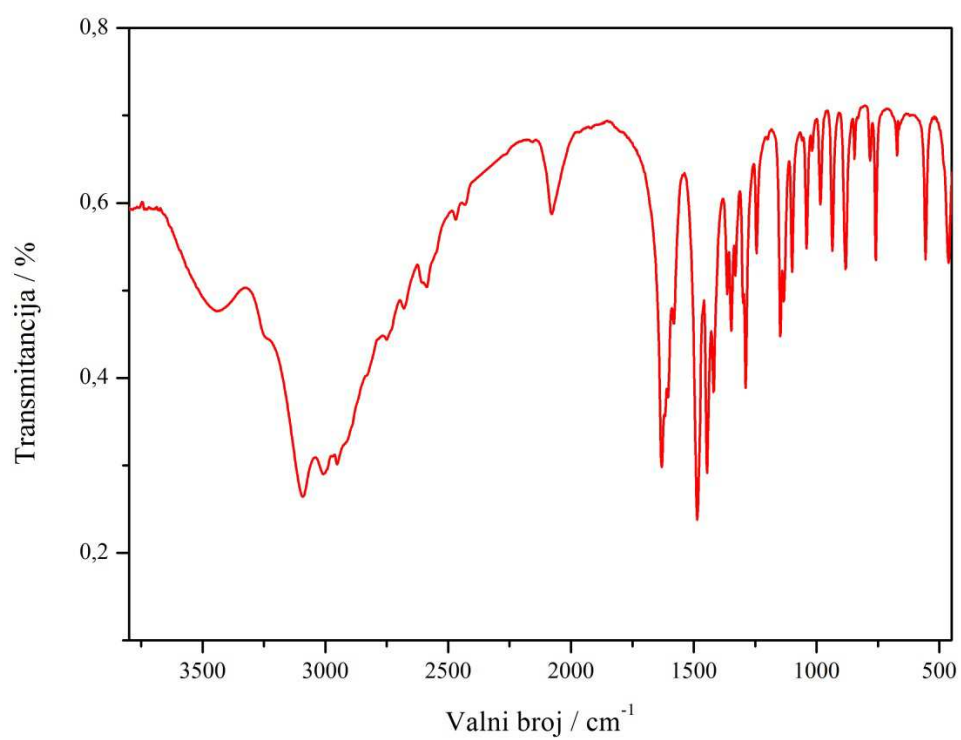
Slika VIII. Infracrveni spektar L-asparaginske kiseline



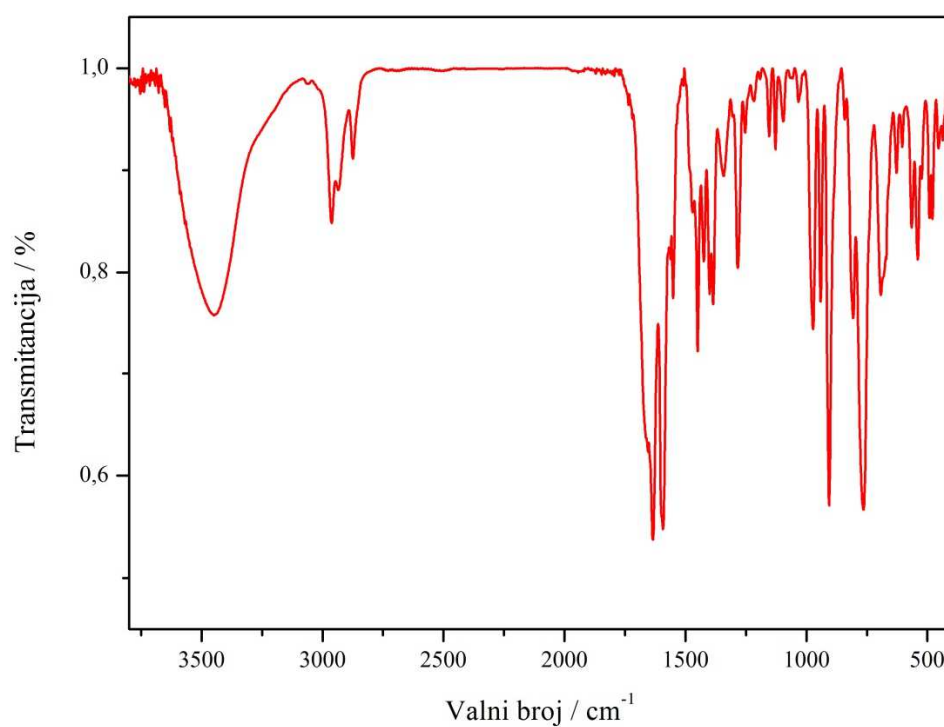
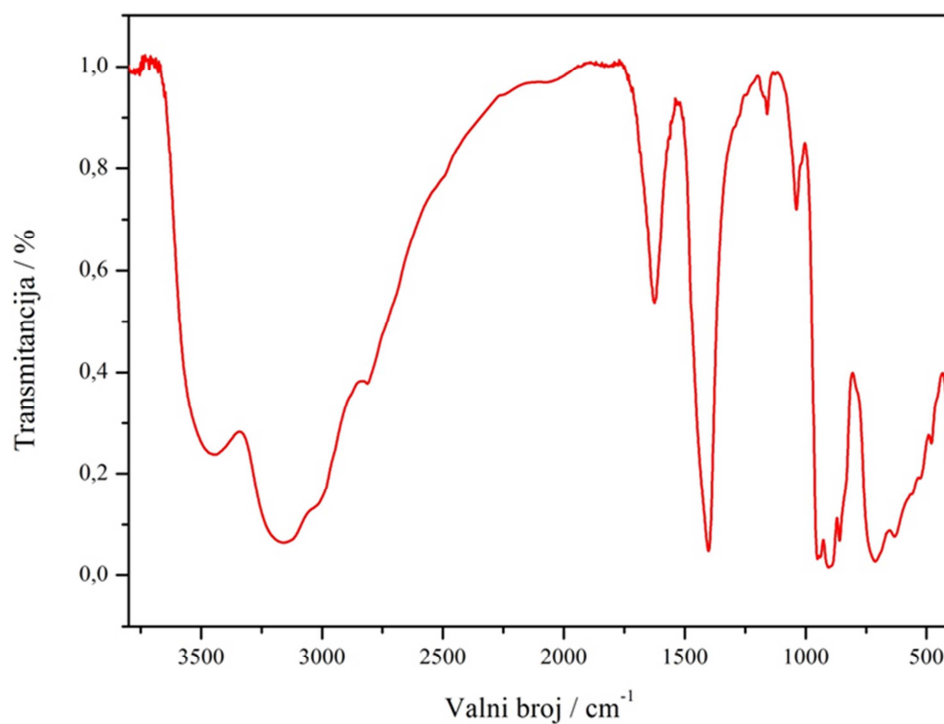
Slika IX. Infracrveni spektar D,L-asparagina

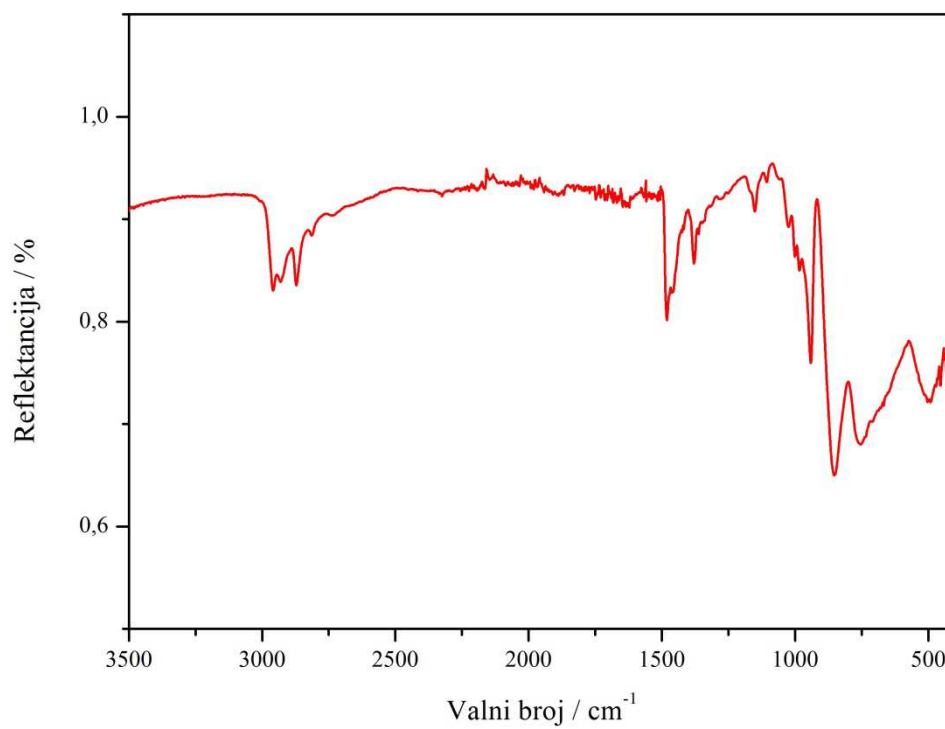
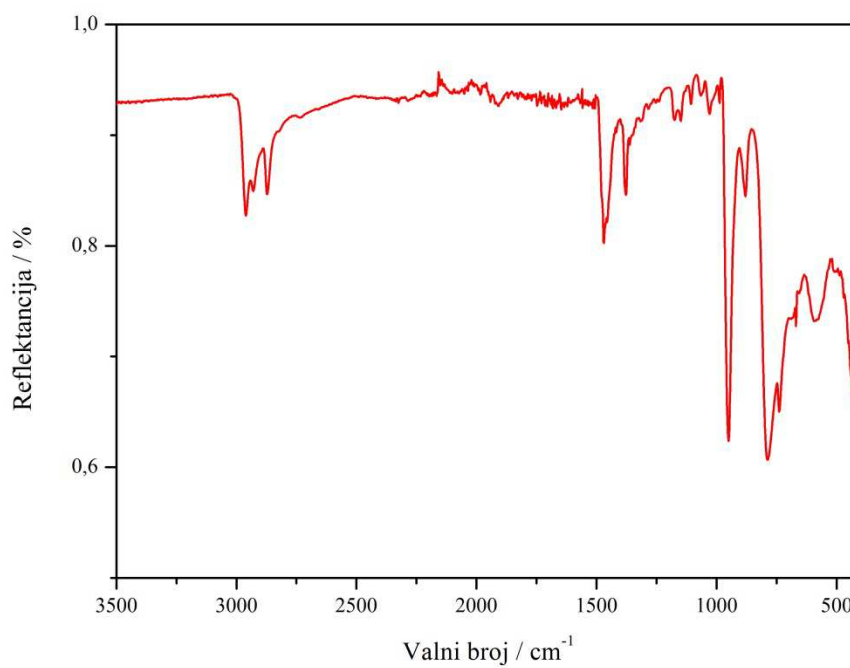


Slika X. Infracrveni spektar L-glutamina

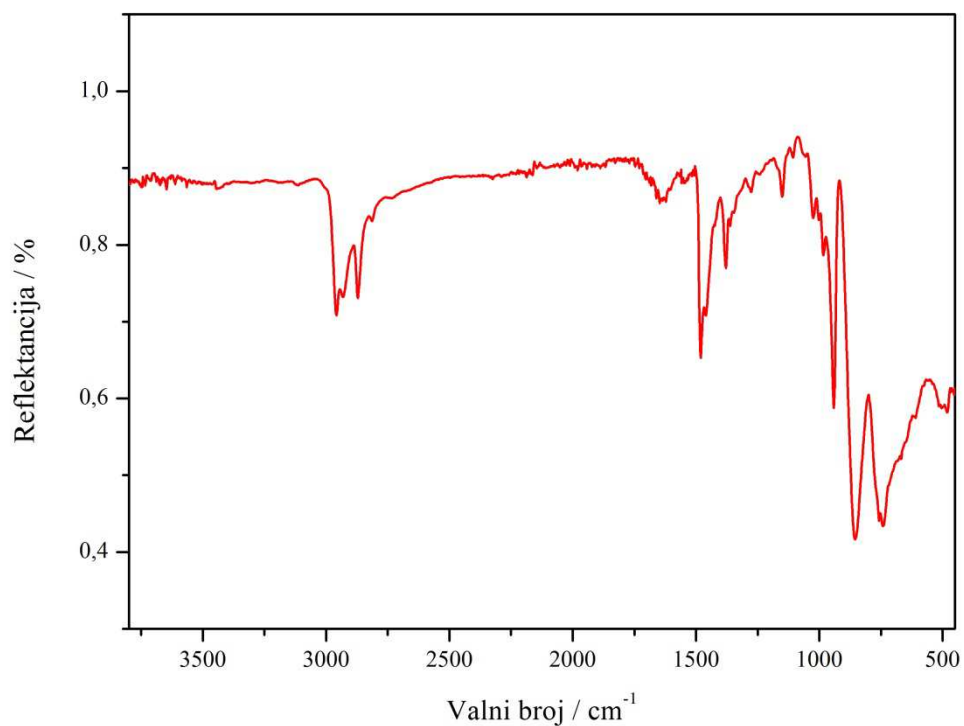


Slika XI. Infracrveni spektar L-ornitin hidroklorida

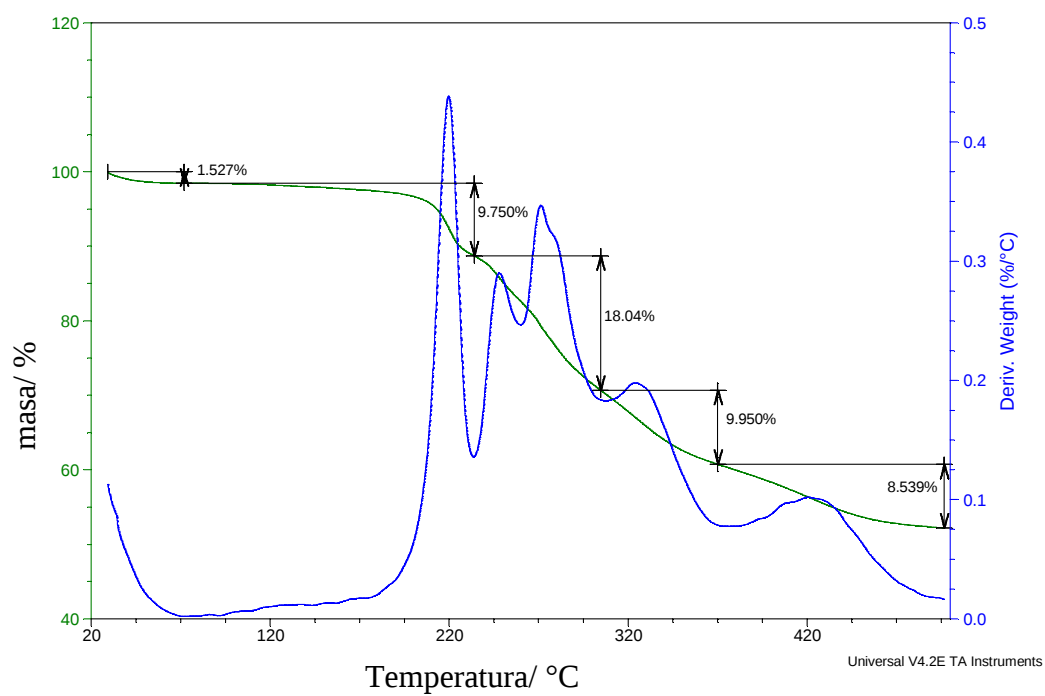
Slika XII. Infracrveni spektar  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L}2)_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$ Slika XIII. Infracrveni spektar  $(\text{NH}_4)_y[\beta\text{-Mo}^{\text{V}}\text{Mo}^{\text{VI}}_{(8-x)}\text{O}_{26}] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Slika XIV. IR spektar  $[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_y^{\text{IV}}\text{V}_{(5-y)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$ 

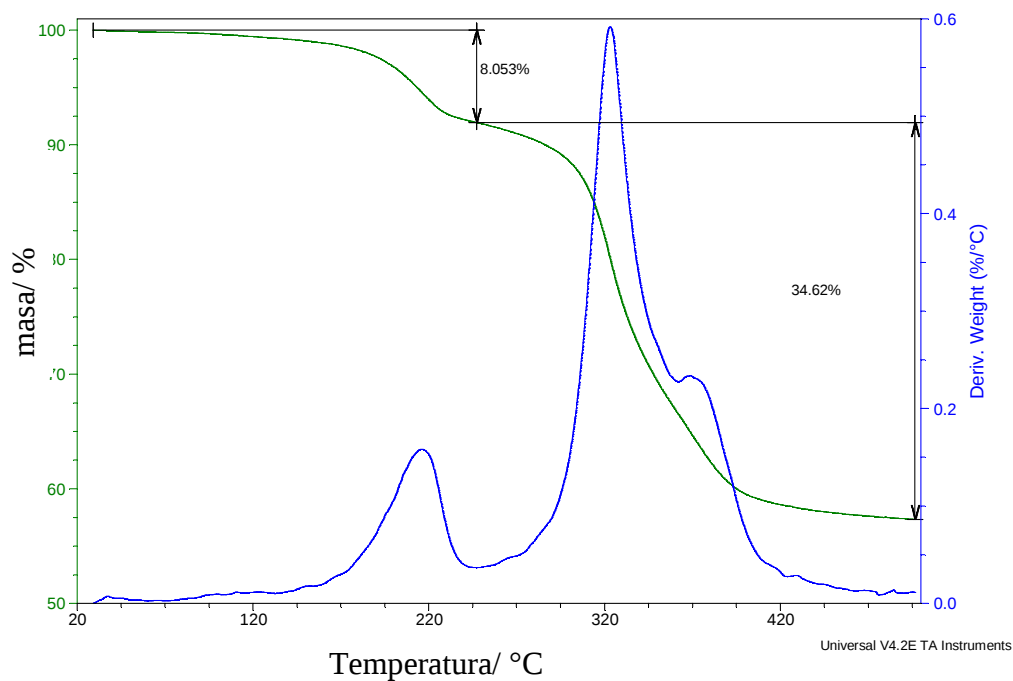
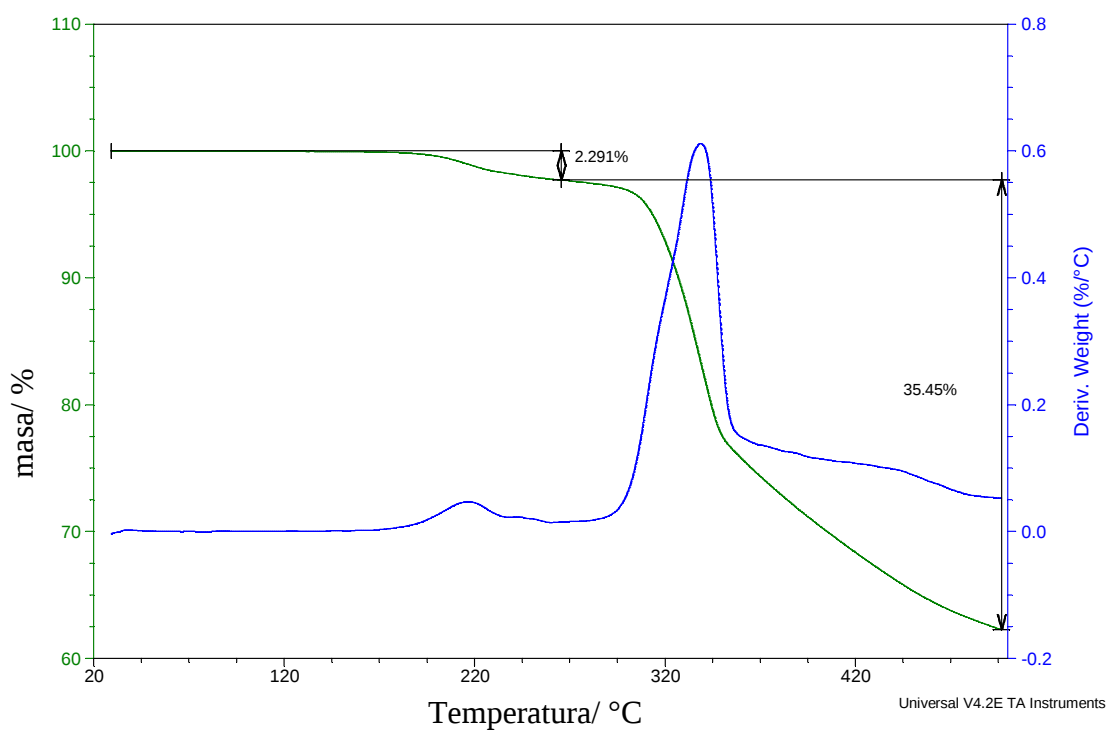
Slika XV. IR spektar [

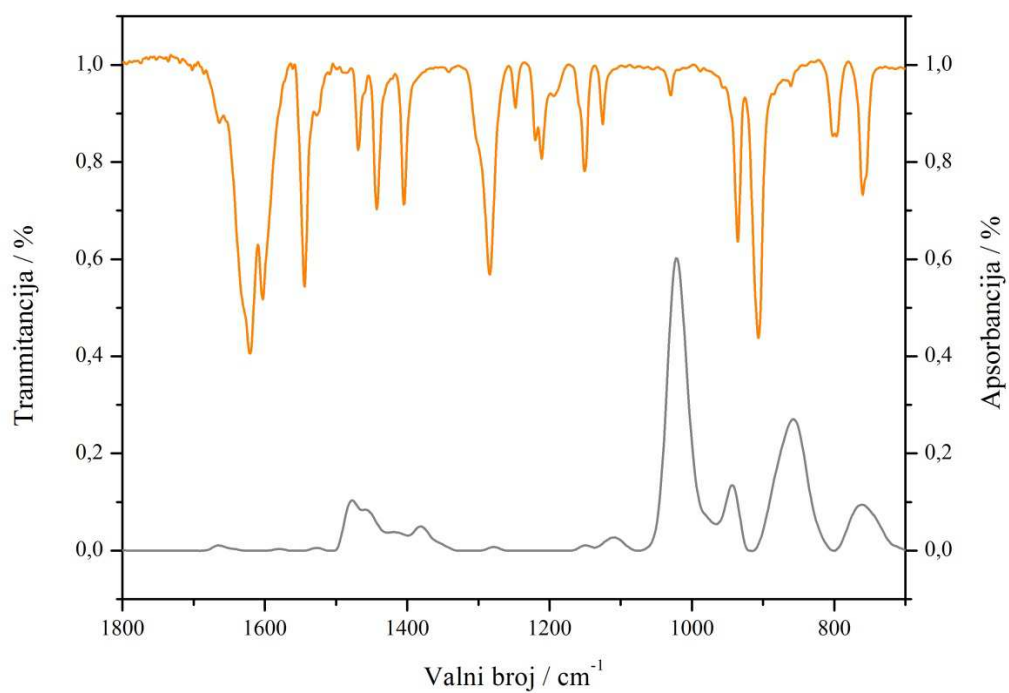


Slika XVI. IR spektar  $[\text{Mo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{13-x}^{\text{VI}}\text{V}_5^{\text{IV}}\text{V}_{(5-x)}^{\text{V}}\text{O}_{62}\text{Br}]^{n-}$

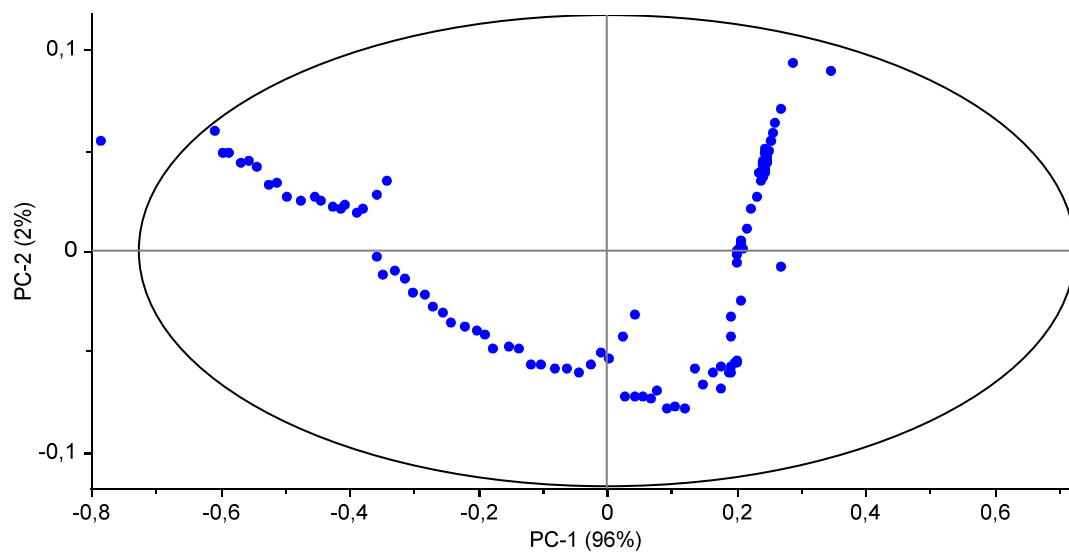


Slika XVII. TGA/DSC krivulja za  $(\text{Bu}_4\text{N})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{Mo}_2\text{V}_2\text{O}_9(\text{L2})_2] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$

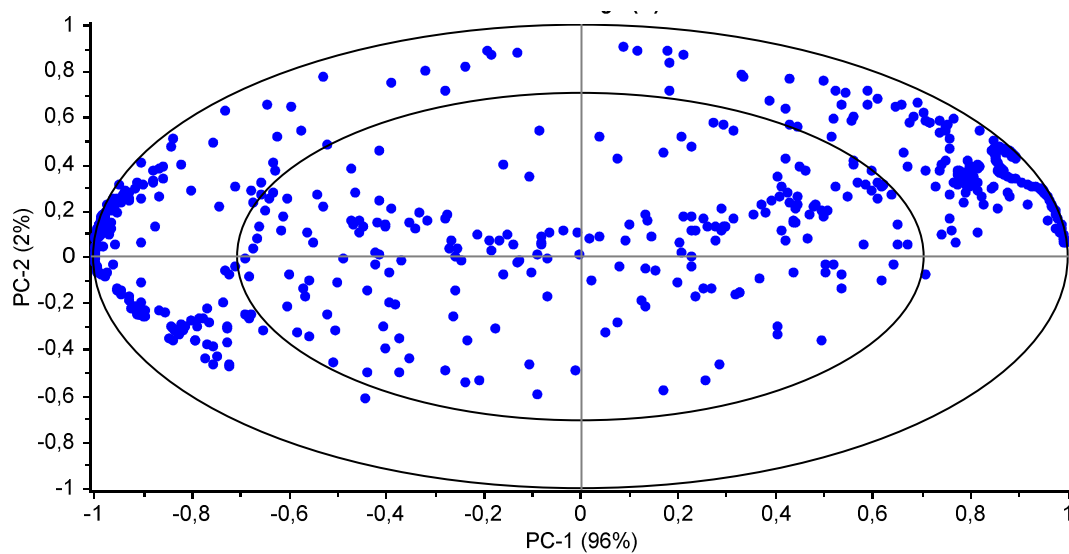
Slika XVIII. TGA/DSC krivulja za  $(\text{Bu}_4\text{N})_n [\text{BrMo}_x^{\text{V}}\text{Mo}_{(12-x)}^{\text{VI}}\text{O}_{44}]$ Slika XIX. TGA/DSC krivulja za  $[\text{Mo}_4\text{O}_{11}(\text{L3H})_2]$



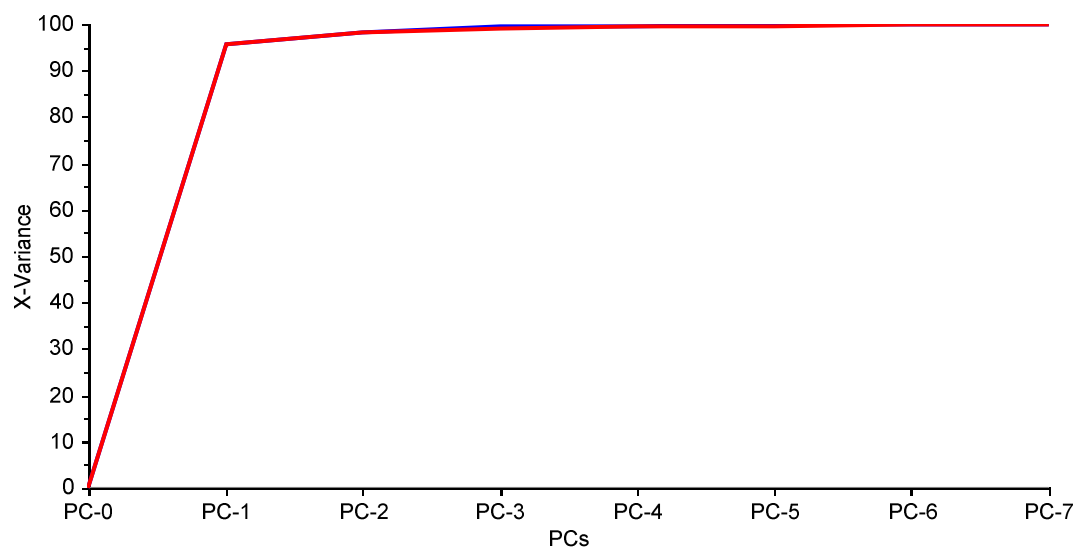
Slika XX: Usporedba IR spektara reakcijske smjese bez dodatka aminokiseline u vremenu  $t=10\text{h}$  (sivo) i  $[\text{MoO}_2(\text{sal})_2]$  (narančasto)



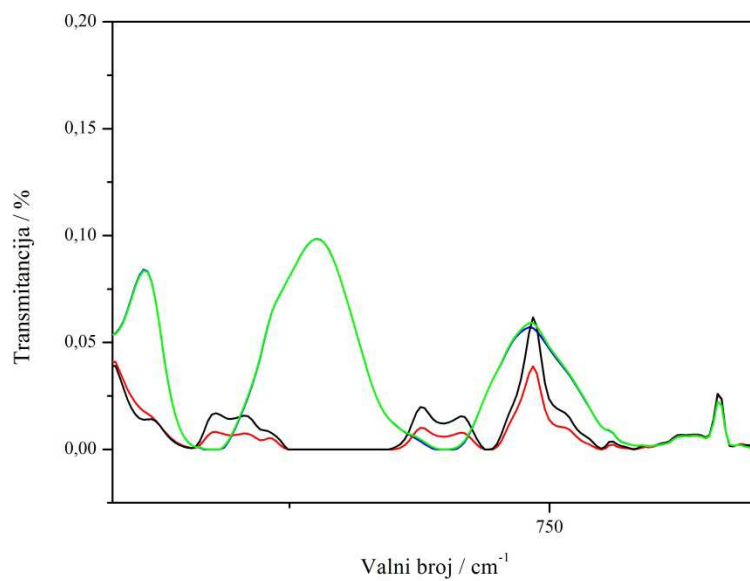
Slika XXI. Analize glavne komponente ulaza za spektre reakcije reakcije molibdovanadata s L-ornitin hidrokloridom



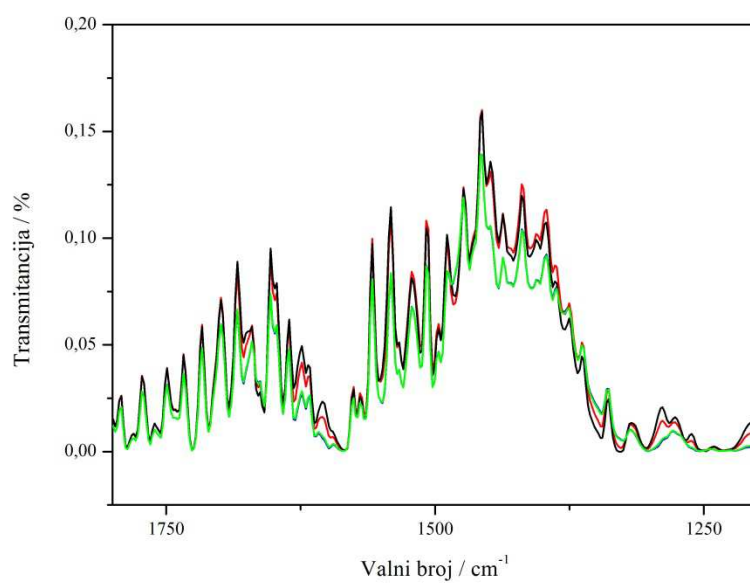
Slika XXII. Analize glavne komponente rezultata za spektre reakcije reakcije molibdovanadata s L-ornitin hidrokloridom



Slika XXIII. Varijanca analize glavne komponente za spektre reakcije reakcije molibdovanadata s L-ornitin hidrokloridom



a)



b)

Slika XXIV. Izračunati spektri čistih komponenti multivarijantnim razlučenjem krivulje reakcije molibdovanadata s L-ornitin hidrokloridom za 4 komponente u valnom području od a) 700 – 960  $\text{cm}^{-1}$  i b) 1060 – 1800  $\text{cm}^{-1}$ .

## § 9. ŽIVOTOPIS

Rođena sam 12. svibnja 1979.g. u Zagrebu, gdje završavam osnovnu i srednju školu.

1999/2000 godinu upisujem Prirodoslovno-matematički fakultet, diplomski studij Kemije, gdje stječem titulu dipl.inž. kemije.

Po završetku obrazovanja sudjelovala sam u nastavi, kao suradnik u Praktikum iz Opće i anorganske kemije te Praktikum iz anorganske kemije.

U Pliva Hrvatska d.o.o. sam zaposlena od 2006. godine u Istraživanju i razvoju, kao suradnik u Razvoju procesa. Od 2009. godine obavljam dužnost Voditelja tima u Istraživanju i Razvoj, Pilot, dok od 2016.g. radim kao Viši voditelj grupe.

Znanstveni radovi u časopisima:

1. P. Novak, A. Kišić, T. Hrenar, T. Jednačak, S. Miljanić, G. Vrbanec, *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* **54** (2011) 660-666.
2. M.Cindrić, G.Galin, D. Matković-Čalogović, P. Novak, T. Hrenar, I. Ljubić, and T. Kajfež Novak *Polyhedron* **28** (2009) 562-568.

Patentne publikacije:

1. I. Krizmanić, G. Vrbanec, *Process for the preparation of etravirine and intermediates in the synthesis thereof*, US2012/060991.
2. G. Vrbanec, M. Harča, A. Sućec, D. Šahnić, A. Avdagić, *Process for preparing (R)-7-benzyl-2- (benzyloxycarbonylamino)-(S)-methoxypropionamide*, US20100240926.

Priopćenja na znanstvenim skupovima

1. T. Jednačak, P. Novak, A. Kišić; T. Hrenar, S. Miljanić, G. Vrbanec  
*Monitoring of entacapone synthesis reaction by "in-line" Raman spectroscopy and multivariate analysis* // *Book of Abstracts* / Tomašić, Vesna ; Valkaj, Karolina Meduna (ur.).  
Zagreb : HDKI/Kemija u industriji, 2011. 42-42 (predavanje, sažetak, znanstveni)
2. G. Galin; M. Cindrić; B. Prugovečki; D. Matković-Čalogović  
*Kompleksi vanadija (V) sa schiffovim bazama pripremljeni iz aromatskih aldehida i aminokiselina* // Knjiga sažetaka VII. susret mladih kemijskih inženjera/Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, FKIT, 2008. 68 ((poster, sažetak, znanstveni).

- 
3. M. Cindrić, G. Galin, P. Novak, B. Prugovečki, D. Matković-Čalogović  
**N-salicylideneamino Acidato Complexes of Oxovanadium(IV). Molecular and Crystal Structure of [VO(SAL-L-GLN)(ETOH)2]** // *Abstract book of the 1st European Chemistry Congress* / Naray-Szabo, Gabor (ur.).  
Budapest : Academic Press, 2006. 356-356 (poster, sažetak, znanstveni).
4. M. Cindrić, G. Galin, P. Novak, D. Matković-Čalogović, T. Hrenar, P. Novak, I. Ljubić, T. Kajfež Novak  
**Dioxomolybdenum(VI) tridentate Schiff base complexes: the role of molybdenum(VI) in obtaining novel dissymmetric polydentate Schiff base ligand** // *Book of Abstracts, ICOMC 2006, Vol. 2., Poster Presentations* / Luis A. Oro (ur.).  
Zaragoza : Academic Press, 2006. P432 (poster, sažetak, znanstveni).
-