

Univerzitet Crne Gore
Metalurško-tehnološki fakultet Podgorica



Seminarski rad

HETEROPOLISAHARIDI

Student: Dakić Milena

Profesor: dr Milica Kosović-Perutović

Podgorica, mart 2026. godine

Sadržaj:

1. Apstrakt	3
2. Uvod	4
3. Hemijska struktura heteropolisaharida	5
3.1 Monosaharidni sastav i komponente.....	5
3.2 Način povezivanja i grananja.....	6
3.3 Nivoi strukturne organizacije.....	6
3.4 Specifični primjeri struktura.....	7
4. Heteropolisaharidi u medicini i farmaciji	7
4.1 Heparin.....	8
4.2 Lentinan.....	10
4.3 Hijaluronska kiselina.....	11
5. Primjena heteropolisaharida u industriji	13
5.1 Pektin.....	14
5.2 Ksantan.....	16
6. Zaključak	17
7. Literatura	18

Apstrakt

Heteropolisaharidi, poznati i kao **heteroglikani**, predstavljaju složene ugljenohidratne makromolekule koji se sastoje od **dvije ili više različitih vrsta monosaharidnih jedinica**. Za razliku od homopolisaharida, njihov hemijski sastav je znatno kompleksniji i često obuhvata aminošećere i uronske kiseline. Ovi polimeri mogu formirati linearne ili razgranate lance, a njihova struktura je uslovljena tipom glikozidne veze i položajem supstituenata.

U prirodi su heteropolisaharidi široko rasprostranjeni i obavljaju vitalne funkcije. Kod biljaka, najznačajniji predstavnici su **hemiceluloze** (poput ksilana i arabana) i **pektinske materije**, koje zajedno sa celulozom izgrađuju potporni materijal ćelijskih zidova. Posebnu grupu čine **biljne gume i hidrokoloide**, kao što su arapska guma, agar, alginati i karagenan, koji su poznati po sposobnosti formiranja izrazito viskoznih rastvora i stabilnih gelova. U životinjskim i ljudskim organizmima, heteropolisaharidi u obliku **glikozaminoglikana** (npr. hijaluronska kiselina, heparin i hondroitinsulfati) igraju esencijalnu ulogu u izgradnji vezivnog tkiva i biološkoj regulaciji.

Ovaj tekst pruža uvid u hemijsku klasifikaciju heteropolisaharida, njihovu strukturnu raznolikost i široku primjenu u **prehrambenoj, farmaceutskoj i tekstilnoj industriji**, gdje se koriste kao zgušnjivači, emulgatori i stabilizatori. Razumijevanje njihove reaktivnosti i interakcija sa drugim biomolekulima ključno je za shvatanje metaboličkih procesa i tehnološku primenu u organsko-hemijskoj tehnologiji.

Ključne riječi (heteropolisaharidi, hemiceluloza, pektinske materije, hidrokoloide, glikozaminoglikani, farmaceutska i hemijska industrija)

2. Uvod

Heteropolisaharidi predstavljaju složene biopolimere izgrađene od različitih monosaharidnih jedinica, čija strukturna raznolikost uslovljava širok spektar njihovih fizičko-hemijskih i bioloških svojstava. Upravo zbog te raznolikosti i specifičnih funkcija, istraživanje heteropolisaharida ima značajan uticaj na razvoj savremene nauke i tehnologije, kao i na unapređenje brojnih industrijskih oblasti.

Njihova primjena posebno je izražena u prehrambenoj industriji, gdje se koriste kao hidrokoloide, stabilizatori i emulgatori, ali i kao dijetetska vlakna i prebiotici koji doprinose očuvanju zdravlja digestivnog sistema. U farmaceutskoj industriji i medicini heteropolisaharidi imaju još značajniju ulogu, budući da učestvuju u razvoju lijekova sa imunološkim i antidijabetskim dejstvom, kao i u regeneraciji tkiva i savremenim terapijskim pristupima poput genske terapije.

Pored toga, njihova primjena obuhvata i kozmetičku industriju, gdje se koriste u proizvodima za zaštitu i njegu kože, kao i industrije papira, tekstila i drveta, gde doprinose razvoju ekološki prihvatljivijih tehnologija. Takođe, heteropolisaharidi imaju važnu ulogu u zaštiti životne sredine, naročito u procesima bioremedijacije i tretmana otpadnih voda.

Zahvaljujući svim navedenim svojstvima i mogućnostima primjene, heteropolisaharidi predstavljaju značajan predmet istraživanja, čiji dalji razvoj može doprinijeti unapređenju zdravlja ljudi, industrijskih procesa i očuvanju životne sredine.

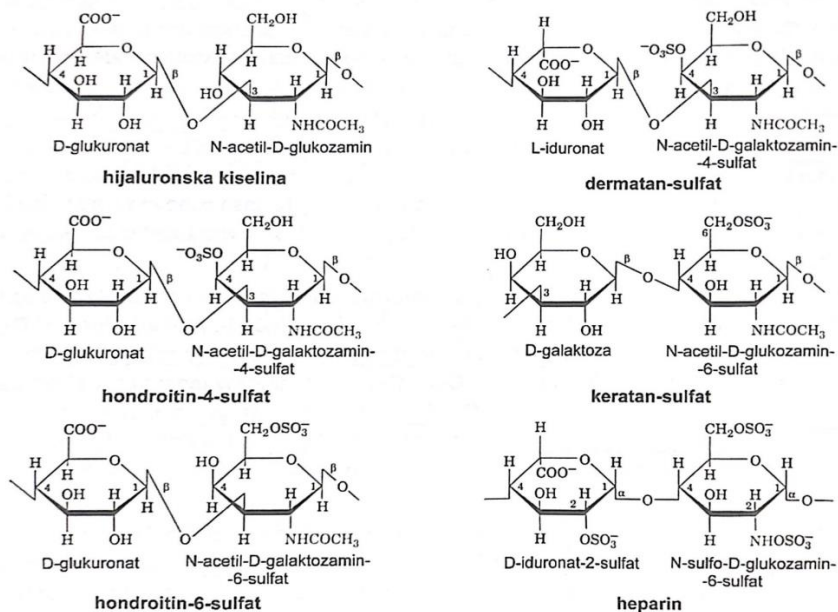
3. Hemijska struktura heteropolisaharida

Hemijska struktura heteropolisaharida karakteriše se prisustvom dvije ili više različitih vrsta monosaharidnih jedinica koje su međusobno povezane u duge lance. Ovi makromolekuli nastaju formalnom dehidratacijom između molekula monosaharida, pri čemu se šećerne jedinice ugrađuju u svom cikličnom poluacetalnom obliku. Ključne karakteristike njihove hemijske strukture se mogu obuhvatiti kroz nekoliko cjelina.

3.1. Monosaharidni sastav i komponente

Heteropolisaharidi su strukturno znatno raznovrsniji od homopolisaharida jer njihove gradivne jedinice mogu biti različiti šećeri i njihovi derivati:

- Pentoze i heksoze: Česti gradivni blokovi su glukoza, galaktoza, manoza, ksiloza i arabinoza.
- Uronske kiseline: Mnogi heteropolisaharidi sadrže šećerne kiseline poput glukuronske, galakturonske ili manuronske kiseline.
- Aminošećeri: U sastav često ulaze derivati poput N-acetilglukozamina (npr. u mureinu ili hitinu).
- Dodatne grupe: Struktura može uključivati i ostatke sumporne, fosforne i sirćetne kiseline, kao što je slučaj heparina. (*Biohemija, S. Spasić, Z. J. Ivanović, V. S. Kalimanovska*)

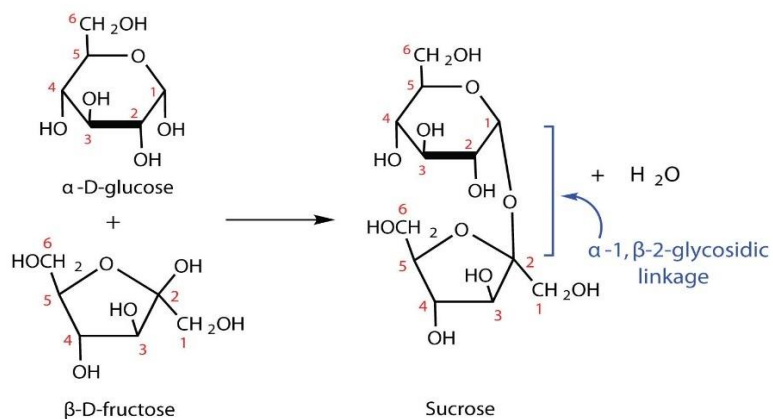


Slika 1. Primjeri heteropolisaharida (*S. Spasić, Z. J. Ivanović, V. S. Kalimanovska; str.44.*)

3.2. Način povezivanja i grananje

Monosaharidne jedinice su povezane glikozidnim vezama (najčešće O-glikozidnim) uz izdvajanje molekula vode.

- Linearni i razgranati nizovi: Mogu formirati jednostavne linearne lance ili složene razgranate strukture gde se bočni nizovi vezuju za glavni lanac preko različitih položaja (npr. veze 1→3, 1→4 ili 1→6).
- Konfiguracija veza: Tip veze (α ili β) presudno utiče na prostorni oblik. Na primjer, pektini su povezani $\alpha(1\rightarrow4)$ vezama, dok su hemiceluloze često povezane $\beta(1\rightarrow4)$ vezama. (*POLYSACCHARIDES STRUCTURAL DIVERSITY AND FUNCTIONAL VERSATILITY, SEVERIAN DUMITRIU, str.1*).



Slika 2.. Prkaz glikozidne veze između dvije različite monosaharidne jedinice

3.3. Nivoi strukturne organizacije

Struktura heteropolisaharida se može posmatrati kroz četiri nivoa:

- Primarna struktura: Redosled kojim su različite monosaharidne jedinice povezane u lancu.
- Sekundarna struktura: Prostorna orijentacija lanca uslovljena konformacijom šećernih jedinica i rotacijom oko glikozidnih veza.
- Tercijarna struktura: Zavisi od interakcija između različitih funkcionalnih grupa (hidroksilnih, amino, sulfo grupa), što može dovesti do formiranja specifičnih oblika poput trostrukog heliksa (karakteristično za neke bioaktivne polisaharide gljiva).
- Kvaternarna struktura: Podrazumeva stvaranje većih agregata iz individualnih polisaharidnih lanaca putem vodoničnih veza ili drugih interakcija.

3.4. Specifični primjeri struktura

- Peptidoglikan (Murein): Sastoji se od paralelnih lanaca u kojima se naizmenično smenjuju N-acetilglukozamin (NAG) i N-acetilmuraminska kiselina (NAM), povezani $\beta(1\rightarrow4)$ vezama i poprečnim tetrapeptidnim mostovima.
- Pektinske materije: Glavni lanac čine jedinice D-galakturonske kiseline povezane $\alpha(1\rightarrow4)$ vezama, pri čemu su karboksilne grupe često esterifikovane metanolom.
- Hemiceluloze (npr. ksilani): Često imaju glavni lanac od jedinica ksiloze na koji su vezani ostaci arabinoze ili uronskih kiselina.
- Biljne gume (npr. ksantan): Poseduju složenu strukturu gde je glavni lanac od glukoze, a na svakom drugom molekulu glukoze vezan je trisaharidni bočni niz sastavljen od manoze i glukuronske kiseline. (*The Polysaccharides, GERALD O. ASPINALL*).

4. Heteropolisaharidi u medicini i farmaciji

U savremenoj medicini i farmaciji, heteropolisaharidi su prepoznati kao moćni biološki modifikatori odgovora (BRM), supstance koje mobilisu imuni sistem domaćina za borbu protiv malignih oboljenja, virusa i rezistentnih infekcija.

Najznačajniji medicinski proboj ostvaren je upotrebom heteroglikana iz gljiva, poput lentinana i krestina (PSK), koji su registrovani lekovi u adjuvantnoj terapiji kancera digestivnih organa, pluća i dojke. Pored onkologije, njihova primjena je esencijalna u tretmanu virusnih infekcija, uključujući HIV, hepatitis i herpes, gde značajno usporavaju replikaciju virusa i jačaju prirodnu odbranu organizma.

Farmaceutski značaj heteropolisaharida životinjskog porijekla, kao što su glikozaminoglikani (heparin, hijaluronska kiselina i hondroitinsulfati), ogleda se u njihovoj nezamjenljivoj ulozi u izgradnji vezivnog tkiva i kontroli koagulacije krvi. Ovi molekuli se takođe klasifikuju kao dijetetska vlakna koja štite sluzokožu crijeva i djeluju kao prebiotici, čime direktno pomažu u prevenciji i regulaciji hroničnih stanja poput dijabetesa, hipertenzije i povišenog holesterola.

Inovativna istraživanja danas koriste polisaharidne komplekse čak i kao vektore u genskoj terapiji, dok se u kozmetologiji masovno primenjuju u vidu zaštitnih krema za regeneraciju kože i zaštitu od UV zračenja. (*Doktorska disertacija, Maja S. Kozarski*).

4.1 Heparin

Heparin je kiseli heteropolisaharid koji pripada grupi glikozaminoglikana, molekula koji su od esencijalnog značaja za izgradnju vezivnog tkiva i služi u ljudskom organizmu.

Značaj i upotreba heparina u medicini i farmaciji zasnivaju se na sledećim svojstvima:

- Antikoagulaciono dejstvo: Kao i drugi biološki aktivni polisaharidi sa specifičnim funkcijama, heparin ispoljava sposobnost sprečavanja zgrušavanja krvi, što ga čini ključnim u terapiji i prevenciji tromboze i začepljenja krvnih sudova.
- Strukturna i potporna uloga: Zajedno sa hijaluronskom kiselinom i hondroitinsulfatima, učestvuje u formiranju međustaničnog matriksa i održavanju integriteta tkiva.
- Biološka regulacija: Polisaharidi poput heparina obavljaju posebne zadatke u organizmu, od kojih su najvažnije imunološke funkcije i stvaranje zaštitne sluzi.

U širem naučnom kontekstu, heparin se proučava kao dio grupe glikana koji poseduju ogroman kapacitet za prenos bioloških informacija, što omogućava preciznu regulaciju različitih interakcija između ćelija kod viših organizama. Heparin se prirodno sintetisuje u tijelu, a primarni organ odgovoran za njegovo stvaranje i oslobađanje je jetra. Nakon sinteze, jetra ga otpušta direktno u krvotok (THE JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY, Structure of Heparin – 1974.).

Glavne karakteristike strukture heparina su:

- Osnovne gradivne jedinice: Heparin se sastoji od ponavljajućih disaharidnih jedinica koje obuhvataju aminošećere i uronske kiseline.
- Kiselost i supstituenti: Klasifikuje se kao "kiseli" polisaharid jer u svom sastavu sadrži ostatke sumporne kiseline (sulfatne grupe). Pored sumporne, heteropolisaharidi ovog tipa mogu sadržati i ostatke fosforne ili sirćetne kiseline.

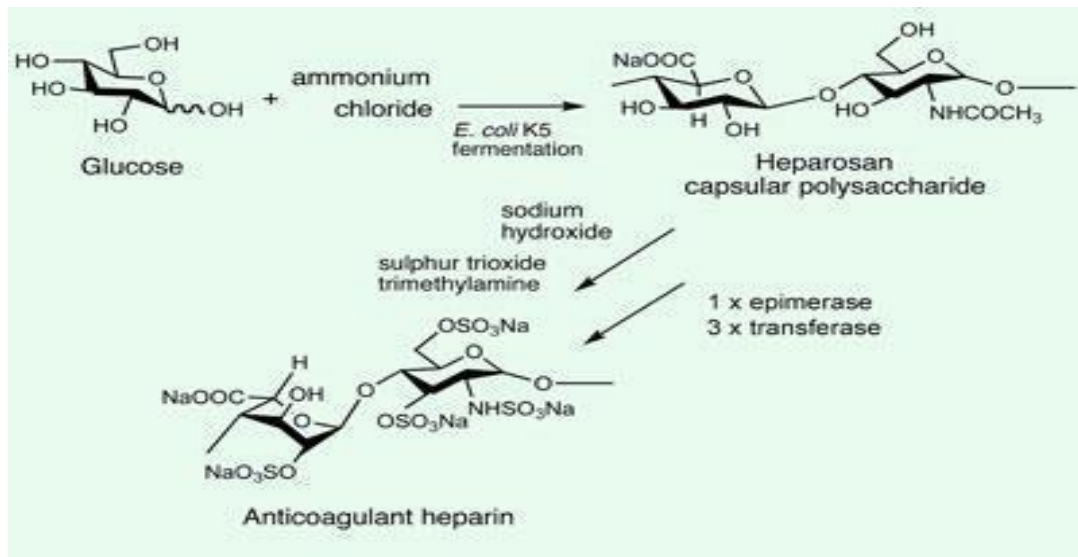
Kako struktura određuje djelovanje:

Negativan naboj je ključan za vezivanje molekula za protein. Sulfatne grupe omogućavaju jake elektrostatske interakcije, bez tog naboja nema vezivanja za antitrombin.

Pentasaharidna sekvenca je ključna za aktivaciju, samo dio molekule sa ovom sekvencom može aktivirati antitrombin to je "aktivno mjesto" heparina. Dužina lanca određuje šta inhibira: Dugi lanac (nefrakcionirani heparin) može povezati antitrombin i trombin i Kratki lanac (LMWH) ne može vezati trombin. (THE JOURNAL OF BIOLOGICAL CHEMISTRY, Structure of Heparin – 1974.)

Heparin je našao svoju primjenu u medicine veoma brzo - kao antikoagulant, međutim, zbog velike potražnje javlja se problem manjaka efektivnog vještačkog heparina. Nakon više neuspjelih pokušaja, jedan od instituta u Americi započinje svoje istraživanje i predviđa bezbjednu sintezu heparina za samo 5 godina.

- „Ako se hemoenzimska sinteza koju su opisali Linhardt i saradnici može povećati (skalirati) tako da se proizvedu količine koje se koriste u medicini, naročito ako se sintetički heparin može obogatiti jedinstvenom pentasaharidnom sekvencom odgovornom za njegovo antikoagulantno djelovanje, to će predstavljati značajan napredak.“ navodi se u *Flask synthesis promises untainted heparin - By Ananyo Bhattacharya* gdje su opisali mogućnost bezbjedne sinteze heparina iz bakterije *E.coli*. (ANANYO BHATTACHARYA- AUGUST 2008)



Slika 3. Hemoenzimska sinteza heparina iz ugljenohidratnog omotača bakterije *E. coli*.

Prednosti heparina uključuju:

- Djeluje brzo.
- Ne uzrokuje dugotrajne nuspojave.
- Njegovo djelovanje se može poništiti antidotom za heparin koji se zove protamin.
- Ima višedecenijsku istoriju primjene.

(<https://my.clevelandclinic.org/health/treatments/16017-heparin-infusion>)

4.2 Lentinan

Lentinan je najviše proučavan i jedan od najefikasnijih biološki aktivnih polisaharida izolovanih iz plodonosnog tijela jestive i ljekovite gljewe Shiitake (*Lentinula edodes*). Ovaj molekul je po svom hemijskom sastavu β -D-glukan i u medicini se klasifikuje kao snažan biološki modifikator odgovora (BRM).

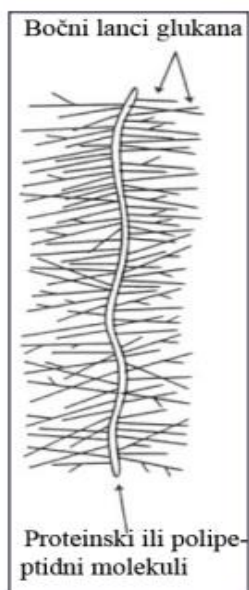
Hemijska struktura:

Struktura lentinana je ključna za njegovu biološku aktivnost: Osnovu ovog molekula čini glavni niz izgrađen od molekula glukoze povezanih β - (1→3)-glikozidnim vezama. Jedan dio glukoznih jedinica iz osnovnog niza je supstituisan preko položaja O-6 sa bočnim lancima koji su međusobno vezani β - (1→6)-glikozidnim vezama.

Za molekule β -D-glukana mogu biti vezani i neki drugi molekuli šećera kao što su manoz, ksiloza, galaktoza ili uronske kiseline, a takođe i peptidi i proteinski molekuli, slika 3.

U vodenim rastvorima lentinan zauzima konformaciju trostrukog heliksa. Istraživanja su pokazala da je ova konformacija presudna za njegovo antitumorno dejstvo, jer se denaturacijom (narušavanjem heliksa) njegova efikasnost značajno smanjuje.

(Doktorska disertacija, Maja S. Kozarski).



Slika 4. Proteo-glukanski kompleks (Boldizar, 1998.).

Medicinski značaj i primjena:

Lentinan je u Japanu registrovan kao **lek protiv kancera** još od decembra 1985. godine i nalazi se među prvih deset antitumornih preparata na tom tržištu.

- **Onkologija:** Koristi se kao adjuvantna terapija (dodatak hemoterapiji) kod kancera organa za varenje, prvenstveno **želuca i debelog creva**.
- **Mehanizam dejstva:** Lentinan ne napada direktno ćelije tumora, već deluje kao **potencijator odbrane domaćina (HDP)**. On stimuliše sazrevanje i aktivnost ćelija imunog sistema, uključujući **makrofage, T-ćelije, B-ćelije i prirodne ubice (NK ćelije)**, i podstiče proizvodnju interferona.
- **Antivirusno dejstvo:** Pokazuje jaku aktivnost protiv **HIV virusa**, naročito u kombinaciji sa lekom AZT, jer usporava infekciju T-ćelija i inhibira replikaciju virusa. Takođe povećava otpornost na viruse herpesa (*Herpes simplex* I i II), gripa i adenovirus tip 12.
- **Ostale aktivnosti:** Lentinan ispoljava antibakterijsko dejstvo protiv patogena kao što su *Mycobacterium tuberculosis* i *Listeria monocytogenes*.

4.3 Hijaluronska kiselina

Hijaluronska kiselina predstavlja važan heteropolisaharid iz grupe glikozaminoglikana, koji je široko rasprostranjen u vezivnim, epitelnim i nervnim tkivima. Građena je od ponavljajućih disaharidnih jedinica koje čine D-glukuronska kiselina i N-acetil-D-glukozamin, povezanih glikozidnim vezama. Ovaj polimer je linearan, nerazgranat i izrazito hidrofilan, što mu omogućava vezivanje velikih količina vode i formiranje viskoznih gelova.

Kako struktura određuje djelovanje:

Hijaluronska kiselina je visokomolekularni glikozaminoglikan građen od ponavljajućih disaharidnih jedinica (glukuronska kiselina i N-acetilglukozamin), čija duga i izrazito hidrofilna struktura omogućava vezivanje velikih količina vode putem vodikovih veza, pri čemu se formira viskoelastični gel u ekstracelularnom matriksu; upravo ta struktura uslovljava njeno djelovanje jer obezbjeđuje hidrataciju tkiva, mehaničku potporu i otpornost na pritisak, omogućava podmazivanje zglobova smanjenjem trenja te olakšava migraciju ćelija i procese zarastanja, pri čemu, za razliku od sulfatiranih glikozaminoglikana poput heparina, djeluje prvenstveno fizičko-mehanički, a ne putem direktne enzimske aktivnosti. (CHEMISTRY OF HYALURONIC ACID AND ITS SIGNIFICANCE IN DRUG DELIVERY STRATEGIES: A REVIEW)

Zahvaljujući svojim hemijskim osobinama, hijaluronska kiselina ima značajnu biološku ulogu u organizmu. Ona učestvuje u hidrataciji tkiva, podmazivanju zglobova i održavanju strukture ekstracelularnog matriksa. Takođe, pokazuje antiinflamatorno djelovanje i učestvuje u procesima zarastanja rana i regeneracije tkiva .

U medicini i farmaciji hijaluronska kiselina ima široku primjenu. Koristi se u terapiji osteoartritisa putem intraartikularnih injekcija, gdje poboljšava pokretljivost zglobova i smanjuje bol. U oftalmologiji se primjenjuje tokom hirurških zahvata i u obliku kapi za oči, dok se u dermatologiji koristi kao sastojak dermalnih filera i preparata za hidrataciju kože. Pored toga, značajna je i njena primjena u savremenim farmaceutskim sistemima za kontrolisano oslobađanje lijekova. (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28226376/>).

Savremena naučna istraživanja usmjerena su na proučavanje njene uloge u regenerativnoj medicini, tkivnom inženjeringu i nanomedicini. Pokazano je da hijaluronska kiselina može stimulisati sintezu kolagena, poboljšati elastičnost kože i učestvovati u regulaciji ćelijske migracije i imunološkog odgovora (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10231509/>)

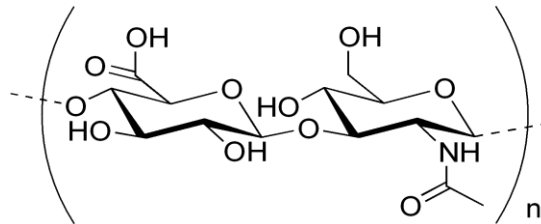
Na osnovu navedenog, hijaluronska kiselina predstavlja biomolekul od velikog značaja, čija primjena u savremenoj medicini i farmaciji kontinuirano raste zahvaljujući njenim jedinstvenim fizičko-hemijskim i biološkim svojstvima.

Djelovanje i naučna istraživanja u mikrobiologiji

Naučna istraživanja ukazuju na kritičnu ulogu hijaluronske kiseline u procesima infekcije. Patogeni mikroorganizmi su razvili mehanizme za njenu razgradnju kako bi lakše prodrli u domaćina:

- **Enzim hijaluronidaza:** Bakterije poput *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes* i *Streptococcus agalactiae* luče ovaj enzim.
- **Mehanizam invazije:** Hijaluronidaza razgrađuje hijaluronsku kiselinu u vezivnom tkivu domaćina. Ovaj proces direktno olakšava invazivnost patogena, omogućavajući bakterijama da se sa početnog mjesta infekcije brzo prošire u dublja tkiva.
- **Faktor patogenosti:** Zbog ove sposobnosti, hijaluronidaza se smatra značajnim faktorom patogenosti koji direktno utiče na težinu i širenje bakterijskih oboljenja.

Razumijevanje ovih interakcija između bakterijskih enzima i hijaluronske kiseline ključno je za razvoj novih terapijskih strategija i antibiotika koji bi mogli blokirati ove puteve širenja infekcije. (Biohemija – M. Miholjić, J. Kavarić)



Slika 5. Struktura hijaluronske kiseline

Zloupotreba: Hijaluronska kiselina se smatra bezbjednom i biokompatibilnom supstancom, ali njena sve šira primjena, posebno u estetskoj medicini, dovela je i do njene česte zloupotrebe. Najveći problem predstavlja nestručna primjena i nekontrolisana upotreba preparata van medicinskih standarda. Nepravilnom upotrebom u svrhu estetskih korekcija može doći do pretjerane količine filera u tretiranoj regiji, deformiteta tkiva, oštećenja lokalnih krvnih sudova i preduboka aplikacija.

5. Primjena heteropolisaharida u industriji

Primjena heteropolisaharida (heteroglikana) u industriji je izuzetno široka i raznolika, zahvaljujući njihovim specifičnim fizičko-hemijskim svojstvima kao što su sposobnost geliranja, zgušnjavanja i stabilizacije, kao i njihovoj izraženoj biološkoj aktivnosti.

U prehrambenoj industriji su nezaobilazni kao tehnološki aditivi i komponente funkcionalne hrane:

- Zgušnjivači i agensi za geliranje:
 - Pektin: Koristi se prvenstveno u proizvodnji džemova, želea i voćnih premaza.
 - Agar: Vjerovatno najjači agens za geliranje; koristi se za glaziranje peciva, u pudinzima, mlečnim proizvodima (jogurt, sir) i konzervama mesa i ribe.
 - Karagenan: Upotrebljava se za stabilizaciju sladoleda, zamrznutih deserata i mesnih prerađevina, kao i za bistrenje piva jer taloži proteine.
- Stabilizatori i emulgatori:
 - Ksantan: Formira viskozne rastvore stabilne u kiselim sistemima i pri promenama temperature, pa služi kao stabilizator u prelivima i emulzijama.
 - Guma arabika: Ključni emulgator u gaziranim pićima jer onemogućava kristalizaciju šećera.
- Antioksidativna zaštita: Polisaharidni ekstrakti iz gljiva (npr. *Ganoderma applanatum*) istražuju se kao prirodni antioksidansi koji sprečavaju kvarenje namirnica (promjenu boje, ukusa i teksture).
- Prebiotici i dijetetska vlakna: Materije poput manana i inulina služe kao podloga za korisne bakterije u digestivnom traktu, što je osnova industrije suplemenata vrijedne milijarde dolara.

Imaju značajnu upotrebu i u tekstilnoj a i u papirnoj industriji:

- Alginati i celulozni etri: Koriste se kao zgušnjivači u bojama za štampanje tekstila i u proizvodnji veštačkih vlakana.
- Industrija papira: Upotrebljavaju se za poboljšanje strukture papira i kao aditivi u premazima.

Ostale primjene:

- Drvna industrija: Istraživanja ukazuju na primjenu enzimskih sistema gljiva (koji su povezani sa heteroglikanima) za biopulping, čime se štedi energija pri konverziji drveta u papirnu pulpu uz manje ekološko zagađenje.
- Zaštita životne sredine: Koriste se u procesima bioremedijacije i tretmana otpadnih voda.
- Guma i goriva: Antioksidansi na bazi ovih jedinjenja dodaju se u proizvodnju gume, benzina i biodizela radi spriječavanja oksidativne degradacije.

(Jovana R. Stefanović Kojić Doktorska disertacija, Beograd 2015.)

5.1 Pektin

Pektini ili pektinske materije su složeni heteropolisaharidi koji predstavljaju ključne strukturne komponente ćelijskih zidova svih biljnih tkiva. Zajedno sa celulozom, hemicelulozama i proteinima, oni izgrađuju potporni materijal koji biljkama daje čvrstinu.

Hemijska struktura i sastav:

- Glavna komponenta: Osnovnu strukturu pektina čini D-galakturonska kiselina, koja se u molekulu nalazi u svom piranoznom obliku.
- Način povezivanja: Jedinice galakturonske kiseline su međusobno povezane $\alpha(1\rightarrow4)$ -glikozidnim vezama, formirajući duge lance.
- Monosaharidni profil: Pored galakturonske kiseline, u sastav pektina u manjim količinama ulaze i drugi šećeri: α -L-ramnopiranoza, D-galaktopiranoza, L-arabinofuranoza, D-ksilopiranoza i D-glukopiranoza.
- Esterifikacija: Karboksilne grupe galakturonske kiseline su često esterifikovane metanolom (metil-estri). Step en ove esterifikacije (broj metoksi grupa) direktno određuje njihovu rastvorljivost u vodi i moć geliranja – veći broj metoksi grupa obično znači bolju moć želiranja. (Biohemija – M. Miholjić, J. Kavarić)

Fizičko-hemijske osobine:

Pektini se klasifikuju kao hidrokoloidei, što znači da u kontaktu sa vodom bubre i formiraju viskozne rastvore. Njihova najznačajnija osobina je sposobnost da u prisustvu kiselina i šećera, ili jona kalcijuma, formiraju stabilne gelove.

Nalaženje u prirodi i izvori:

Pektini su prisutni u svim biljkama, ali su određeni plodovi voća posebno bogati ovim materijama: Jabuka, limun, dunja, kruška, šljiva i kora šećerne repe.

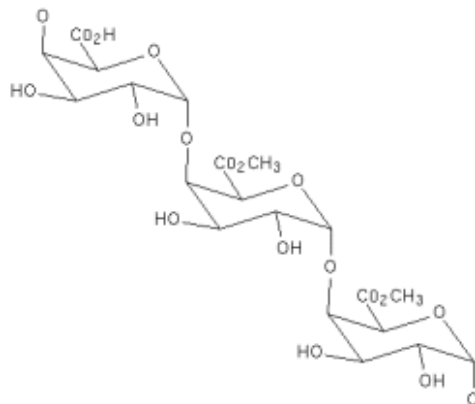
Kako struktura određuje djelovanje:

Pektin je polisaharid građen pretežno od D-galakturonske kiseline sa prisutnim karboksilnim (–COOH) grupama i različitim stepenom esterifikacije, a upravo takva struktura određuje njegovo djelovanje jer omogućava vezivanje vode i međusobno povezivanje lanaca u trodimenzionalnu mrežu, čime nastaje gel; stepen esterifikacije utiče na način geliranja (uz šećer i kiselu sredinu kod visokoesterifikovanog ili uz Ca^{2+} kod niskoesterifikovanog pektina), dok njegova hidrofilnost i sposobnost bubrenja u vodi dovode do povećanja viskoznosti u crijevima, usporavanja apsorpcije glukoze i holesterola te regulacije probave, zbog čega pektin djeluje kao gelirajuće sredstvo i dijetalno vlakno.

Primjena u industriji:

Zbog svojih jedinstvenih svojstava, pektin ima široku primjenu, prvenstveno u prehrambenoj industriji:

- Sredstvo za želiranje: Nezaobilazan je u proizvodnji džemova, želea, marmelada i voćnih premaza.
- Zgušnjivač i stabilizator: Koristi se za postizanje željene konzistencije u različitim prehrambenim proizvodima.
- Dijetetska vlakna: Pektini se ubrajaju u rastvorljiva prehrambena vlakna (TDF – *Total Dietary Fiber*) koja su rezistentna na ljudske digestivne enzime i imaju povoljan uticaj na varenje.



Slika 6. Struktura pektina

(<https://cybercolloids.net/information/technical-articles/introduction-to-pectin-structure/>)

5.2 Ksantan

Ksantan (poznat i kao ksantan guma) je složeni heteropolisaharid koji se u industriji i nauci klasifikuje kao jedna od najvažnijih biljnih guma ili hidrokoloida.

Hemijska struktura:

Struktura ksantana je veoma složena i precizno definisana:

- Glavni lanac: Izgrađen je od jedinica β -D-glukopiranoze (slično celulozi).
- Bočni nizovi: Na svakoj drugoj jedinici glukoze u glavnom lancu, na položaju O-3, vezana je trisaharidna jedinica.
- Sastav bočnog niza: Ovaj trisaharid se sastoji od β -D-manopiranozila, β -D-glukuronopiranozila (uronska kiselina) i još jednog ostatka manoze koji sadrži acetil grupu. (Tehnološki fakultet u Novom Sadu).

Fizičko-hemijske osobine:

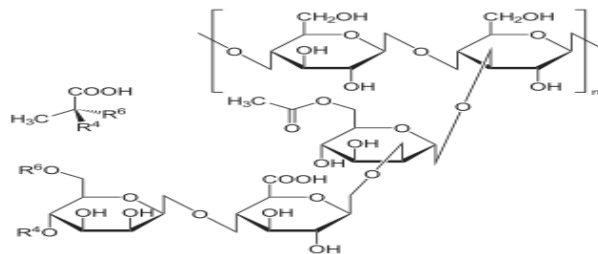
Ksantan se izdvaja od drugih sličnih polimera po sledećim svojstvima:

- Rastvorljivost: Odlično se rastvara i u hladnoj i u toploj vodi.
- Viskozitet: Formira izuzetno viskozne rastvore čak i pri veoma niskim koncentracijama.
- Stabilnost: Izrazito je stabilan u kiselim sistemima i njegov viskozitet se veoma malo mijenja pri promenama temperature, što je ključno za proizvode koji prolaze kroz termičku obradu ili se čuvaju u različitim uslovima.

Primjena u industriji

Zbog sposobnosti da drži komponente u ravnomjernom stanju, ksantan se koristi kao:

- Stabilizator: Za vodene disperzije, suspenzije i emulzije.
- Zgušnjivač i emulgator: U prehrambenoj industriji služi za postizanje željene teksture dresinga, sosova i drugih proizvoda.
- Antioksidativna zaštita: Istraživanja ukazuju na to da ksantan može pokazivati i antioksidativna svojstva, na primjer, u sprečavanju kvarenja (autooksidacije) sojinog ulja u emulzijama.



Slika 7.. Struktura ksantana

6. Zaključak

Heteropolisaharidi predstavljaju izuzetno značajnu grupu biomakromolekula čija kompleksna hemijska struktura uslovljava širok spektar bioloških i tehnoloških funkcija. Njihova raznovrsnost u pogledu monosaharidnog sastava, tipa glikozidnih veza i stepena razgranatosti omogućava im da učestvuju u brojnim procesima, kako u prirodnim sistemima tako i u industrijskoj i medicinskoj primjeni.

U radu je prikazano da heteropolisaharidi imaju ključnu ulogu u izgradnji biljnih i životinjskih tkiva, gdje doprinose mehaničkoj stabilnosti, hidrataciji i zaštiti ćelija. Posebno su istaknuti glikozaminoglikani, poput hijaluronske kiseline i heparina, koji imaju značajnu primjenu u savremenoj medicini, uključujući terapiju različitih oboljenja i regeneraciju tkiva. Takođe, biološki aktivni polisaharidi poput lentinana pokazuju potencijal u imunomodulaciji i antitumorskoj terapiji.

Pored biološke uloge, heteropolisaharidi imaju veliku primjenu u industriji, naročito kao zgušnjivači, stabilizatori i gelirajuća sredstva u prehrambenoj, farmaceutskoj i kozmetičkoj proizvodnji. Njihova biokompatibilnost, netoksičnost i funkcionalna svojstva čine ih nezamjenljivim u razvoju savremenih proizvoda.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da heteropolisaharidi predstavljaju važan predmet daljih naučnih istraživanja, posebno u oblasti biomedicine, farmacije i biotehnologije, gdje se očekuje razvoj novih terapijskih i industrijskih primjena.

7. Literatura

- 1) Jovana R. Stefanović Kojić Doktorska disertacija, Beograd 2015.
- 2) Doktorska disertacija, Maja S. Kozarski
- 3) The Polysaccharides, GERALD O. ASPINALL
- 4) POLYSACCHARIDES STRUCTURAL DIVERSITY AND FUNCTIONAL VERSATILITY, SEVERIAN DUMITRIU
- 5) Biohemija – M. Miholjić, J. Kavarić
- 6) Opšta biohemija – S. Spasić, Z. J. Ivanović, V. S. Kalimanovska

Linkovi :

- <http://polj.uns.ac.rs/wp-content/uploads/2014/04/21.-Hemija-Ugljeni-hidrati.pdf>
- <https://medicinski.lzmk.hr/clanak/polisaharidi>
- [https://www.jbc.org/article/S0021-9258\(19\)41008-9/pdf](https://www.jbc.org/article/S0021-9258(19)41008-9/pdf)
- <https://www.chemistryworld.com/news/flask-synthesis-promises-untainted-heparin/3001660.article>
- <https://my.clevelandclinic.org/health/treatments/16017-heparin-infusion>
- https://hal.science/hal-03104549v1/file/CHEMISTRY_OF_HYALURONIC_ACID.pdf
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28226376/>
- <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10231509/>
- https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_20668/objava_74138/fajlovi/OPSTA%20MIKROBIOLOGIJAnovaA4PDF%201.pdf
- <https://cybercolloids.net/information/technical-articles/introduction-to-pectin-structure/>