

Kemija vitamina B6 i sinteza novih analoga vitamina B6

Živković, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Chemistry / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za kemiju**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:182:552557>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Department of Chemistry, Osijek](#)



Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku

Odjel za kemiju

Preddiplomski studij kemije

Ivana Živković

KEMIJA VITAMINA B₆ I SINTEZA NOVIH
ANALOGA VITAMINA B₆

ZAVRŠNI RAD

Osijek, 2016.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dean Marković

Neposredni voditelj: doc. dr. sc. Dajana Gašo-Sokač

SAŽETAK

Vitamin B₆ je generički naziv za skupinu od šest spojeva: piridoksin, piridoksal, piridoksamin i njihove 5'-fosfate odnosno 3-hidroksi-2-metil-5-hidroksimetil piridinske derivate. Prva totalna sinteza vitamina B₆ je provedena kondenzacijom 1-etoksipentan-2,4-diona i cijanacetamida. Svim živim bićima potreban je vitamin B₆ za opstanak. Međutim, samo su mikroorganizmi i biljke sposobni sintetizirati ga *de novo*. Uloga vitamina B₆ je vezana uz brojne metaboličke procese, te također ima ulogu i kao kofaktor u nekim enzimski kataliziranim reakcijama. Vitamin B₆ je esencijalan za više od 100 enzima koji su uključeni u sintezu proteina. Najviše je proučavana koenzimatska aktivnost piridoksal-5'-fosfata (PLP), PLP-ovisni enzimi su uključeni u važne korake metabolizma aminokiselina, procesima dekarboksilacije i racemizacije, formiranja hemoglobina i biosintezi klorofila. Vitamin B₆ bi mogao imati ulogu u sprečavanju oksidativnog stresa stanica. Manjak vitamina B₆ u ljudskoj prehrani uključuje niz posljedica, odnosno nastanka bolesti, ozbiljnih i manje ozbiljnih kao npr. hiperhomocistein anemija i povećan rizik za arteloslkerozu.

Ključne riječi: vitamin B₆, piridoksin, piridoksal, piridoksamin

ABSTRACT

Vitamin B₆ exists in three basic chemical forms: pyridoxine (an alcohol), pyridoxal (an aldehyde) and pyridoxamine (a primary amine). The three major forms can be phosphorylated at the 5'-hydroxymethyl group. The first total synthesis of vitamin B₆ was obtained by the condensation of acetylacetone and cyanacetamide. All living beings need vitamin B₆ for their existence. However, only microorganisms and plants are able to synthesize it *de novo*. The role of vitamin B₆ is related to a number of metabolic processes, and also plays a role like a cofactor in certain enzyme-catalyzed reactions. Vitamin B₆ is essential for more than 100 enzymes involved in protein metabolism. The most studied coenzymic activity is one of the pyridoxal-5'-phosphate (PLP), PLP-dependent enzymes are involved in important steps of amino acid metabolism, processes of decarboxylation and racemization, hemoglobin formation and chlorophyll biosynthesis. Vitamin B₆ could have a role in preventing oxidative stress of the cells. A deficiency of vitamin B₆ in the human diet encompasses the full spectrum of clinical disorders, some of them more serious, such as hyperhomocysteinaemia and increases the risk for atherosclerosis.

Key words: vitamin B₆, pyridoxine, pyridoxal, pyridoxamine

SADRŽAJ

1. UVOD	4
2. KEMIJSKA STRUKTURA I FUNKCIJA VITAMINA B ₆	5
2.1. Funkcija vitamina B ₆	8
2.2. Izvori vitamina B ₆	10
2.3. Nedostatak vitamina B ₆	10
3. OTKRIĆE VITAMINA B ₆	11
3.1. Struktura piridoksina	13
3.2. Sinteza piridoksamina i piridoksala.....	22
3.3. Piridoksal fosfat i piridoksamin fosfat.....	25
4. RAZNOLIKOST DERIVATA VITAMINA B ₆	29
5. ZAKLJUČAK	34
6. POPIS LITERATURE	35

1. UVOD

Vitamini su organski spojevi potrebni u manjim količinama za normalan rad stanice. Biljke i mnogi „primitivni“ organizmi mogu iz najjednostavnijih sastojaka, odnosno iz izvora dušika, ugljika, mineralnih spojeva i energije, uzgraditi sve spojeve potrebne za svoj rast. Za razliku od biljaka, ljudi ne mogu sintetizirati neke spojeve kao npr. određene aminokiseline (esencijalne) i vitamine, pa ih moramo uzimati putem hrane. U normalnim uvjetima prehrane ne dolazi do problema i bolesti vezanih uz nedostatak određenih vitamina kao npr. avitaminoze. Najčešći simptomi avitaminoze su umor, nedostatak daha, vrtoglavica, nepravilni otkucaji srca, mišićna slabost itd. Ozbiljniji oblik bolesti su hipovitaminoze, odnosno relativno stanje manjka vitamina koje još ne dovodi do klasične slike bolesti.

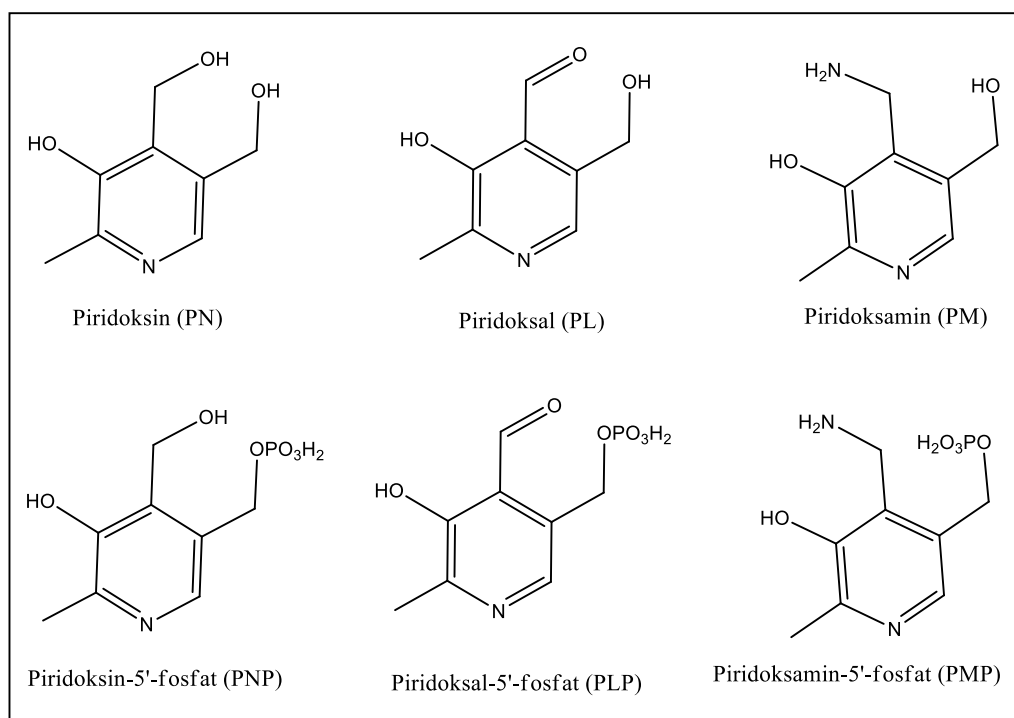
Uobičajena podjela vitamina, prema fizikalnom svojstvu topljivosti, je podjela na vitamine topljive u masti (D, E, K, A) i vitamine topljive u vodi (B, C). Vitamin B₆ je vitamin topljiv u vodi,. Izraz vitamin B₆ obuhvaća šest spojeva: piridoksin, piridoksal, piridoksamin i njihove fosforilirane oblike.

Cilj ovog rada je opisati vitamin B₆, te nove analoge vitamina B₆. Nešto općenito o vitaminu B₆ je opisano u poglavlju „Kemijska struktura i funkcija vitamina B₆“. Nadalje, opisani su izvori vitamina B₆, zatim što se može dogoditi ukoliko ne unosimo potrebne količine vitamina B₆ te samim tim i liječenja ukoliko dođe do oboljenja uslijed nedostatka vitamina. Nešto detaljnije opisano je otkriće vitamina B₆ i njegova povijest. Na samom kraju opisani su derivati odnosno analozi vitamina B₆.

2. KEMIJSKA STRUKTURA I FUNKCIJA VITAMINA B₆

Vitamin B₆ je vitamin topljiv u vodi. To znači da se takvi vitamini raspadaju u vodi, pa ih zapravo tijelo ne može pohranjivati u sebi, ostaci vitamina napuštaju tijelo mokraćom. Kao spoj, vitamin B₆ nije homologan, odnosno čine ga piridoksin, piridoksal, piridoksamin i njihovi fosforilirani derivati [4]. Naziv vitamin B₆ koristi se za skupinu 3-hidroksi-2-metil-5-hidroksimetilpiridin derivata, koji se razlikuju prema prirodi supstituenta na četvrtom mjestu piridinskog prstena. Zamjenom –CH₂OH skupine na četvrtom mjestu piridoksina sa –CH₂NH₂ odnosno –CHO, dobiva se piridoksamin odnosno piridoksal [9].

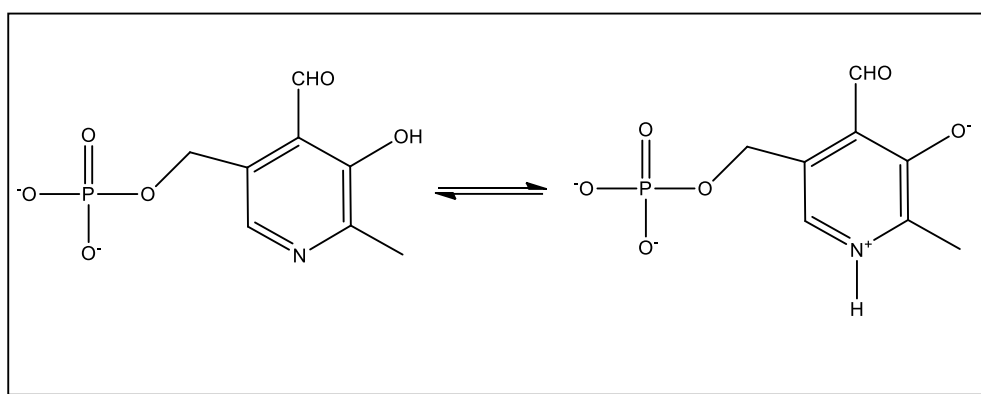
Ime piridoksin (PN) je trivijalno dodijeljeno jednoj komponenti vitamina B₆ u kojoj je supstituent hidroksimetil, pri čemu bi ukupan naziv spoja bio 3-hidroksi-4,5-bis(hidroksimetil)-2-metilpiridin. Biološki aktivni analozi su piridoksal (aldehid, PL, 2-metil-3-hidroksi-4-formil-5-hidroksimetilpiridin) i piridoksamin (amin, PM, 2-metil-3-hidroksi-4-aminometil-5-hidroksimetilpiridin) [3]. Ove 3 osnovne forme mogu biti fosforilirane na 5'-hidroksimetilnoj skupini pri čemu nastaje piridoksin-5'-fosfat (PNP), piridoksal-5'-fosfat (PLP), piridoksamin-5'-fosfat (PMP) [4]. Strukturne formule komponenti vitamina B₆ i njihovi fosforilirani oblici su prikazani na *Slici 1*.



Slika 1. Kemijske strukture komponenti vitamina B₆

Svi oblici vitamina B₆ su bezbojni kristali pri sobnoj temperaturi. Otapaju se u vodi, ali su minimalno topljivi u organskim otapalima. Veliku važnost ima velika stabilnost vitamina B₆ što je važno za industriju hrane kao i za potrošače. Komponente vitamina B₆ su osjetljive na utjecaj pH, iako ostaju relativno stabilne u kiselom mediju, u alkalnom to nije slučaj. Procesiranjem namirnica dolazi do gubitka vitamina B₆. Kuhanjem mesa gubi se oko 45% i 20-30% kuhanjem povrća. Najstabilnija forma vitamina B₆ je piridoksal. Vitamin B₆ je stabilan prema povećanju temperature, ali je osjetljiv na zrak, UV svjetlo. Pod utjecajem svjetlosti kao i oksidacijom brzo se raspada [9].

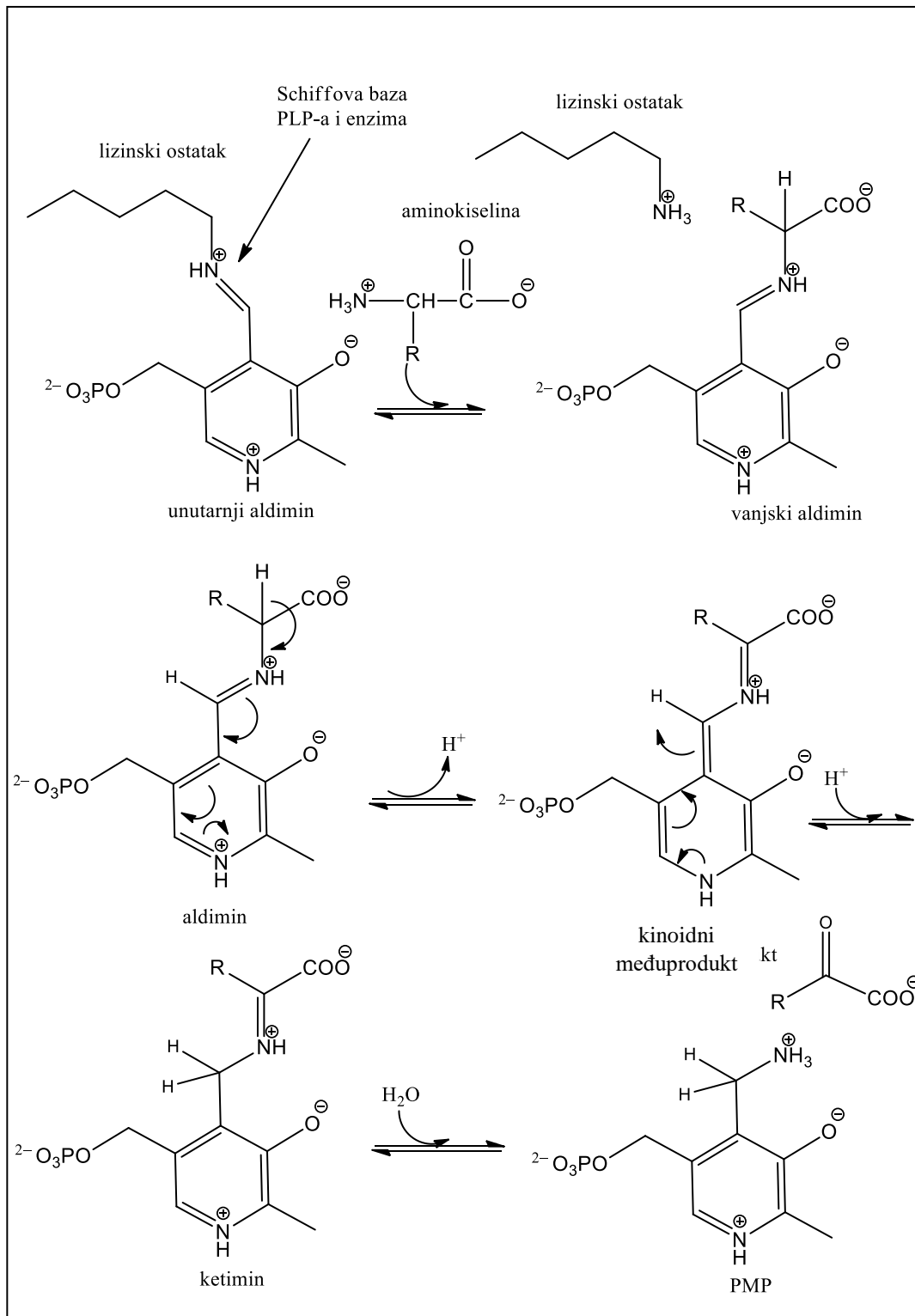
Piridoksal-fosfat sadržava piridinski prsten koji je slabo bazičan, na koji je vezana OH skupina, koja je slabo kisela. Stoga PLP postoji u dvije stabilne tautomerne forme koje su prikazane na *Slici 2.*, u kojima je piridinski dušikov atom protoniran i stoga pozitivno nabijen, dok OH skupina gubi proton, negativno je nabijena i stvara fenolat [9].



Slika 2. Tautomerni oblici PLP (keto i enolni oblik)

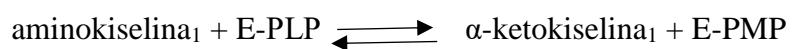
Najvažnija funkcijska skupina PLP-a je aldehidna skupina. Ta skupina tvori sa aminokiselinskim supstratima kovalentne međuprodukte tipa Schiffovih baza povezanih sa ϵ -amino skupinom specifičnog lizinskog ostatka u aktivnom mjestu enzima. Ulaskom aminokiselinskog supstrata stvara se nova Schiffova baza. α -Amino skupina aminokiselinskog supstrata zamjenjuje ϵ -amino skupinu lizinskog ostatka. Schiffova baza stvorena između aminokiseline i PLP-a ostaje čvrsto vezana uz enzim, i to višestrukim nekovalentnim vezama. Mehanizam transaminacije prikazan je na *Slici 3.*[1]

Schiffova baza između aminokiselinskog supstrata i PLP-a, vanjski aldimin, otpušta proton s α -C atoma aminokiseline i nastaje kinoidni međuprodukt. Ponovnim vezanjem protona

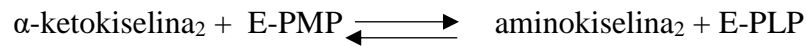


Slika 3. Mehanizam transaminacije

na aldehydni ugljikov atom tog međuprodukta nastaje ketimin, ketimin se potom hidrolizira u α -ketokiselinu i PMP. [1]

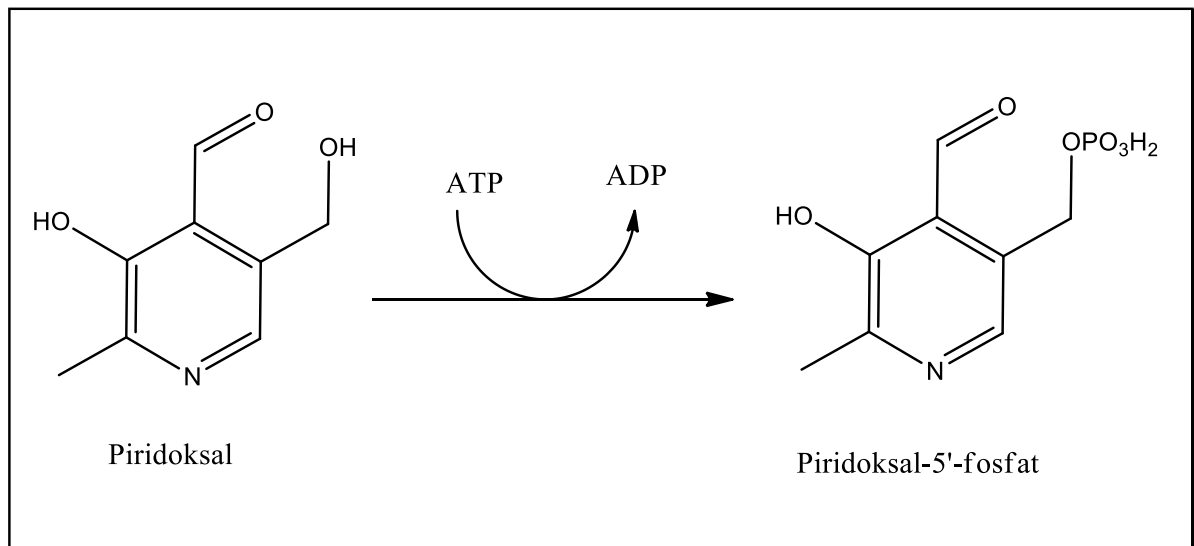


Druga se polovica cjelokupne reakcije zbiva obratom gornjeg niza reakcija. Pri tome druga alfa-ketokiselina reagira s kompleksom E-PMP te se dobiva druga aminokiselina, a ujedno se regenerira E-PLP. [1]



2.1. Funkcija vitamina B₆

Sve forme vitamina B₆ posjeduju vitaminsku aktivnost zato što se mogu pretvoriti *in vivo* u piridoksal. PN, PM i PL se pretvaraju u 5'-fosfat pomoću enzima kinaze. Piridoksal se pretvara u piridoksal-5'-fosfat reakcijom prikazanom na *Slici 4*. [12]. PNP i PMP se prevode u PLP djelovanjem flavin ovisne oksidaze, to je razlog zašto nedostatak vitamina B₂ dovodi i do smanjenja raspoloživog PLP-a.



Slika 4. Reakcija nastajanja piridoksal-5-fosfata

Brojni PLP-ovisni enzimi kataliziraju važne korake u sintezi aminokiselina (transaminacija, racemizacija, dekarboksilacija, α,β -eliminacijske reakcije) [10]. Raznoliko djelovanje PLP posljedica je sposobnosti stvaranja stabilne Schiff-ove baze s amino skupinama kao i mogućnosti da djeluje kao elektron akceptor i stabilizira reakcijske intermedijere. PLP-ovisni enzimi također imaju važnu ulogu u metabolizmu ugljikohidrata, masti i proteina. Ovaj vitamin je nužan za razmnožavanje stanica te kao takav igra važnu ulogu u trudnoći i pravilnoj funkciji imunskog sustava, održavanja ravnoteže natrija i kalija, mukozne membrane, kože,

crvenih krvnih zrnaca, radu mozga, moduliranju hormona, formiranju niacina, metabolizmu lipida i glukoneogenezi [5].

Vitamin B₆ pomaže tijelu sintetizirati neke neurotransmitere koji su ključni za normalan razvoj mozga. Zajedno s vitaminima B₁₂ i B₉ pomaže kontrolirati razinu homocisteina, molekule povezane sa srčanim bolestima. Nužan je i za apsorpciju vitamina B₁₂ i produkciju eritrocita i bijelih krvnih stanica zaduženih za imunitet. Vitamin B₆ također je nužan za pretvorbu triptofana, esencijalne aminokiseline u niacin, a nužan je i za sintezu DNA i RNA. Osim funkcije kao kofaktora u enzimima, u posljednjem desetljeću otkriveno je da bi vitamin B₆ mogao imati ulogu u sprječavanju oksidativnog stresa i da je važan za suzbijanje singleta kisika [2].

PLP ovisni enzimi su uključeni u reakciji formiranja hemoglobina i biosintezi klorofila. Hemoglobin je protein koji je prisutan u crvenim krvnim zrnima i njegova primarna uloga je da prenosi kisik u tijelu. Glavna komponenta hemoglobina je skupina hem, koja zapravo veže kisik. Početna proizvodnja skupine hem u tijelu zahtijeva prisutnost vitamina B₆. PLP u reakciji glikogen fosforilaze ostaje čvrsto vezan kroz svoju karbonilnu skupinu lizina i ponaša se kao protonski pufer kako bi ubrzao fosforolizu glikogena od strane anorganskog fosfata. PLP je uključen u metabolizmu masnih kiselina i zajedno s cinkom i magnezijem je potreban za djelovanje δ -6-desaturaze. U mozgu PLP-ovisni enzim aromatska L-aminokiselina dekarboksilaza, katalizira sintezu dva važna neurotransmitera: serotonina iz triptofana i dopamina iz L-3,4-dihidroksifenilalanina (L-DOPA). Drugi neurotransmiteri, uključujući glicin, D-serin, glutamat, histamin i dr. se sintetiziraju u reakcijama kataliziranih sa PLP-ovisnim enzimima [11].

Ovaj vitamin se uspješno koristio u liječenju ekcema, gubitku i stanjivanju kose, povišenim razinama kolesterola, zubnim bolestima te dijabetesu. Također, pokazano je da ima ulogu i u sprječavanju stresa, pogotovo u kombinaciji s cinkom. Nekoliko istraživanja pokazalo je da uzimanje 30 mg vitamina B₆ dnevno smanjuje jutarnje mučnine kod trudnica. On također sudjeluje u proizvodnji serotonina čiji je nedostatak povezan s depresijom, pa se pretpostavlja da bi njegovo uzimanje moglo pomoći kod liječenja depresije. Neka istraživanja i iskustva pacijentica pokazala su da vitamin B₆ ublažava simptome PMS-a. Istraživanja pokazuju da vitamin B₆ smanjuje rizik od Parkinsonove bolesti [5].

2.2. Izvori vitamina B₆

Vitamina B₆ ima u biljnom i životinjskom tkivu, osobito u jetri i bubrezima, zatim u kvascu, ribi, cjelovitim žitaricama, soji, jajima, mlijeku te voću (osobito suho voće, banane, avokado) i povrću (špinat, pšenične klice). Preporučena dnevna doza ovog vitamina iznosi 1-2 miligrama na dan, a potreba za vitaminom se povećava tijekom starenja, trudnoće i dojenja, te korištenja kontracepcijskih tableta. Istraživanja su pokazala da intravenozno uzimanje i do 200 mg nema toksični učinak, a uzimanje 100 do 300 mg ublažava oštećenja živčanih stanica uslijed uzimanja droge bez neželjenog efekta. Ipak, istraživanja se pokazala da kod nekih ljudi uzimanjem mnogo većih doza i tijekom dužeg vremena, dovodi do oštećenja živčanih stanica [5].

2.3. Nedostatak vitamina B₆

Svakodnevna opskrba vitaminom B₆ zajedno s ostalim vitaminima B-kompleksa nužna je zato što se oni izlučuju putem urina u roku od 8 sati nakon ulaska u organizam i ne mogu se skladištiti u jetri. Nedostatak vitamina B₆ je vrlo rijedak, javlja se kod primjene nekih lijekova ili je vezan za nedostatak nekih drugih vitamina B-kompleksa. Simptomi nedostatka vitamina B₆ slični su simptomima nedostatka niacina i riboflavina, a očituju na koži i u središnjem živčanom sustavu. Dolazi i do slabosti mišića, nerveze, iritabilnosti, depresije, slabe koncentracije i gubitak kratkoročnog pamćenja, gubitka kose, artritisa, poremećaja učenja, slabost, pojava akni. Iako je nedostatak vitamina B₆ rijedak, može se javiti kod alkoholičara, bubrežnih bolesnika, žena koje uzimaju kontracepcijske tablete te kod poremećaja rada imunskog sustava [5].

Kod trudnica nedostatkom ovog vitamina dolazi do većeg zadržavanja vode, te ukoliko se kroz duži period ne dobiju potrebne količine, žena može roditi mrtvo dijete ili može doći do kasnog porođaja. Novorođenčad čije majke nisu uzimale potrebne količine ovog vitamina, se rađaju s konvulzijama.

Pokazalo se da ljudi koji prehranom ne uzimaju dovoljno ovog vitamina, imaju veći rizik od razvitka srčanih bolesti. Brojne studije pokazale su da osobe sa niskim razinama PLP-a imaju mnogo veći rizik srčanog udara od osoba sa većim razinama PLP-a. [5].

3. OTKRICE VITAMINA B₆

Formulu vitamina B₆ je prvi put objavio S. Ohdake 1932. godine (Isolation of "Oryzanin" (Antineuritic Vitamin) from Rice-polishings. (First Report.), *Bull. Agr. Chem. Soc. Japan* 8, 1932., 11–46) u isto vrijeme kada su i druge skupine znanstvenika radile na objašnjavanju ostalih spojeva iz skupine vitamina B. On je radio na izolaciji iz riže spoja kojeg je nazvao orizanin (vitamin B₁) i otkrio vitamin B₆ kao sporedni produkt. Opisao je formulu, ali nije znao da je otkrio vitamin i nije prepoznao njegovu važnost. Istraživanja koja su se bavila aktivnošću vitamina B₆ i njegovim pročišćavanjem u to vrijeme su bila otežana zbog nedostataka podataka na temelju kojih bi se razlikovali riboflavin (vitamin B₂) i vitamin B₆, a koja su bila bitna, zbog tog što su sve biljke i životinje sadržavale ove supstance.

Piridoksin je prvi izoliran u kristalnom obliku iz kvasca i iz riže. Nekoliko godina prije izolacije ovog vitamina, György je 1934. godine definirao vitamin B₆ kao dio vitamina B kompleksa odgovoran za liječenje posebnog dermatitisa kod štakora [3]. György je 1934. prvi put opisao vitamin B₆ tj. imenovao je supstancu piridoksin, zbog strukturne sličnosti s piridinom. Pročišćavanje i izolacija vitamina B₆ brzo se razvijala, kroz prvih pet mjeseci 1938. godine, pet istraživačkih skupina je objavilo svoja istraživanja. Keresztesy, Sevens i Lepkovsky su objavili izolaciju kristalnog vitamina B₆ u veljači; Kuhn i Wendt i György sličnu objavu u travnju, te Ichiba i Michi koji su opisali hidroklorid vitamina B₆ u lipnju. Isprva se smatralo da postoji samo piridoksin kao oblik vitamina B₆ sve dok nisu Snell i njegovi suradnici otkrili i druge aktivne oblike, odnosno piridoksal i piridoksamin [3]. Schlenk i Snell su prvi zaključili da fosforilirani piridoksal služi kao koenzim u enzimskoj transaminaciji L- α -aminokiselina [10]. Oni su uočili da je kod štakora koji nisu imali dovoljne količine vitamina B₆ nastala mala, odnosno manja aktivnost transaminaze, za razliku od onih koji su imali dovoljnu količinu vitamina B₆. Snell je objavio i ne-enzimsku interkonverziju piridoksala i piridoksamina grijanjem glutaminske kiseline s piridoksalom ili grijanjem α -ketoglutarne kiseline s piridoksaminom, te je upravo ove reakcije naveo kao dokaz za ulogu derivata piridoksala u enzimskoj transaminaciji [3].

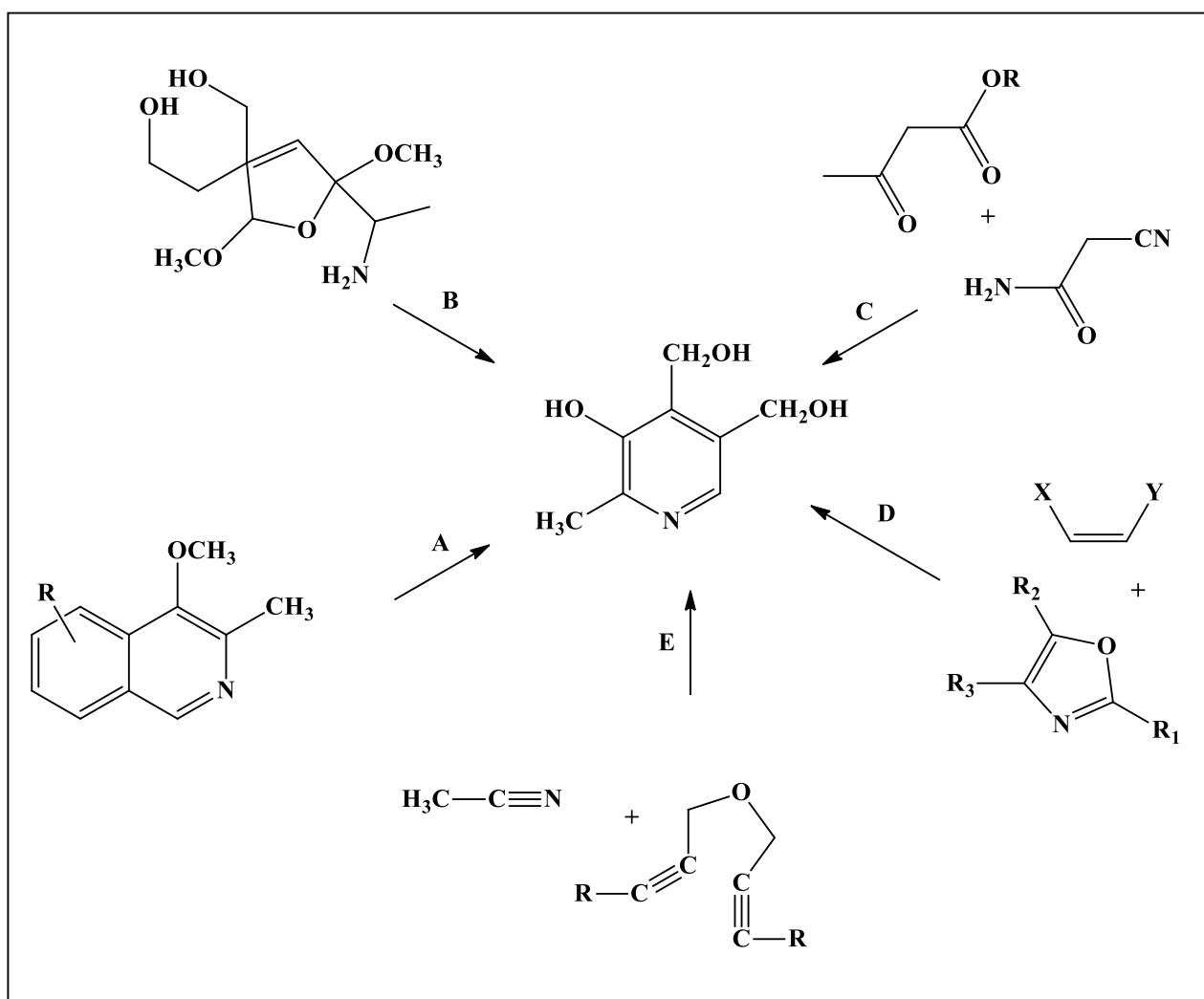
Prva totalna sinteza je izvedena 1939. godine od strane tri skupine znanstvenika (Harris i Folkers 1939.; Ichiba i Michi 1939.; Kuhn i ostali 1939.). Harris i Folkers su također opisali i sintezu piridoksina koju su kasnije proširili i prilagodili za industrijske svrhe. Sinteza je bazirana na kondenzaciji 1-etoksipentan-2,4-diona i cijanacetamida. Prema Harrisu i Folkersu

sintetički vitamin B₆ hidroklorid je kemijski identičan prirodnom vitaminu B₆ hidrokloridu i ima biološku aktivnosti [3].

Industrijski se piridoksin-hidroklorid proizvodi u obliku bijelog, bezmirisnog, gorkokiselog u vodi topljivog kristaliničnog praha. Zbog velikog broja reaktivnih i na piridinskom prstenu nesimetrično položenih supstituenata, a posebno zbog hidroksilne skupine u položaju 3, izbor sintetske strategije za pripremu piridoksina više je nego lak.

Sinteze piridoksina se dijele u dvije skupine:

- sinteze koje polaze od supstrata sa formiranim prstenom
- sinteze u kojima je potrebno formirati prsten, *Slika 5*.



Slika 5. Sintetski putevi priprave piridoksina

- A. oksidacijska razgradnja, redukcija nastalih piridin.dikarboksilnih kiselina
- B. aciliranje, oksimiranje, hidriranje, elektrometoksiliranje, hidroliza, intramolekularna reciklizacija
- C. nitriranje, kloriranje, hidriranje, diazotacija, hidroliza
- D. cikloadicija, fragmentacija, aromatizacija
- E. ciklotrimerizacija

Sinteze piridoksina koje polaze od supstrata s njegovim već izgrađenim prstenom (put A) temelje se na oksidativnoj razgradnji kinolinskih i izokinolinskih derivata u piridindikarboksilne kiseline, a potom na njihovoj redukciji u piridoksin, a poslužile su i za određivanje njegove konstitucije. U skupini sinteza uz izgradnju skeleta piridoksina iz jednog segmenta najpoznatije su one koje polaze od 3,4-diacetoksimetilfurana, koji alkiliranjem, oksimiranjem, hidratiranjem, elektrometoksiliranjem te potom hidrolizom i intramolekularnom reciklizacijom daje piridin (put B). Međutim, sintezama koje prsten izgrađuju od dva segmenta dvije principijelno različite varijante od posebnog su značenja. Ranije spomenuta Harris i Folkers-ova sinteza kondenzacije cijanoacetamida i alkoksiacetilacetona (put C). Takvom sintezom nastaje višestruko supstituiran piridonski derivat koji se reakcijama nitriranja, kloriranja, hidriranja, diazotacije i hidrolize prevodi u piridoksin. Diels-Alderova reakcija se pokazala vrlo korisnom u organskoj sintezi i višestruko se koristi za pripremu spojeva sa šesteročlanim prstenovima. Nova serija derivata piridina i analoga vitamina B₆ je sintetizirana Diels-Alderovom reakcijom 2,4-dimetil-5-metoksioksazola sa različitim tipovima dienofila [9].

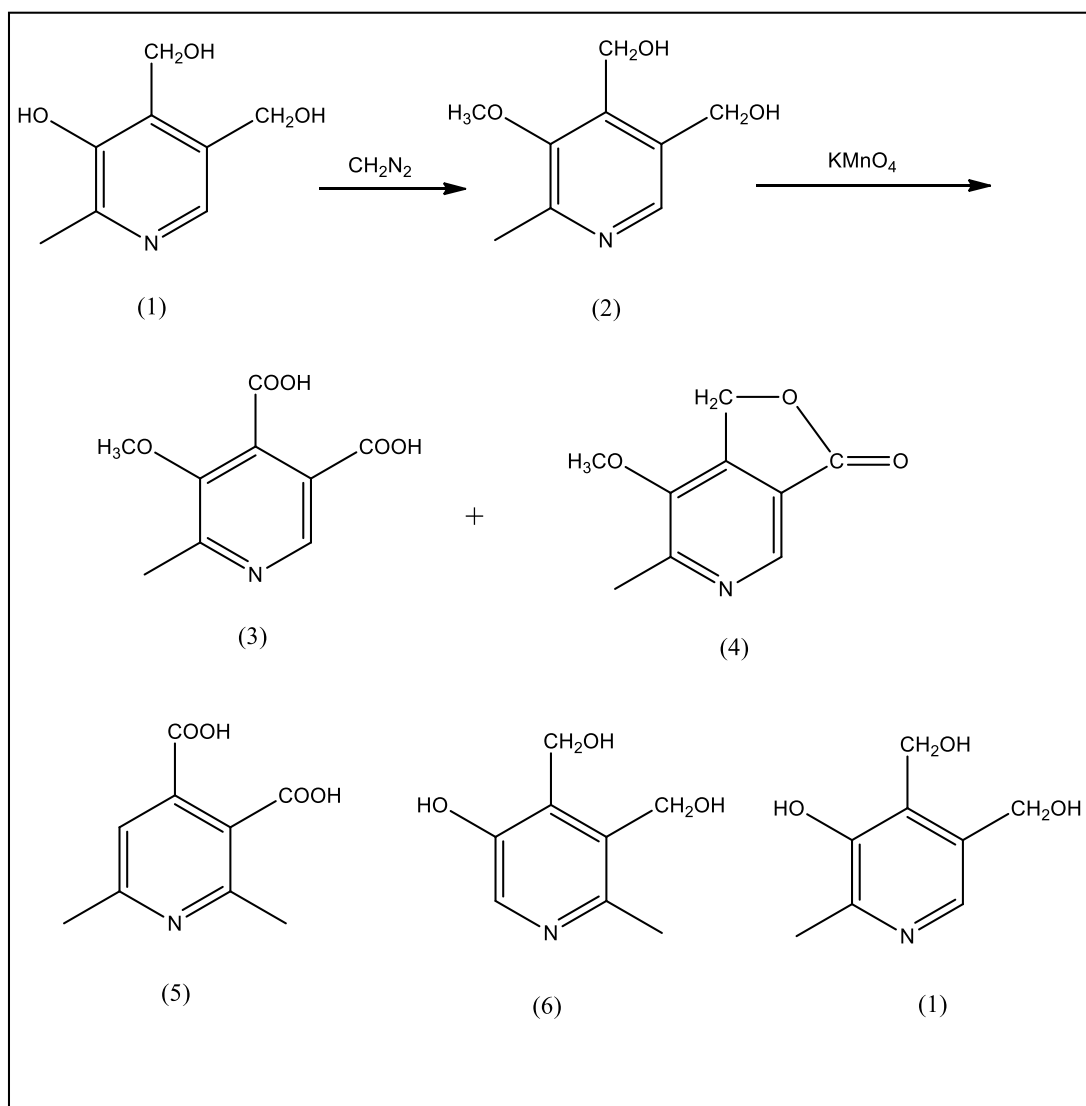
3.1. Struktura piridoksina

Piridoksin je prvenstveno bio izoliran iz kvasca, a zatim i iz riže. Izoliran je kao hidroklorid C₈H₁₂ClNO, baze C₈H₁₁NO₃ kako je bilo određeno elementarnom analizom. Empirijska formula koja je također predstavljala i molekulsku formulu, određena je na način uz promatranje titracijske krivulje hidroklorida tako što je utvrđeno da je ona imala samo jedan prijelom. Baza je bila optički inaktivna te stabilna prema kiseljoj i alkalnoj hidrolizi, dušičnoj kiselini te Fehlingovoj otopini. Sadržavala je tri aktivna vodikova atoma, C-metilnu skupinu i fenolnu skupinu. Međutim, dokazi ukazuju na odsutnost alkoksidne te alkilamino skupine.

Prema ovim podacima slobodna baza je imala karakter cikličkog tercijarnog amina. Djelovanjem željezova klorida na piridoksin dobivena je crvena boja, koja je bila slična onoj dobivenoj reakcijom željezova klorida i 3-hidroksipiridina. Ionizacijska konstanta te varijacije u ultraljubičastom spektru su bile analogne nekoliko 3-hidroksipiridinskih derivata. Na temelju gore navedenih dokaza zaključeno je da je piridoksin supstituirani 3-hidroksipiridin.

Karakter i položaj ostalih funkcijskih skupina određeni su procesom oksidacije, *Slika 6*. Metil eter piridoksina (**2**) dobiven je reakcijom s diazometanom. Oksidacijom produkta utrošena su približno četiri ekvivalenta kalijevog permanganata, pri čemu su nastali lakton (**4**) i dikarboksilna kiselina (**3**). Sličnosti između (**5**) i (**3**) su bile vidljive usporedbom njihovih pKa vrijednosti i iz ultraljubičastog absorpcijskog spektra.

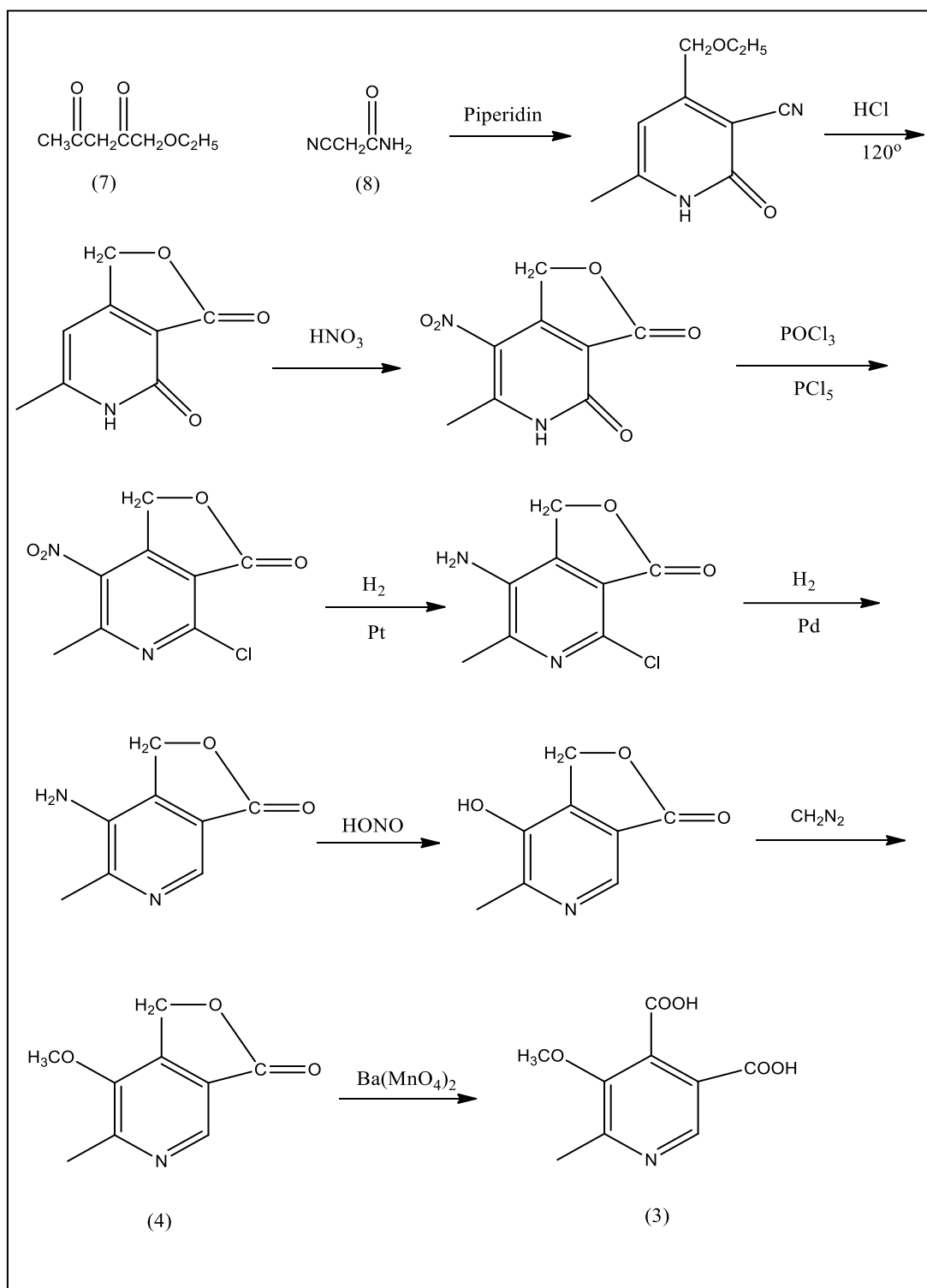
Dokaz da su karboksilne skupine u vicinalnom položaju dobiven je sintezom žutog fluorescentnog ftaleina reakcijom s rezorcinolom. Pretpostavka da se nijedna od karboksilnih skupina ne nalazi u α položaju potvrđena je nemogućnošću dikarboksilne kiseline da daje boju odnosno reagira s željezovim kloridom. Na temelju gore navedenih podataka zaključeno je da se susjedne karboksilne skupine nalaze na 4- i 5- položaju 3-hidroksipiridinske jezgre [**3**].



Slika 6. Struktura piridoksina prema Stilleru

Dikarboksilna kiselina je dobivena iz piridoksina gubitkom četiri atoma vodika i adicijom dva atoma kisika stoga je zaključeno da hidroksimetilne skupine zauzimaju 4- i 5- mjesto piridoksina. Na temelju svih do tada prikupljenih dokaza, struktura vitamina bila je ograničena na dvije mogućnosti, (1) i (6). Dokaz da je metilna skupinu u položaju dva (1) dobiven je formiranjem plave boje reakcijom piridoksina sa 2,6-diklorkinon-klorinid (Gibbsov reagens) u alkalnoj otopini. S obzirom da se plava boja normalno ne dobiva sa *para*-supstituiranim fenolima, moglo se zaključiti da je šesti položaj piridoksina nesupstituiran te su Stiller i njegovi suradnici strukturu (1) dodijelili vitaminu [3].

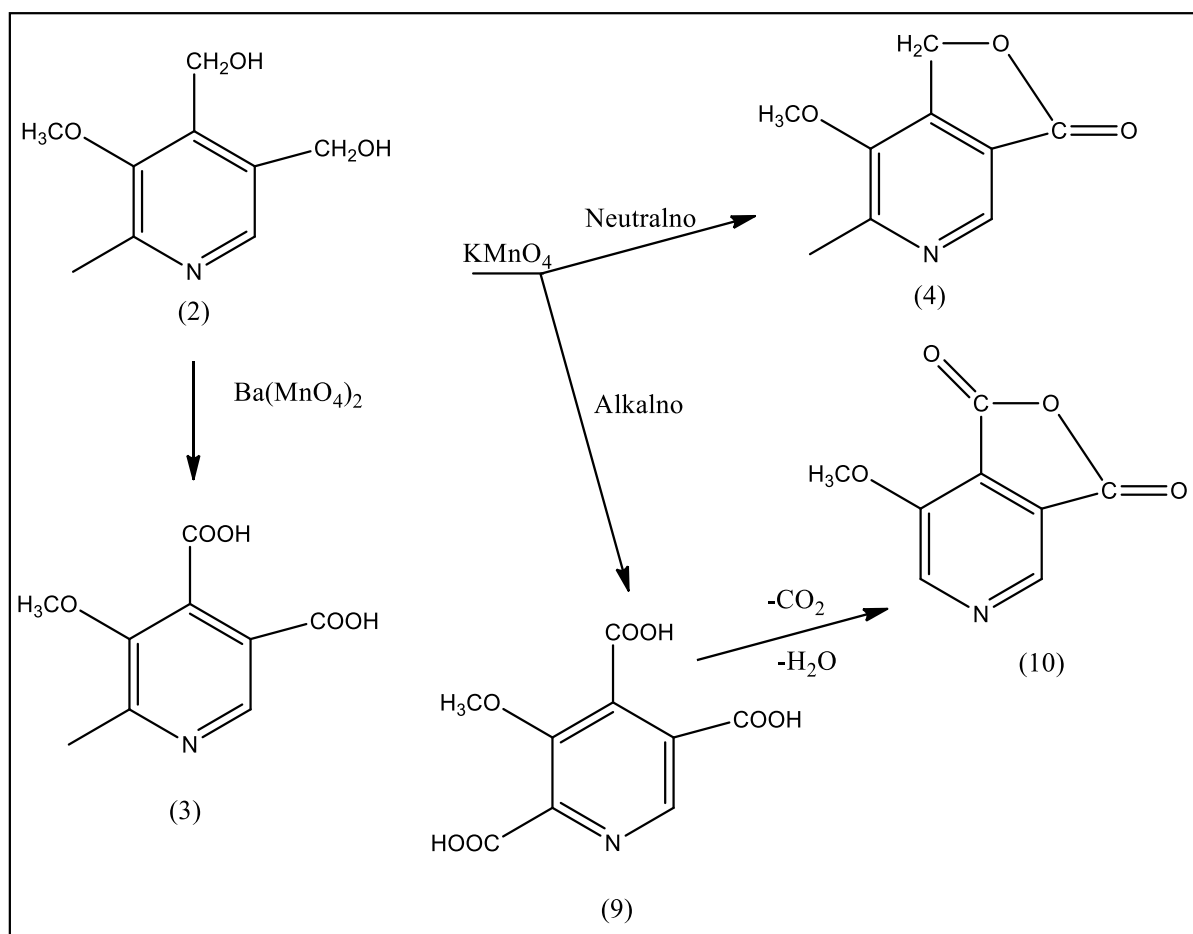
Harris i njegovi suradnici su potvrdili strukturu piridoksina sintezom dikarboksilne kiseline (3) i laktona (4) iz cijanoacetamida (8) i α -acetyl- α' -etoksiacetona (7), *Slika 7*.



Slika 7. Dokaz strukture piridoksina, Harris i suradnici

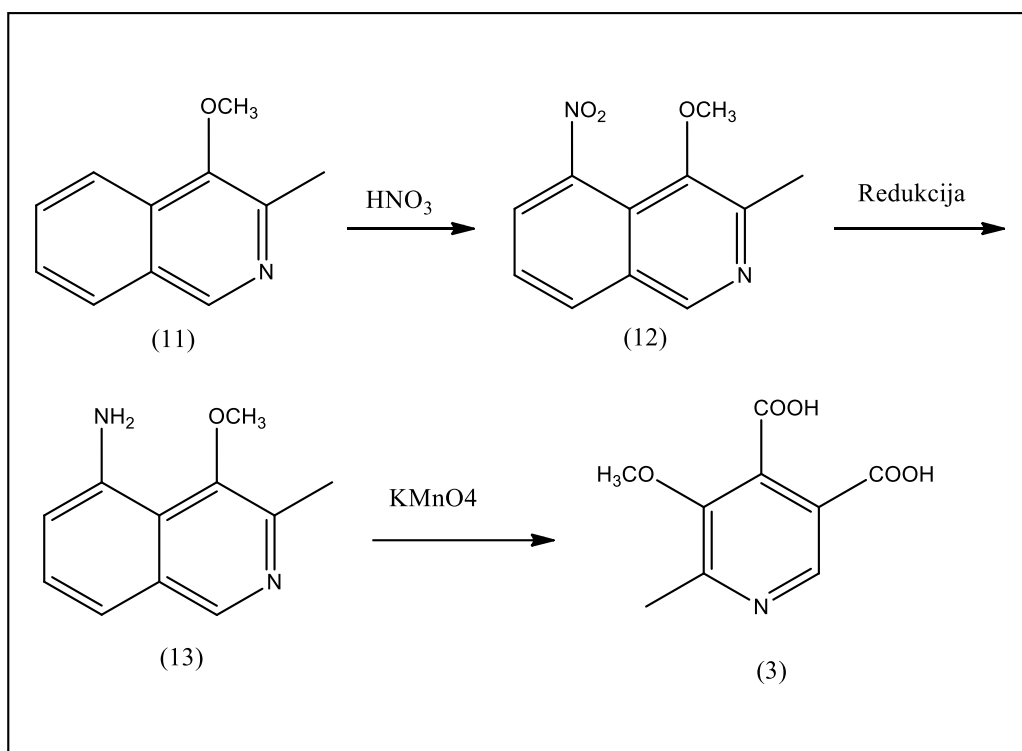
Dokaz za strukturu piridoksina su također, neovisno o ostalima, dali Kuhn i njegovi suradnici (Slika 8.). Blagom oksidacijom metil etera (2) u neutralnoj sredini dobiven je lakton (4). reakcija koja je provedena smatrala se dovoljnim dokazom za vicinalni odnos hidrosimetilnih skupina piridoksina. Oksidacijom u alkalnom mediju s kalijevim permanganatom metil etera (2) dobivena je trikarboksilna kiselina (9), koja je davala crvenu boju u reakciji s željezovim

sulfatom, potvrda da je C-metilna skupina piridoksina smještena u položaju dva piridinske jezgre. Bilo je jasno da je barem jedna karboksilna skupina u trikarboksilnoj kiselini smještena u na ugljikovom atomu koji je susjedan piridinskom dušiku. Kada je spoj (9) monodekarboksiliran i preveden u anhidrid (10), produkt nije davao crvenu boju sa željezovim sulfatom. Prema tome zaključeno je da trikarboksilna kiselina ima samo jednu α karboksilnu skupinu u odnosu na piridinski dušikov atom. Zaključeno je da je α karboksilna skupina trikarboksilne kiseline dobivena iz metilne skupine u položaju dva piridinskog prstena [3].



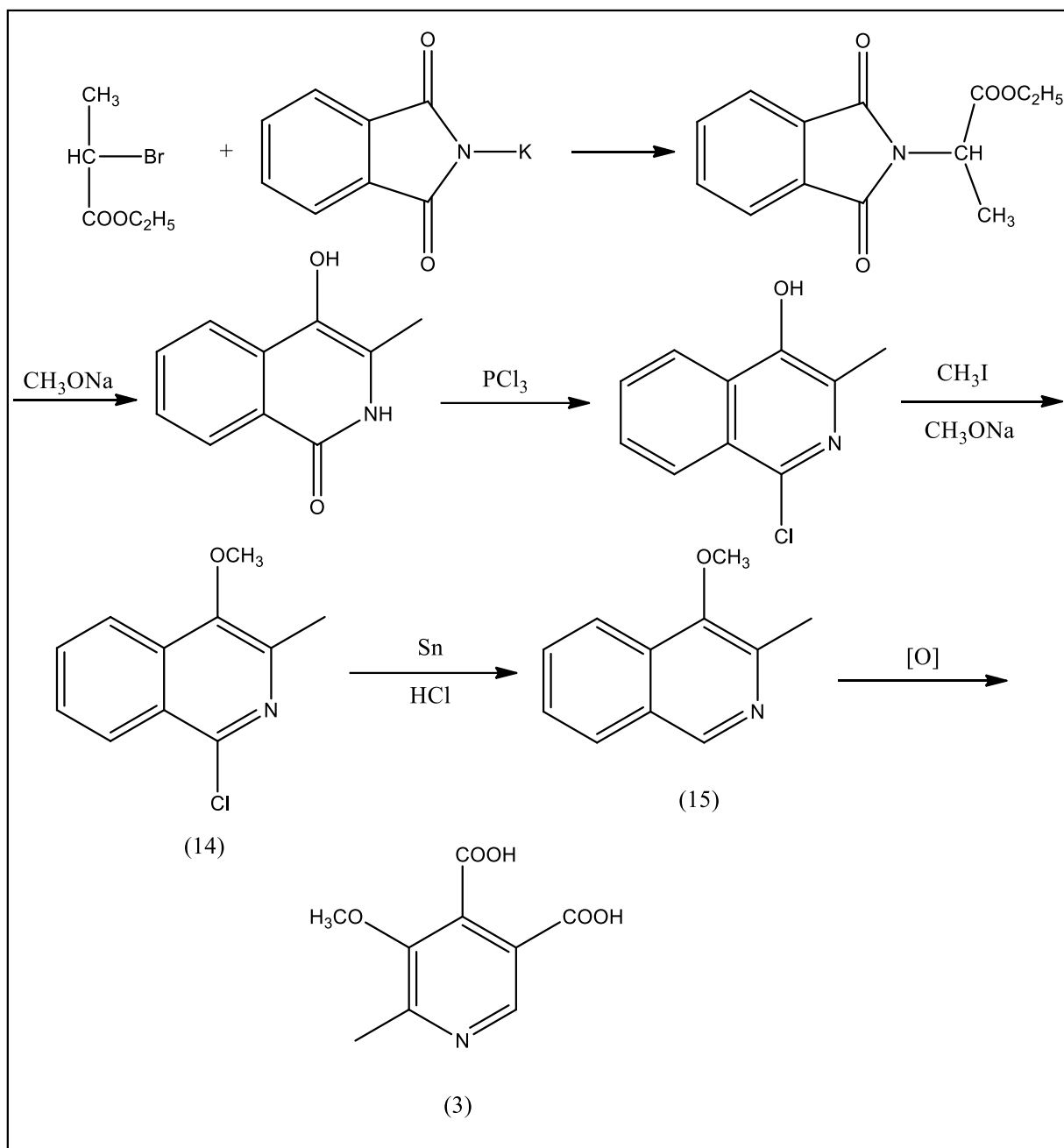
Slika 8. Dokaz strukture piridoksina, Kuhn i suradnici

Kuhn je također potvrdio strukturu piridoksina sintezom dikarboksilne kiseline (3), **Slika 9**. Reakcijom 3-metil-4-metoksiizokinolina (11) sa dušičnom kiselinom nastaje mono nitro spoj (12) koji se potom reducira u odgovarajući amin (13). Oksidativnom degradacijom nastalog amina dobivena je dikarboksilna kiselina (3) [3].



Slika 9. Dokaz strukture piridoksina, Kuhn i suradnici

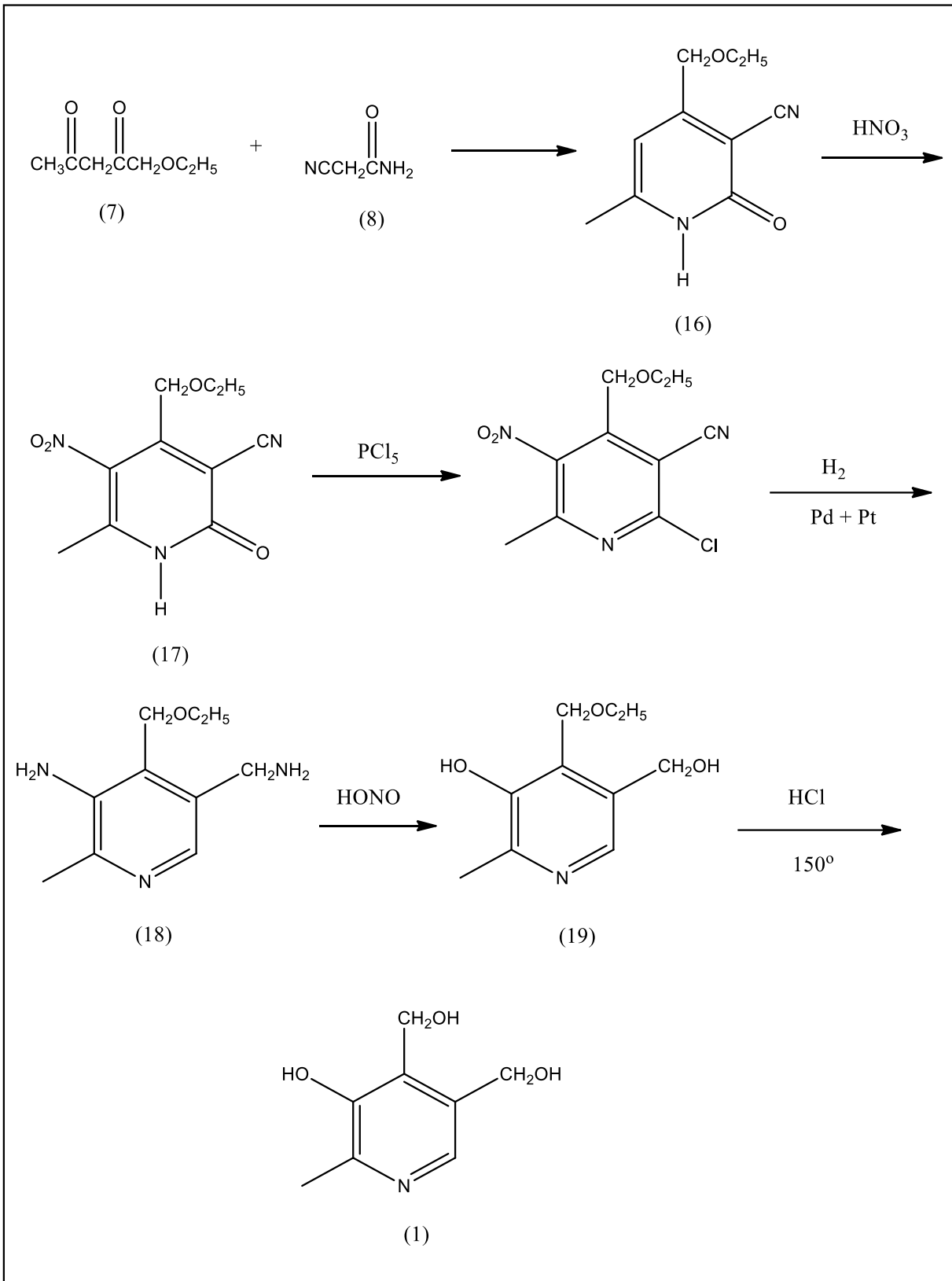
Ichiba i Michi su uspjeli izvršiti sintezu 3-metoksi-2-metilpiridin-4,5-dikarboksilne kiseline (3) na drugačiji način. Nakon što su sintetizirali 1-klor-3-metoksi-2-metilzokinolin (14), reducirali su ga u 3-metoksi-2-metilzokinolin (15), te potom oksidirali do dikarboksilne kiseline (3) *Slika 10.* [3].



Slika 10. Sinteza 3-metoksi-2-metilpiridin-4,5-dikarboksilne kiseline, Ichiba i Michi

Harris i Folkers su sintetizirali piridoksin reakcijom koja započinje kondenzacijom α -acetil- α' -etoksiacetona (7) i cijanoacetamida (8), *Slika 11*.

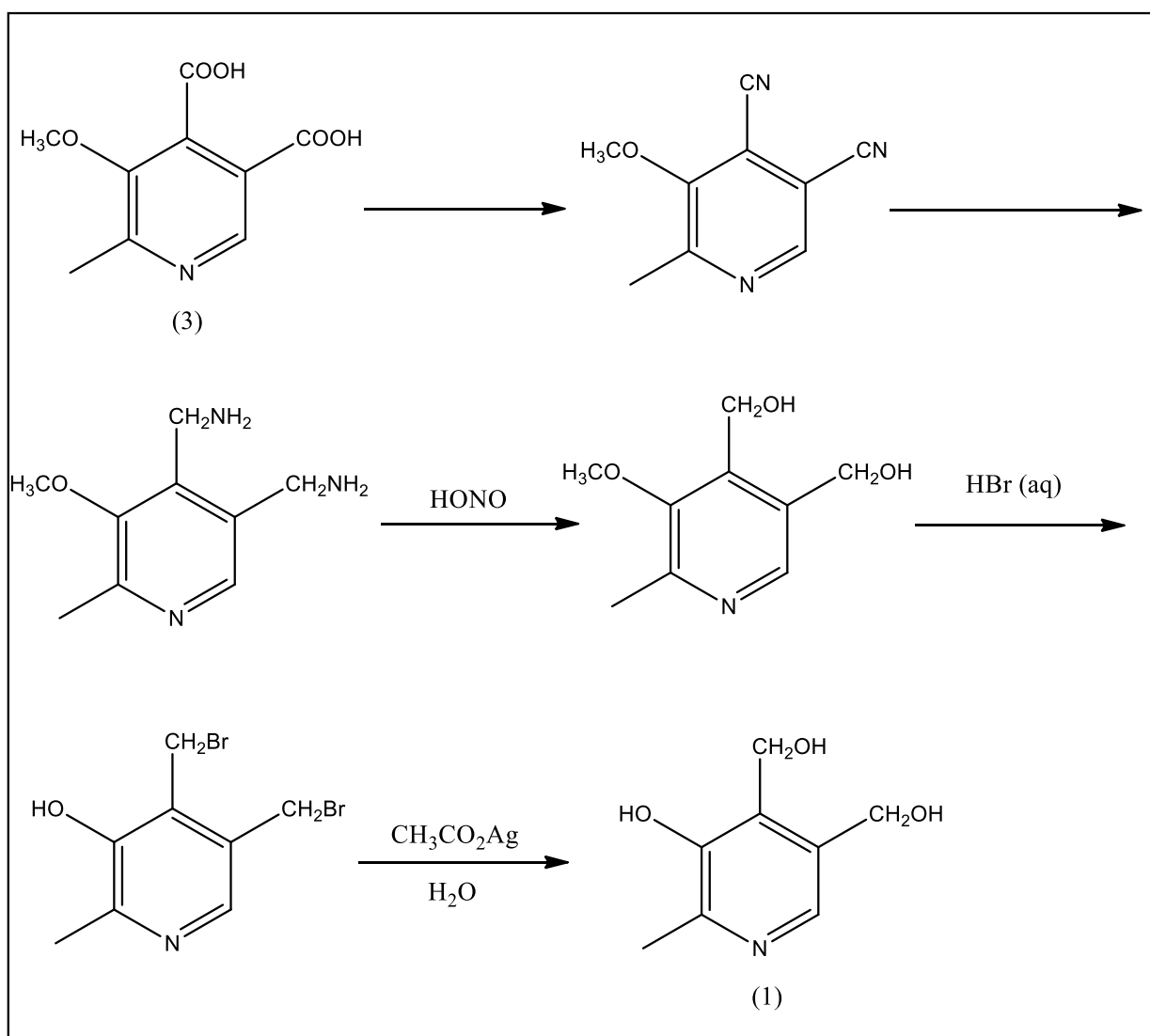
Produkt kondenzacije 3-cijano-4-etoksimetil-6-metil-2-piridon (16) sa dušičnom kiselinom daje nitropiridon (17), kojim zatim kloriranjem i redukcijom daje 3-amino-5-aminometil-4-etoksimetil-2-metilpiridin (18). Reakcijom diamino spoja sa dušikastom kiselinom nastaje 4-etoksimetil-3-hidroksi-5-hidroksimetil-2-metilpiridin (19), koji hidrolizom daje piridoksin (1) [3].



Slika 11. Harris i Folker-ova sinteza piridoksina

Kuhn i suradnici sintetizirali su piridoksin (**1**) iz dikarboksilne kiseline (**3**) kao polazne sirovine, *Slika 12*.

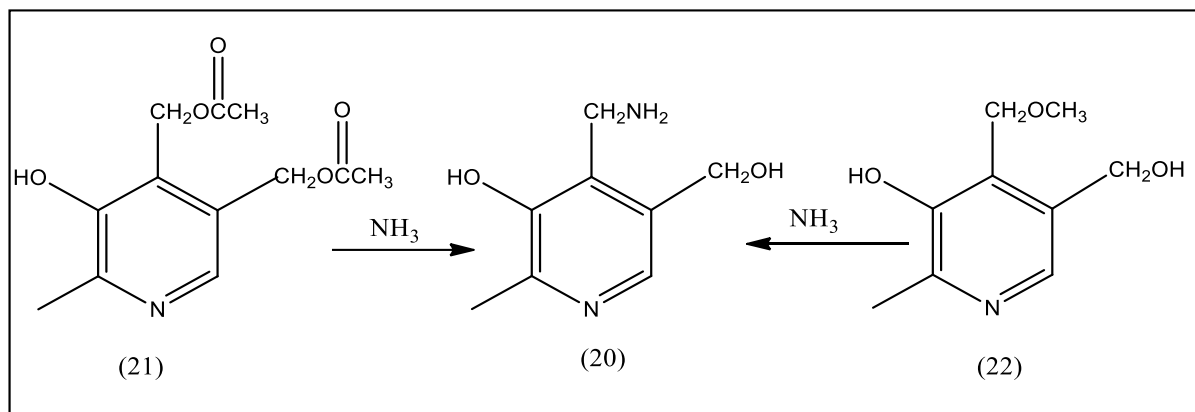
Sinteza je obuhvaćala niz reakcija, najprije prevođenje karboksilnih skupina u nitrilne, zatim redukcija do aminometilne skupine, te konverzija aminometilne skupine u hidroksimetilnu. Zadnji korak sinteze obuhvaćao je kidanje O-metilne skupine sa bromovodičnom kiselinom nakon koje je slijedila hidroliza dibromida u prisutnosti srebrovog acetata [3].



Slika 12. Sinteza piridoksina iz dikarboksilne kiseline, Kuhn i suradnici

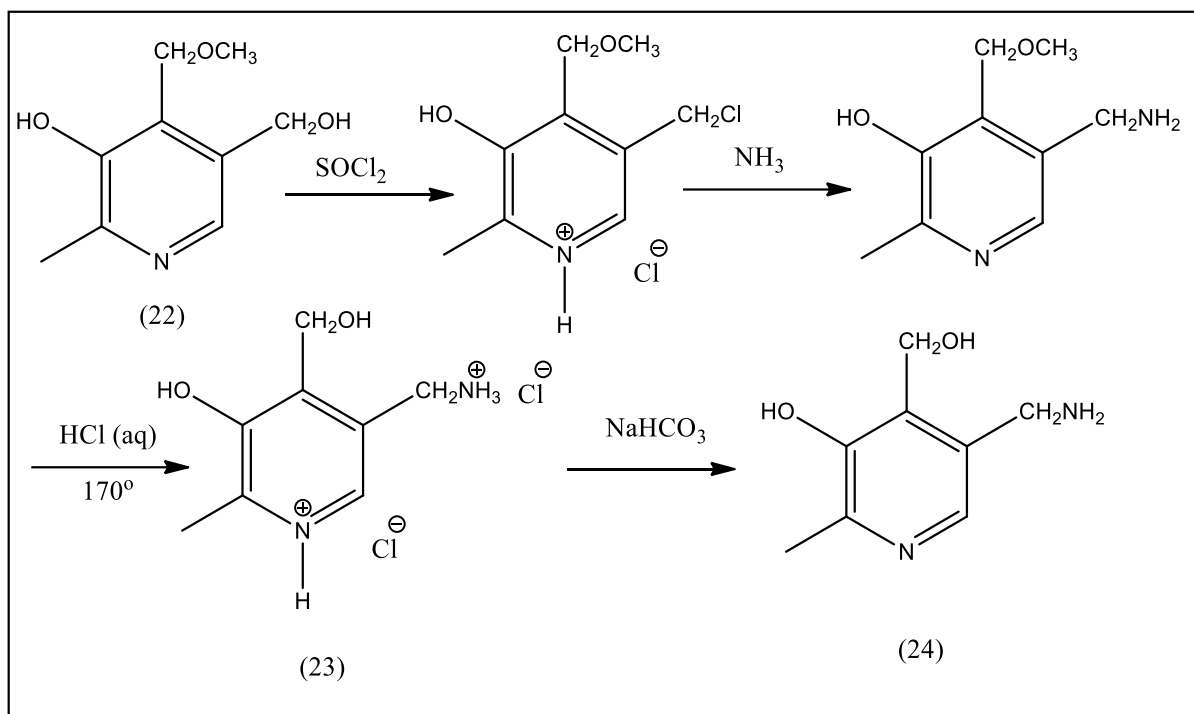
3.2. Sinteza piridoksamina i piridoksala

Sintezu piridoksamina (**20**) prvi su opisali Harris i suradnici, *Slika 13*. Metoda je uključivala aminaciju ili piridoksin diacetata (**21**) ili 3-hidroksi-5-hidroksimetil-4-metoksimetil-2-metilpiridina (**22**) s amonijakom u metanolu pri 140° C [3].



Slika 13. Sinteza piridoksamina od strane Harrisa i suradnika

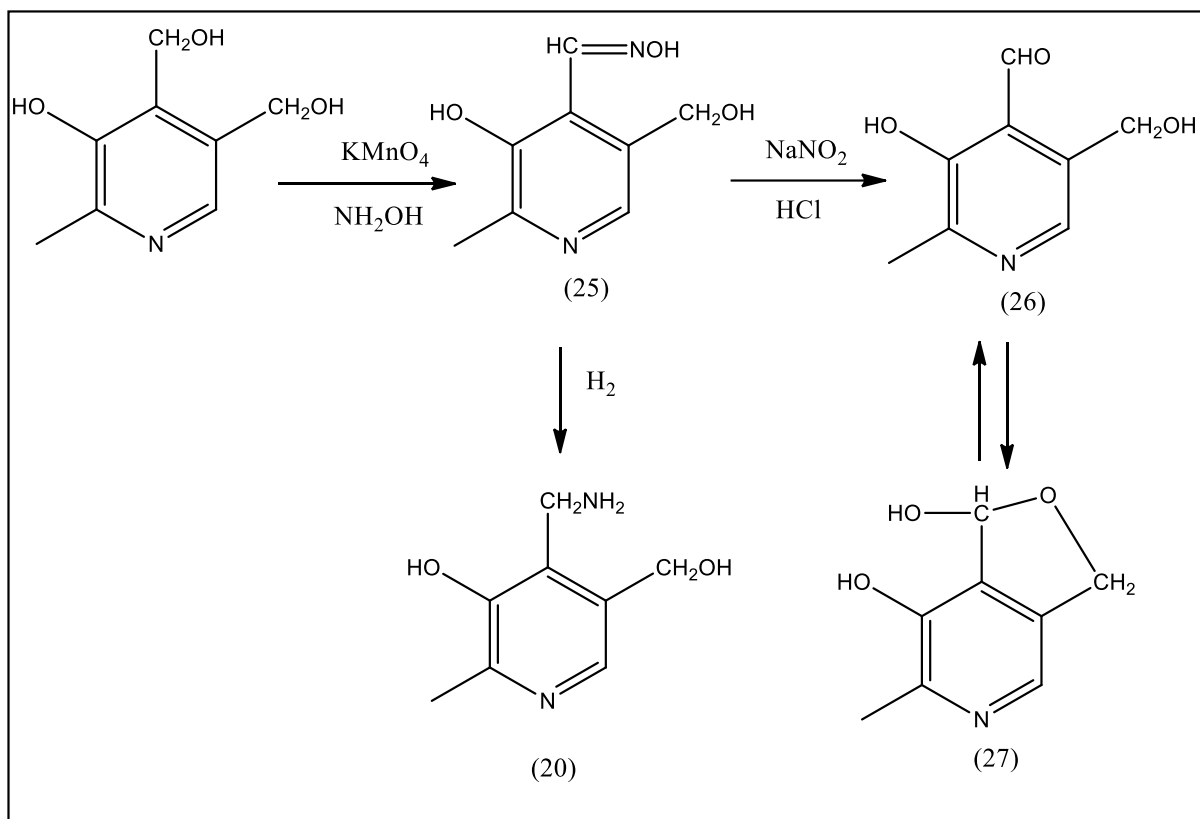
Dodatni dokaz strukture piridoksamina dobiven je sintezom biološki neaktivnog izomera 5-aminometil-3-hidroksi-4-hidroksimetil-2-metilpiridin (izopirisoksamin) (**24**), *Slika 14*. [3].



Slika 14. Sinteza izopiridoksamina (24)

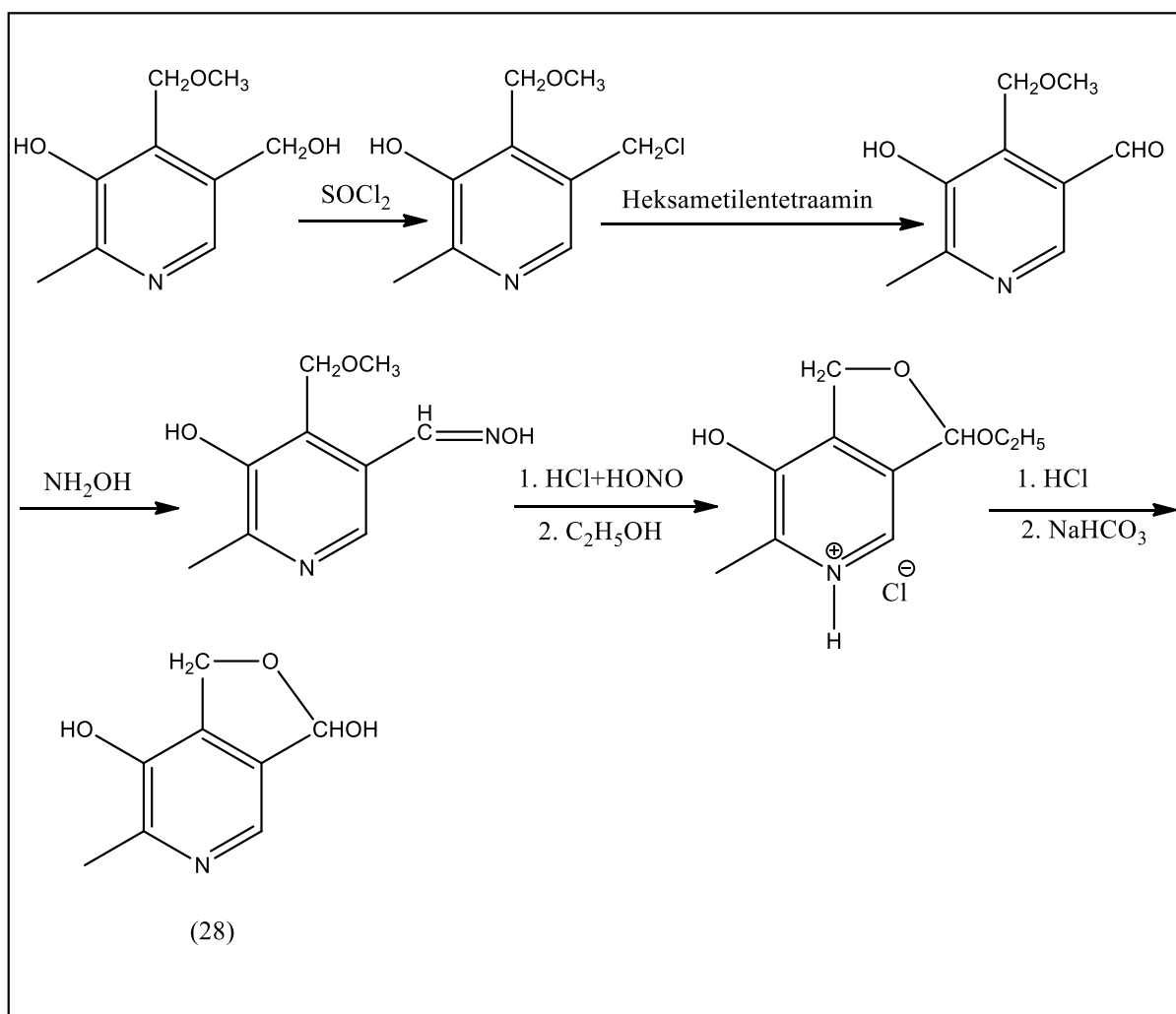
Sinteza spoja (24) uključuje reakciju 3-hidroksi-5-hidroksimetil-4-metoksimetil-2-metilpiridina (22) s SOCl_2 , zatim slijedi aminacija te naknadno uklanjanje metoksilne skupine na četvrtom supstituentu pri čemu se dobije dihidroklorid (23). Neutralizacijom sa natrijevim bikarbonatom nastaje spoj (24) [3].

Znanstvenici su uspjeli sintetizirati piridoksal uz pažljivu oksidaciju piridoksina kalijevim permanganatom i izolirati ga kao oksim (25), *Slika 15*. Djelovanjem natrijevog nitrita i klorovodične kiseline na oksim dobije se piridoksal, koji može postojati kao aldehid (26) ili kao ciklički acetal (27). Katalitičkom hidrogenacijom piridoksal oksima (25) nastaje piridoksamin (20), uz cink i octenu kiselinu kao reagense [3].



Slika 15. Sinteza piridoksala

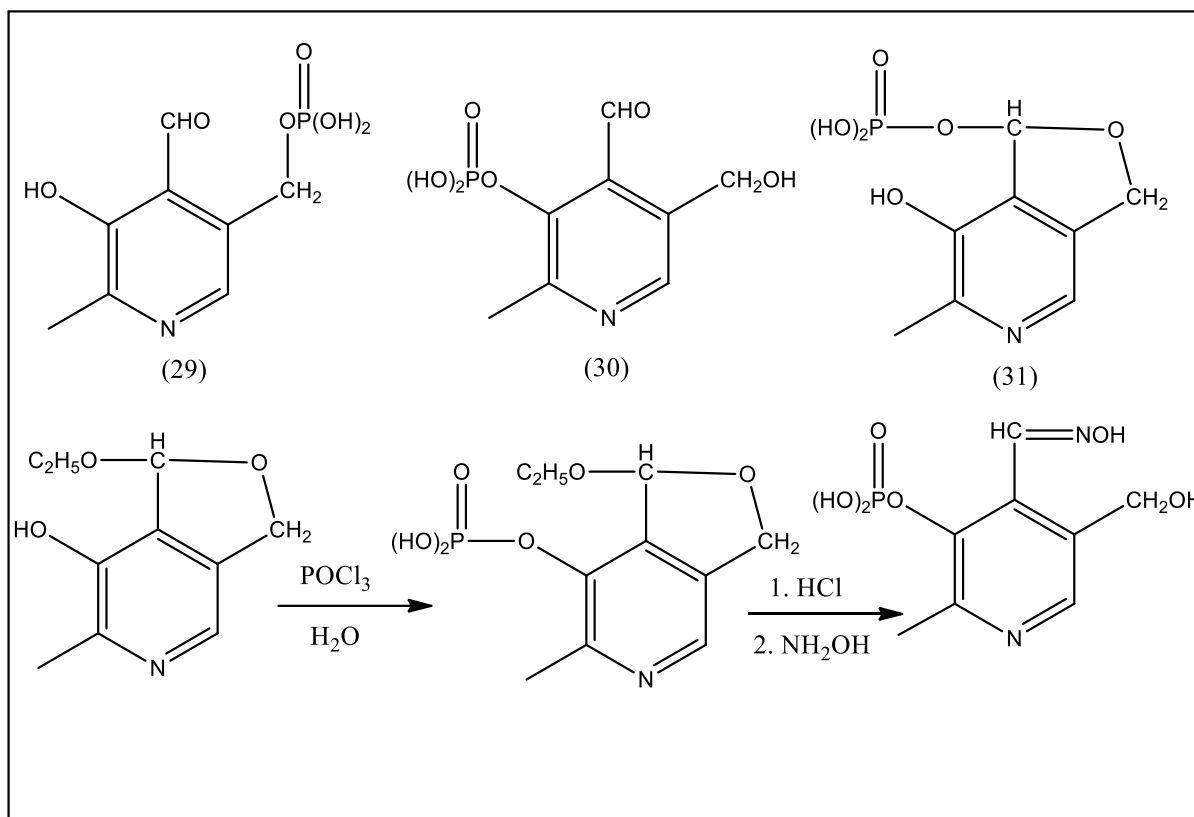
Dokaz strukture piridoksala dobiven je i sintezom izopiridoksala (28), *Slika 16.* [3].



Slika 16. Sinteza izopiridoksala

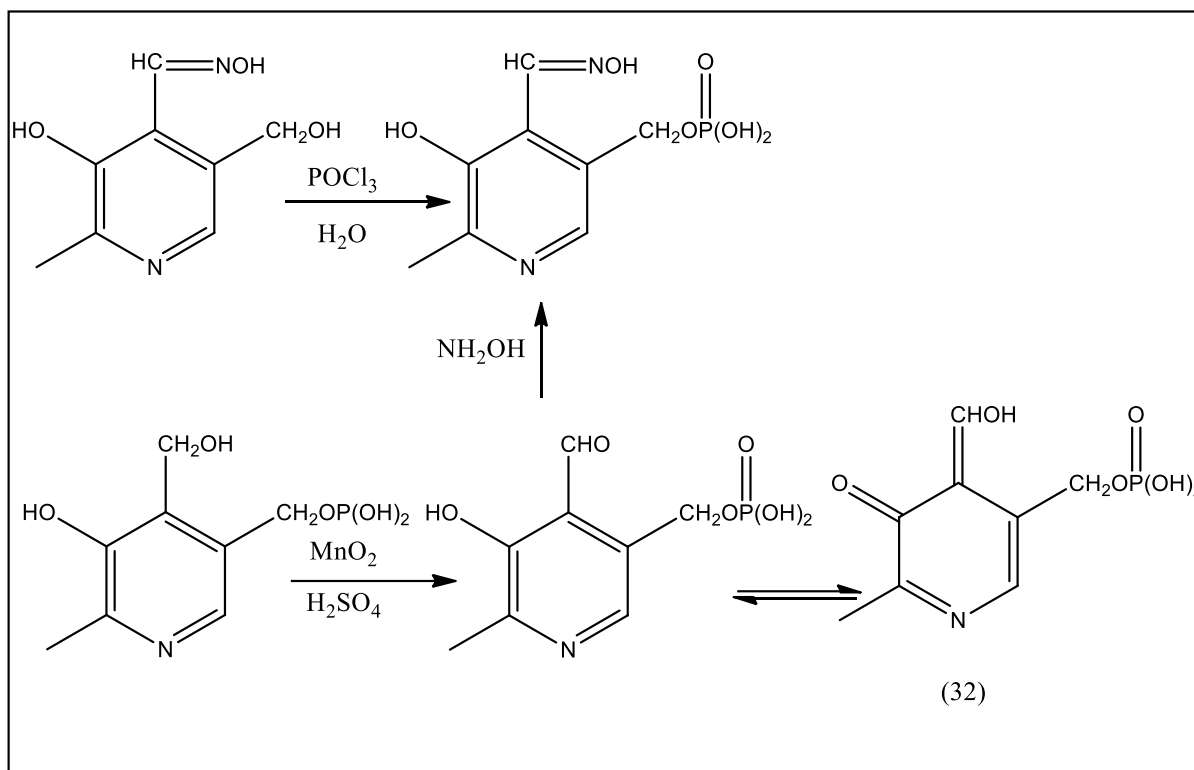
3.3. Piridoksal fosfat i piridoksamin fosfat

Piridoksal fosfat se u početku sintetizirao uz malo iskorištenje reakcijom fosforova oksiklorida i piridoksala u prisutnosti vode. Izolaciju piridoksal fosfata iz takve reakcijske smjese kao kalcijeve soli, te potvrdu strukture kao 4-formil-3-hidroksi-2-metil-5-piridilmetilfosforna kiselina (**29**), objavili su Heyl i suradnici [3].



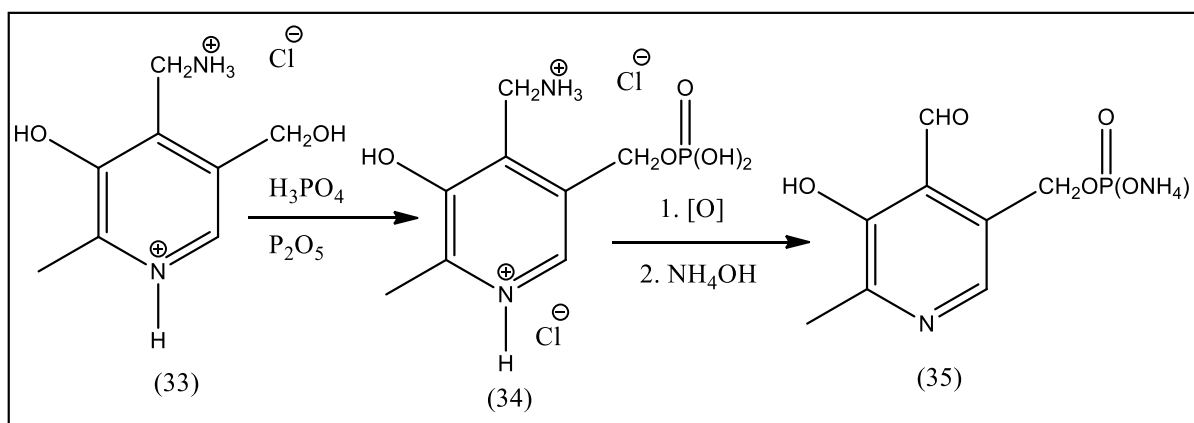
Slika 17. Dokaz strukture piridoksal fosfata, Heyl i suradnici

Na temelju analitičkih podataka koji su ranije bili poznati pretpostavilo se da bi piridoksal fosfat mogao imati tri strukture (29), (30) i (31), *Slika 17*. Struktura sa fosforiliranom fenolnom skupinom (30) je bila eliminirana kao rezultat negativnog testa sa željezovim kloridom za slobodnu fenolnu skupinu. Struktura (31) sa fosforiliranim C-4 hemiacetalnim ugljikovim atomom je također bila isključena zato što je isti oksim piridoksal fosfata dobiven ili fosforilacijom piridoksal oksima ili oksidacijom piridoksin fosfata nakon koje je slijedila konverzija u oksim (*Slika 18*). Piridoksal fosfat (29) je bio negativan na Gibbsov fenolni test, što je značilo da je fenolna skupina piridoksal fostat i da nije slobodna. Pomak u maksimumu ultraljubičastog absorpcijskog spektra piridoksal fosfata u alkalnoj otopini prema većim valnim duljinama, nego što je kod piridoksala objašnjeno je postojanjem keto oblika (32) pri određenom pH [3].



Slika 18. Dokaz za strukturu piridoksal fosfata

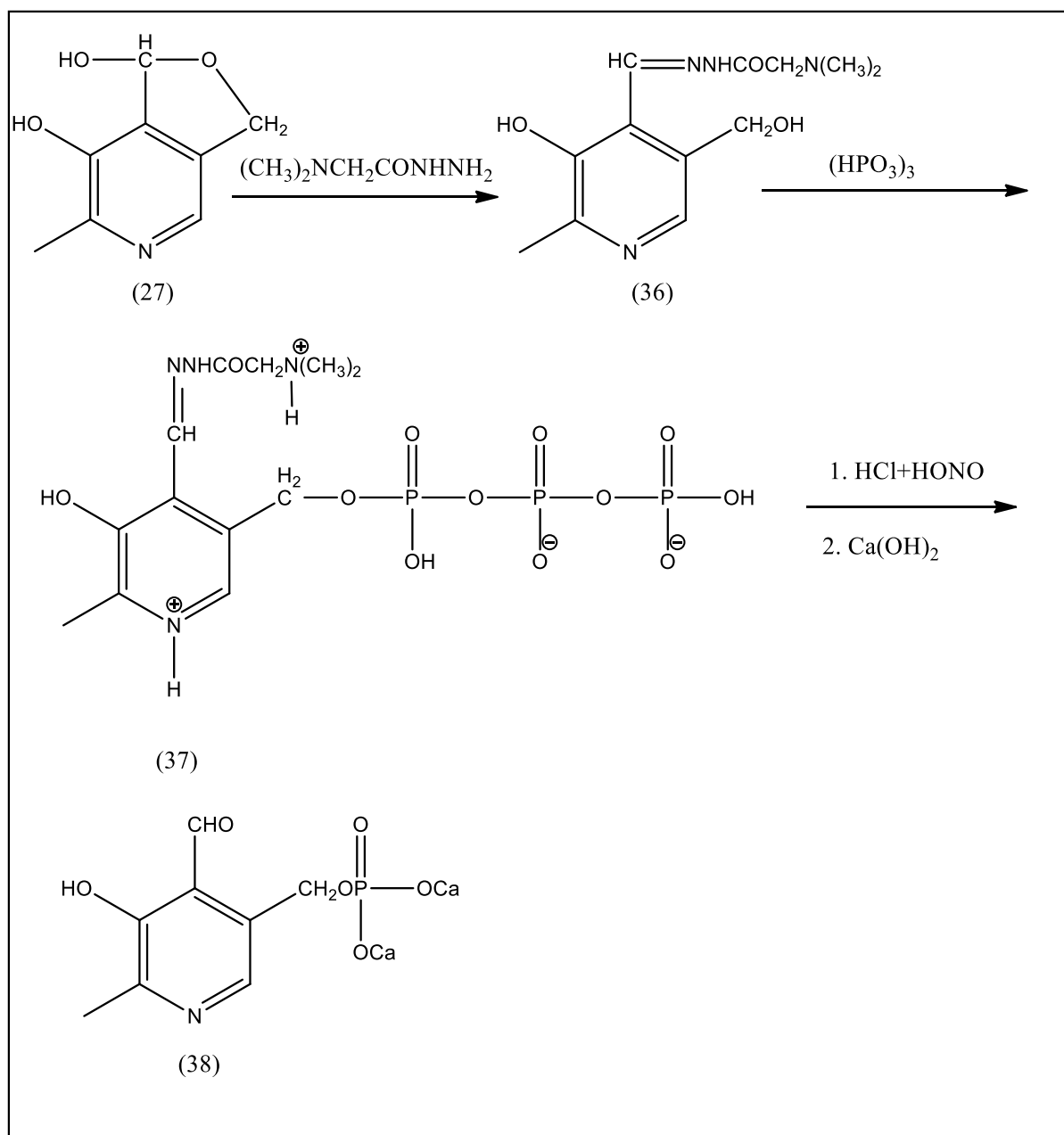
Sinteza piridoksal fosfata od strane Wilsona i Harrisa (*Slika 19.*) izvršena je fosforilacijom piridoksamin dihidroklorida (**33**) sa anhidridom fosforne kiseline, a potom oksidacijom amino skupine u formilnu. Produkt (**34**) je bio adsorbiran na stupcu aktivnog ugljena, kisik koji je također bio adsorbiran na aktivnom ugljenu, pretvorio je amino skupinu u formilnu, eluiranjem sa amonijevim hidroksidom dobivena je amonijeva sol piridoksal fosfata (**35**) [3].



Slika 19. Sinteza amonijeve soli piridoksal fosfata

Sinteza piridoksal fosfata od strane Viscontinija i suradnika uključivala je prvo konverziju piridoksala (**27**) u *N,N*-dimetilglicilhidrazon (**36**), koji je potom fosforiliran s metafosformom

kiselinom, *Slika 20*. Dobiveni ester 5-trifosforne kiseline (**37**) je hidroliziran s klorovodičnom kiselinom u prisutnosti dušikaste kiseline pri čemu je dobiven piridoksal fosfat koji je izoliran kao kalcijeva sol (**38**) [3].



Slika 20. Sinteza kalcijeve soli piridoksal fosfata

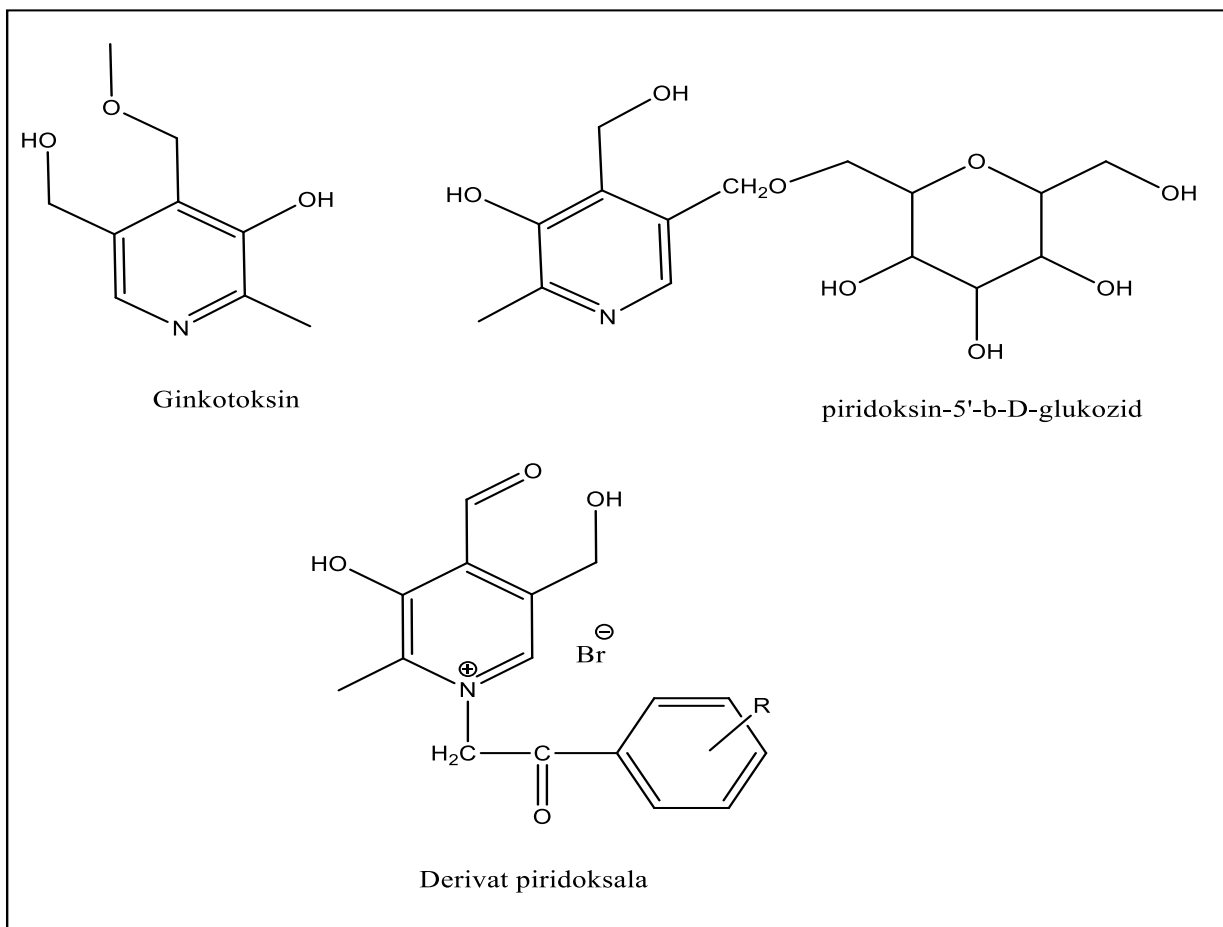
Heyl i njegovi suradnici su sintetizirali piridoksamin fosfat direktnom fosforilacijom piridoksamina u vodenoj otopini sa fosforovim oksikloridom. Produkt je izoliran i karakteriziran kao kristalni di-*p*-toluensulfonil derivat.

4. RAZNOLIKOST DERIVATA VITAMINA B₆

Za mnoge od derivata vitamina B₆ još uvijek nije određena točna funkcija ali se pretpostavlja da bi mogli imati ključnu ulogu u razumijevanju bioloških značajki vitamina B₆.

Ginkotoksin (4'- metilpiridoksin) iz stabla *Ginko biloba* i afričkog stabla *Albizia julibrisson* je jedan od derivata vitamina B₆. *Albizia julibrisson* također sintetizira druge kompleksnije derivate ali biološki mehanizam sinteze nije potpuno razjašnjen. Pretpostavlja se da ginkotoksin služe kao zaštitni spojevi od patogena zbog svoje toksičnosti. Ginkotoksin je pronađen u različitim tkivima stabla, a najviša koncentracija je u sjemenkama. [9].

Nekoliko derivata vitamina B₆ osobito derivata piridoksina postoje u biljkama kao β-D-glukozidi. Glavni oblik glukoziliranog vitamina B₆ je piridoksin-5'-β-D-glukozid, koji zauzima od 5 do 80% ukupne količine vitamina B₆ u biljkama. Glikozilirani oblici su obilni i nalazimo ih u soji, riži i stablu *Ginko bilobe*. Ne postoji objašnjenje za ovu veliku količinu glikoziliranog vitamina B₆, ali moguće objašnjenje bi bilo da oni zapravo mogu služiti kao spojevi koji će pohraniti vitamine ili čak i ugljikohidrate. Primjeri nekih derivata vitamina B₆ prikazani su na *Slici 21*. [9].



Slika 21. Neki derivati vitamina B₆

Znanstvenici su otkrili da se određeni fiziološki aktivni kemijski spojevi mogu dobiti ukoliko se tvari tretiraju s vitaminom B₆ i nekim od vitamina topljivih u masti, kao npr. A ili D u istom otapalu. Ove tvari koje su potrebne u pripremi derivata vitamina B₆ su se dobivala ekstrakcijom rižinih mekinja uz zakiseljavanje vode. Zatim je uslijedila adsorpcija aktivne tvari, te obrada eluata i tretiranje eluata sa agensom za aciliranje. Naravno moguće su i druge metode pripreve prigodnog vitamina B₆ ili se sam sintetički vitamin B₆ može koristiti. [6]

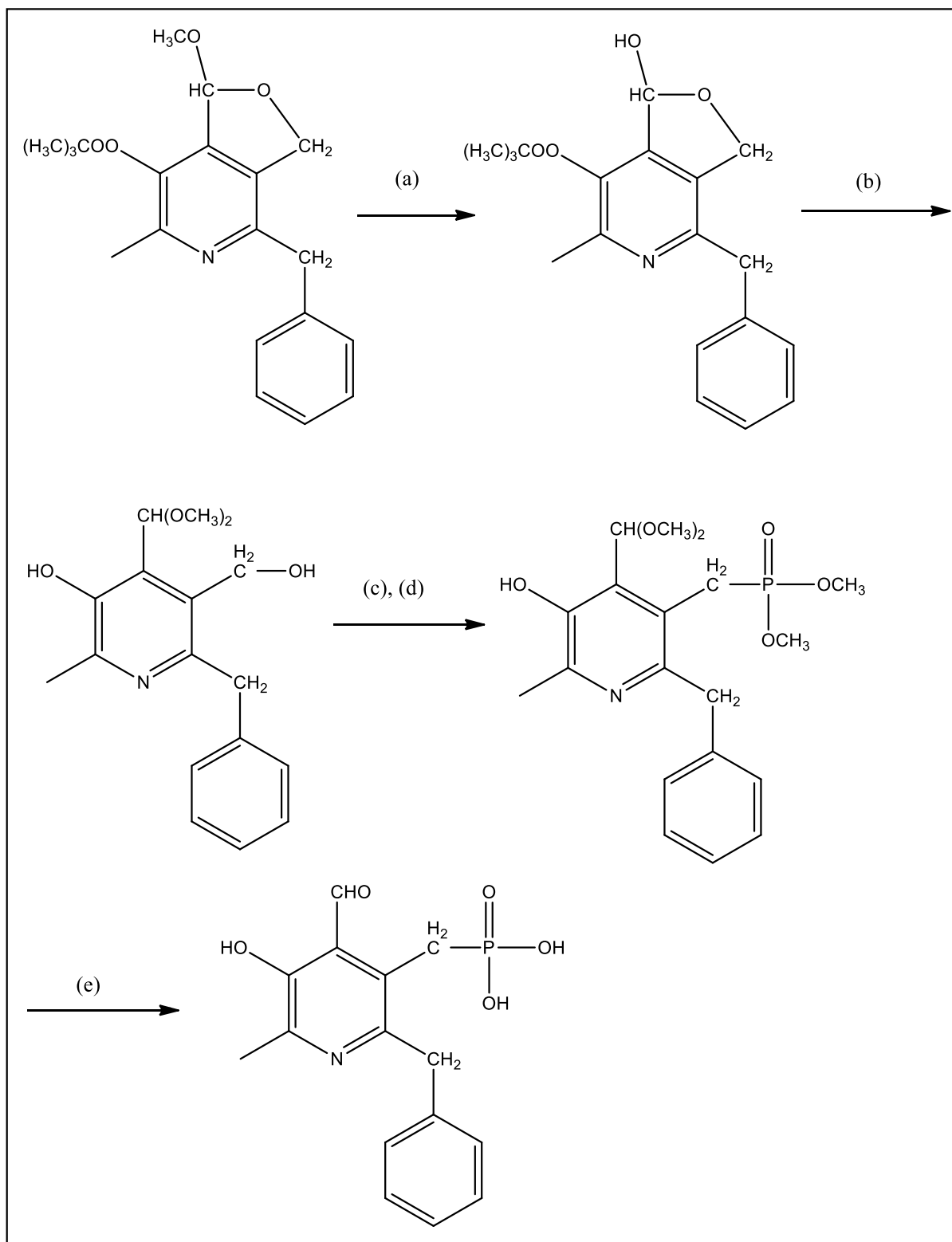
U pripremi ovih novih tvari, u prvom koraku se tretira odgovarajući koncentrat, s kiselinom i lužinom, koji uzrokuje uklanjanje i kemijsku modifikaciju nekih inaktivnih prisutnih tvari. Pod pojmom inaktivne tvari se ovdje misli na tvari koje posjeduju različitu fiziološku aktivnost od vitamina B₆, kao što su vitamin B₁, nikotinska kiselina, laktoflavin i drugi. [6]

Modificirani postupak može uključivati uklanjanje neaktivne i/ili kemijski izmijenjenog materijala ekstrakcijom s odgovarajućim otapalom i naknadnim razdvajanjem ovih fiziološki aktivnih tvari iz drugih neaktivnih materijala. [6]

Završni korak se sastoji od aciliranja tvari koje sadrže vitamin i daljnjim razdvajanjem željenog aciliranog vitamina ekstrakcijom s kloroformom. [6]

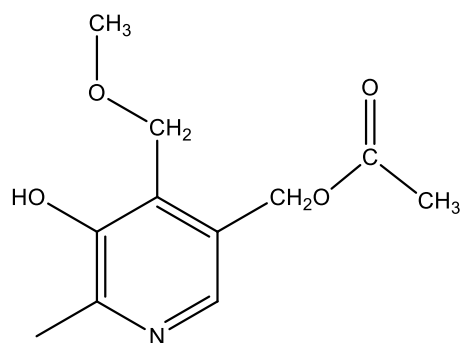
Ukoliko se aktivne tvari izoliraju iz drugih spojeva, različitih od rižinih mekinja, postupak se prilagođava ili se dopunjava s npr. taloženjem s etil nitritom, ili drugim postupcima koji uključuju blago oksidacijske agense kao 10% dušična kiselina.[6]

Slika 22. prikazuje primjer sinteze derivata piridoksala, odnosno 6-benzilnog analoga piridoksal-5'-fosfat-6-azo-fenil-2,4-disulfonata. Potrebni reagensi: (a) sumporna kiselina u acetonu, (b) kalijev hidroksid u metanolu, (c) sulfilni klorid u benzenu (d) trimetilfosfit, 70^o, 4 dana, (e) trimetilsilil bromid u metilen kloridu, preko noći. [7]

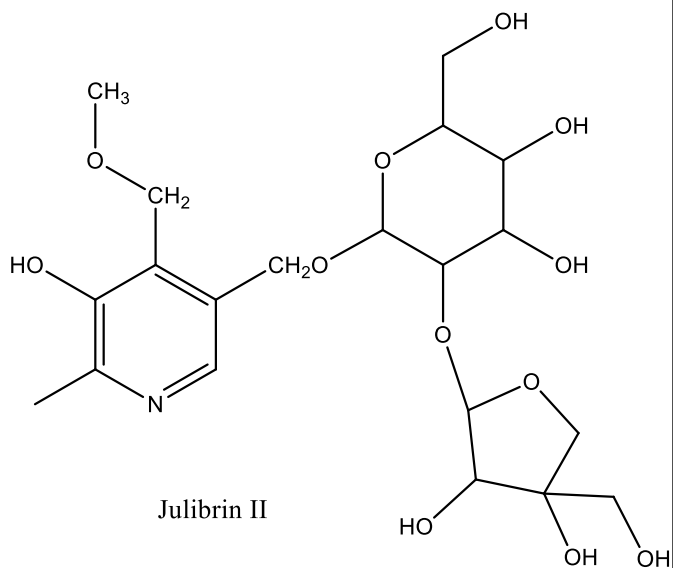


Slika 22. Sinteza 6-benzilnog analoga

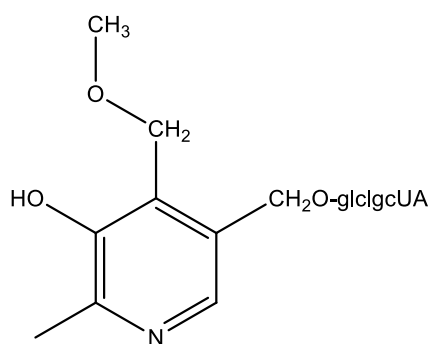
U derivate vitamina B₆ spadaju i 5'-acetil-4'-O-metilpiridoksin, Julibrin I, Julibrin II, N-heksanoil-piridoksamin, N-nonandiol-pirisoksamin monoamid, N-pentandiol-piridoksamin monoamid, 5'-deoksimpiridoksal, 4'-deoksimpiridoksin-5'-fosfat i mnogi drugi. Strukture nekih od ovih spojeva su prikazani na *Slici 23*. [8]



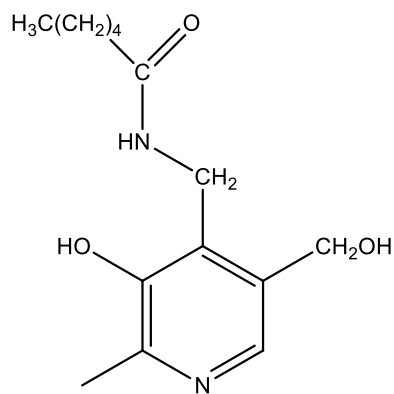
5'-O-acetil-4'-O-metilpiridoksin



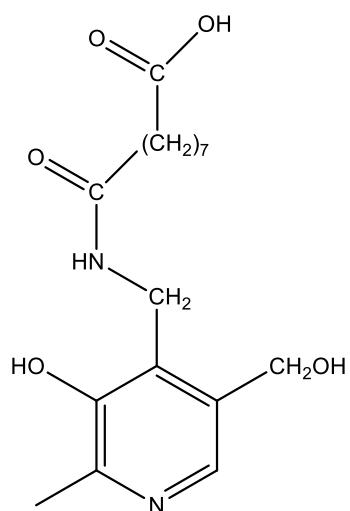
Julibrin II



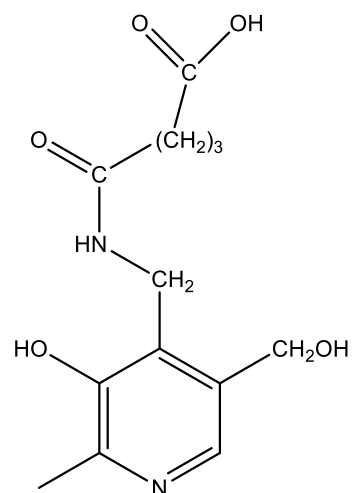
Julibrin I



N-heksanoil-piridoksamin



N-nonandiol-piridoksamin monoamid



N-pentandiol-piridoksamin monoamid

Slika 23. Derivati vitamina B6

5. ZAKLJUČAK

Vitamini i minerali su tvari koje su nam potrebne u manjim količinama za normalno funkcioniranje organizma. Kao rezultat njihovog nedostatka može doći do određenih poremećaja u organizmu i bolesti. Vitamini mogu biti topljivi u masti (D, E, K, A) ili u vodi (B, C). Vitamini B uključuju biotin, folat, niacin, pantotenu kiselinu, riboflavin, tiamin, vitamin B₆ i B₁₂. Vitamin B₆ obuhvaća šest spojeva: piridoksin- alkohol, piridoksal- aldehid i piridoksamin – primarni amin te njihove fosforilirane derivate.

Godine 1934., Paul György je otkrio spoj koji je mogao izliječiti bolest kože kod štakora i nazvao ga vitamin B₆. Godine 1939. Harris i Folkers su izvršili prvu sintezu piridoksina, a 1945. godine Snell je otkrio dvije nove strukture, piridoksal i piridoksamin. Nadalje mnogi su znanstvenici uspjeli izolirati i sintetizirati ove spojeva na različite načine. U novije vrijeme brojna su istraživanja derivata i novih analoga vitamina B₆ koji mogu imati potencijalno biološko djelovanje.

6. POPIS LITERATURE

- [1] J. M. Berg, J. L. Tymoczko, L. Stryer, *Biokemija*, Školska knjiga, Zagreb, 2013.
- [2] P. Bilski, M. Y. Li, M. Ehrenshaft, M. E. Daub, C. F. Chignell, *Vitamin B₆ (Pyridoxine) and Its Derivatives Are Efficient Singlet Oxygen Quenchers and Potential Fungal Antioxidants*, *Photochemistry and Photobiology*, 71(2), 2000., 129–134
- [3] H. G. Brooks, Jr. , *Vitamin B₆ derivatives and related compounds*, Iowa State University Of Science and Technology Ames, Iowa, 1961.
- [4] J. S. Casasa, D. Couceb, J. Sordo, *Coordination chemistry of vitamin B₆ and derivatives: A structural overview*, *Volumen 256*, 2012., 23–24, 3036–3062
- [5] L. J. Dunne, *Nutrition almanac/ Nutrition Search, Inc.*, John D. Kirschmann, 3rd. edition, McGraw Hill, 1990.
- [6] J. C. Keresztesy, Westfield, J. R. Stevens, Rahway, *Acyl derivatives of vitamin B₆*, Inc., Rahway, N. J., 11, 1942., 468-688
- [7] Y.-C. Kim, J.-S. Lee, K. Sak, F. Marteau , L. Mamedova , J.-M. Boeynaems, K. A. Jacobson, *Synthesis of pyridoxal phosphate derivatives with antagonist activity at the P2Y13 receptor*, *Biochemical Pharmacology*, 70, 2005., 266–274
- [8] S. Mooney, J.-E. Leuendorf, C. Hendrickson, H. Hellmann, *Vitamin B₆: A Long Known Compound of Surprising Complexity*, *Molecules*, 14, 2009., 329-351
- [9] V. R. Preedy, *B Vitamins and Folate: Chemistry, Analysis, Function and Effects*, Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge, 2013.
- [10] M. A. Vazquez, F. Munoz, J. Donoso, F. Garcia Blanco, *Schiff bases of alfa – amino acids and vitamin B₆ derivatives in surfactant media. A model for the coenzyme behaviour in PLP-dependent enzymes*, *Biochem. (Life Sci. Adv.)*, 1992., 241-254.
- Web izvori :
- [11] <http://lpi.oregonstate.edu/mic/vitamins/vitamin-B6> (4.4.2016.)
- [12] <http://www.studyandexam.com/vitamin-b6.html> (4.4.2016.)

