

The background of the cover is a complex, semi-transparent molecular structure. It features a network of interconnected atoms, with carbon atoms shown in grey, oxygen in red, and nitrogen in blue. The structure is layered, with some parts appearing more prominent than others, creating a sense of depth and scientific complexity. The overall color palette is muted, with greys, blues, and reds against a light, almost white background.

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ СА СЕДИШТЕМ У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ

# Полимери и полимерни материјали

Војислав Јовановић  
Сузана Самаржија - Јовановић

АКАДЕМСКА МИСАО

**УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ  
СА СЕДИШТЕМ У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ**

**ПОЛИМЕРИ  
И  
ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ**

**Војислав Јовановић  
Сузана Самаржија-Јовановић**

**АКАДЕМСКА МИСАО  
Београд, 2018.**

Војислав Јовановић, Сузана Самарџија-Јовановић  
**ПОЛИМЕРИ И ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ**

Рецензенти:

Проф. др Јарослава Будински-Симендић

Проф. др Радмила Радичевић

Издавачи:

Природно-математички факултет, Косовска Митровица

Академска мисао, Београд

---

На седници Наставно-научног већа Природно-математичког факултета у Косовској Митровици одржаној 24.05.2016. ова књига је одобрена за издавање као основни уџбеник

---

Штампа:

Академска мисао, Београд

Тираж: 200 примерака

ИСБН 978-86-7466-728-6

---

НАПОМЕНА: Фотокопирање или умножавање на било који начин или поновно објављивање ове књиге у целини или у деловима није дозвољено без претходне изричите сагласности и писменог одобрења издавача.

---

# САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
1.1. Основни појмови и терминологија .....	1
2. КЛАСИФИКАЦИЈА ПОЛИМЕРА .....	3
3. СТРУКТУРА ПОЛИМЕРА .....	15
3.1. Моларна маса и расподела моларних маса полимера .....	19
3.2. Конституција полимера .....	21
3.3. Конфигурација полимера.....	25
3.4. Конформација полимера .....	35
4. НОМЕНКЛАТУРА ПОЛИМЕРА .....	50
5. ПОЛИМЕРИЗАЦИОНИ ПРОЦЕСИ.....	55
5.1. Кондензациона полимеризација.....	55
5.2. Адициона полимеризација.....	58
5.2.1. Радикална ланчана полимеризација.....	59
5.2.2. Јонска ланчана полимеризација .....	74
5.3. Контролисана/„жива“ полимеризација.....	79
5.3.1. Радикална полимеризација инифертерским иницијаторима.....	81
5.3.2. Радикална полимеризација нитроксидним иницијаторима.....	83
5.3.3. Радикална полимеризација уз пренос атома .....	84
5.3.4. Радикална полимеризације уз повратни пренос ланчане реакције.....	86
5.4. Координациона полимеризација .....	87
5.4.1. Металоценски катализатори.....	90
5.5. Кополимеризација .....	93
5.5.1. Једначина кополимеризације.....	93
5.5.2. Врсте реакција кополимеризације .....	96
5.6. Методе полимеризације .....	98
5.6.1. Полимеризација у хомогеној фази .....	98

5.6.2. Полимеризација у хетерогеној фази .....	101
6. ПОЛИМЕРНИ МАТЕРИЈАЛИ .....	106
6.1. Пластомери (термопласти) .....	112
6.1.1. Поливинилхлорид (PVC) .....	115
6.1.1. Полиетилен (PE) .....	116
6.2. Дуромери (дуропласти).....	118
6.1.1. Уреа-формалдехидне смоле (UF).....	119
6.3. Еластомери.....	122
6.3.1. Каучук.....	123
6.3.2. Типови еластомера .....	125
6.3.3. Умрежавање макромолекула каучука.....	127
6.3.4. Пунила и њихова улога у еластомерним смесама .....	131
6.3.5. Ојачање еластомера наночестицама пунила .....	141
7. ПОЛИМЕРНЕ СМЕШЕ .....	143
7.1. Мешљивости полимера.....	144
8. КОМПОЗИТНИ МАТЕРИЈАЛИ.....	148
8.1. Дрво .....	149
8. 2. Нанокompозити .....	155
9. БИОРАЗГРАДИВИ ПОЛИМЕРИ.....	160
9.1. Подела биоразградивих полимера .....	161
9.1.1. Полихидроксиалканоати (PHA) .....	162
9.1.2. Полимери на бази поли(млечне киселине) – PLA .....	163
10. СТАРЕЊЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ПОЛИМЕРА.....	165
11. РЕЦИКЛАЖА.....	174
11.1. Рециклажни симболи .....	178
11.2. Поступци прераде амбалажног отпада.....	180
11.3. Депонованье пластичног отпада .....	182
11.4. Рециклажа гуме.....	182

11.5. Преглед законске регулативе у Србији .....	187
12. ЛИТЕРАТУРА .....	190



## ПРЕДГОВОР

Овај уџбеник, под називом “*Полимери и полимерни материјали*”, првенствено је намењен као званични уџбеник за предмет “*Полимери*” и “*Хемија макромолекула*” који слушају студенти VII семестра Одсека за хемију као и студенти на мастер студијама у I семестру на Природно-математичком факултету Универзитета у Приштини са седиштем у Косовској Митровици, мада га могу користити и сви други које проблематика која се у њему разматра занима. Како материја која је покривена уџбеником има доста заједничког са наставним програмом предмета “*Полимерни материјали*” који се слуша, такође, на мастер студијама хемије на истом факултету, исти се може користити и као допунски материјал за овај предмет. Основна улога овог уџбеника је да омогући студентима да стекну знања о полимерима, посебно о њиховој структури, поступцима синтезе, механизму и кинетици која ће им омогућити да прате развој нових полимерних материјала. На основу тога студенти ће моћи да тумаче како се избором мономера, начином и условима извођења синтезе може утицати на својства полимера. Уџбеник такође може бити од користи студентима хемије Природно-математичких факултета где се изводи настава из истих или сличних предмета.

Аутори се посебно захваљују рецензентима проф. др Јарослави Будински-Симендић са Технолошког факултета Универзитета у Новом Саду и проф. др Радмили Радичевић, такође, са Технолошког факултета Универзитета у Новом Саду, што су се прихватиле захтевног и одговорног посла рецензије овог уџбеника као и на корисним сугестијама које су допринеле побољшању садржаја овог уџбеника.

Аутори се такође захваљују свима који читајући овај уџбеник својим сугестијама допринесу да се побољша квалитет наредних издања.

Косовска Митровица,  
март 2018. године

Аутори





# 1. УВОД

## 1.1. Основни појмови и терминологија

Најшира дефиниција **полимера** са аспекта структуре је да су то супстанце изграђене од макромолекула. Прецизнија дефиниција је: полимери су **кондензовани системи макромолекула**, што значи да постоје у чврстом и течном стању, и не могу постојати у гасовитом агрегатном стању.

**Систем** значи да полимер чине структурни елементи (макромолекули или полимерни молекули) који су у интеракцији. Другим речима, сваки структурни елемент има релативно високи степен индивидуалности (може се уочити у односу на остале структурне елементе) али постоји и деловање структурних елемената једних на друге.

Основна структурна јединица полимера је макромолекул. **Макромолекули** (грч. *макрос*-велики, дуг, висок) су хемијска једињења саграђена од великог броја атома, који су повезани у ланчасте структуре и састављени су од више једнаких делова који се понављају (повнављајућих јединица) тзв. **мера**. Већ сам назив полимер (грч. *poly*-многа, *meros*-део) указује на ту њихову карактеристику. За њих је карактеристична врло висока моларна маса реда величине хиљаду или милион g/mol. Молекули који су изграђени од само једног таквог мера називају се **мономерима** (грч. *monos*-један). По структури *мер* може бити врло близак молекулу полазног мономера, али није истоветан. Мер може бити неправилног и често комплексног облика. Сегмент и основни мотив чине структурне јединице макромолекула тј. полимера. **Основни мотив** представља у полимеру структурну јединицу, тј. конституциону јединицу која се понавља дуж ланца и не треба га мешати са појмом мера. **Сегмент** представља такође структурну или кинетичку јединицу и користи се као почетни појам при анализи веза структуре и понашања макромолекула. Број типова понављаних јединица у једном макромолекулу је мали, најчешће само један или два. У смислу ове дефиниције "молекул" је систем атома у којем нема понављања конституцијских јединица и која због тога има малу молекулну масу. Молекулска маса сложенијих органских молекула износи 250-500. Маса понављајућих јединица макромолекула упоредива је с масом молекула. Будући да се органски

молекул може сматрати изграђеним од само једне јединице он се онда назива мономером. Полимерни молекули синтетизују се процесом **полимеризације** из одговарајућих мономера као почетног материјала.

Број понављаних јединица у полимерном молекулу назива се степен полимеризације,  $DP$  (енг. degree of polymerization). Производ степена полимеризације и молекулне масе понављајуће јединице,  $M_o$  једнак је молекулској маси полимерног молекула  $\bar{M}_n$ :

$$\bar{M}_n = DP \cdot M_o \quad (1.1.)$$

Погрешно је рећи да је полимерни молекул састављен од мономера јер се мер и изворни мономер разликују. Мери су у полимерном молекулу међусобно везани хемијским везама па у мономеру мора доћи барем до прерасподеле електронских густина да би настале такве хемијске везе, а често се у процесу полимеризације дешавају и веће промене.

Ако је степен полимеризације низак, око десет, а молекулска маса  $\bar{M}_n \leq 1500$ , обично се молекул назива олигомером, а не полимером. Молекули настали у првим ступњевима полимеризације имају своја посебна имена: димер, тример, тетрамер итд. Доследно овој терминологији молекули с високим степеном полимеризације требало би да се зову полимерима. Међутим, термин полимер се уобичајено користи за материјале изграђене од молекула с високим степеном полимеризације, па се онда за молекуле користи назив полимерни молекули или чешће макромолекули. Минимални број мера у неком молекулу, као услов да би то био полимерни молекул, није дефинисан.

За већину полимера минимални број понављајућих јединица је око сто. За максимални број понављајућих јединица у макромолекулу нема принципијелних ограничења, али за природне и синтетске полимере тај број је у распону од хиљаду до сто хиљада и више.

На примеру полиетиленског ланца могу се представити наведени појмови:

полимер:	- (CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> –
сегмент:	- CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> – CH <sub>2</sub> –
мономер је етилен:	H <sub>2</sub> C = CH <sub>2</sub>
одговарајући мер:	H <sub>2</sub> C = CH <sub>2</sub>
основни мотив:	- CH <sub>2</sub> –

Број  $n$  који се ставља иза заграде говори о степену полимеризације, односно о броју мономерних молекула који су међусобно везани у макромолекул. То је променљива величина и зависи од услова полимеризације. Има велики утицај на својства насталих полимера: што је већи степен полимеризације, то су и употребна својства неког полимера боља (али не увек и лакоћа обраде).

**Синтетски (синтетички) полимери** су општи назив за *полипласте* који укључује пластомере, дуromoмере, еластомере и еластопластомере. Синтетска влакна и помоћни полимерни материјал (обично се употребљавају у облику раствора или дисперзија у производњи лепкова, лакова, премаза, средстава за обраду коже, папира и текстила) такође су полипласти, али код којих су посебним начином прераде постигнута карактеристична својства којима се тај материјал разликује од осталих полипласта.

**Полимерни материјал** је све оно што се прерађује тј. оно од чега је израђен готов производ. Често се ради једноставности полимерни материјали називају полимерима, што је погрешно. Постоје две врсте полимерног материјала: пластика и гума.

## 2. КЛАСИФИКАЦИЈА ПОЛИМЕРА

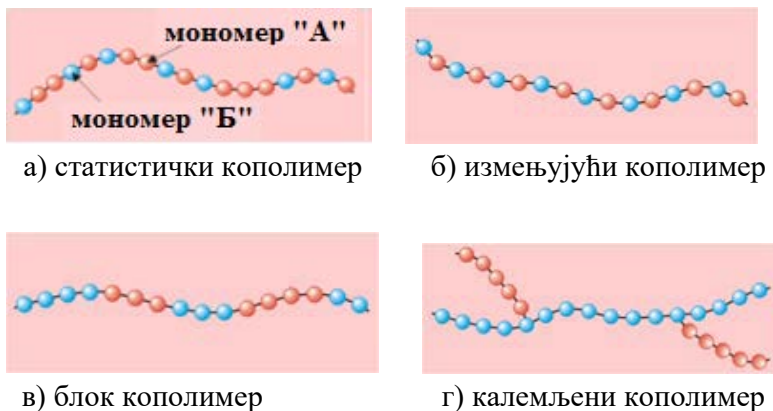
Према броју типова мера у макромолекулу могу се разликовати:

1. хомополимери, који су изграђени од једног типа мера и
2. кополимери, који су изграђени од два или више типова мера

Постоје четири важна типа кополимера и то су:

1. статистички (случајан) (енг. random)
2. алтернирајући (измењујући)
3. блок и
4. калемљени кополимер (енг. graft).

Код статистичког кополимера кога чине два различита мера, редослед њиховог везивања у ланцу је случајан. Код блок кополимера у ланцу постоје блокови састављени од истог мономера. Алтернирајући кополимери имају грађу у којој се наизменично смењују два мера. Калемљени кополимери настају хемијском модификацијом полимерног ланца, тако што се на основни ланац везују (калеме) молекули мономера или читави ланци одједном:



Слика 2.1. Начини везивања мономера у полимеру.

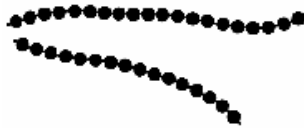
Физичка својства полимера зависе од интеракција између ланаца макромолекула, односно од њихове молекулске структуре. Дуж молекуларног ланца поједини молекули су повезани примарним (хемијским) везама, које настају у току реакција полимеризације. Стварање полимера заснива се на способности угљеникових атома да стварају ковалентна једињења. Код већине полимерних материјала (пластомери и еластомери) ланци су међусобно повезани секундарним (физичким) везама. Секундарне везе настају помоћу слабих *van der Waals*-ових сила: дисперзионих и диполних, и јачих, водоничних веза.

Од изузетне важности за те интеракције је топологија тих ланаца, јер постоје:

1. линеарни
2. разгранати и
3. умрежени ланци, односно полимери.

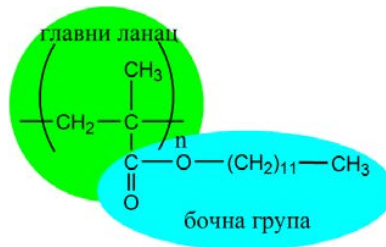
Линеарни полимери, односно полимери са линеарним ланцима, дефинишу се у односу на разгранате ланце. Код разгранатих полимера од основног ланца се одвајају бочни ланци („бочне гране“), који имају исти хемијски састав као и основни ланац. Основни ланац је у ствари најдужи ланац, а бочни ланци могу бити различите дужине и у зависности од тога деле се на кратке и дуге. Кратки бочни ланци су много краћи од дужине основног ланца, док дуги бочни ланци могу бити сличних дужина као и основни ланац. Распоред и величина бочних ланаца одређују својства макромолекула. Ако су бочни ланци релативно кратки у поређењу с

главним ланцем, макромолекул задржава већину својстава линеарног макромолекула. Линеарни ланци немају бочних грана, а ако их имају, оне су занемарљиве дужине и малобројне, и јављају се тек спорадично. Због такве своје структуре линеарни полимери се лако „пакују“, чиме је омогућена њихова кристализација, за разлику од разгранатих полимера, који су због тога делимично аморфни. Пример за линеарну структуру полимера је полиетилен високе густине-HDPE (енг. High Density Poly Ethylene), који садржи више од 1000 -CH<sub>2</sub>- група, тј. основних мотива.

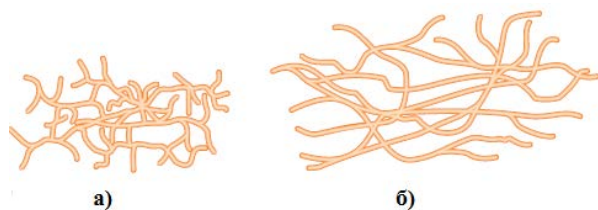


Слика 2.2. Схематски приказ линеарних макромолекула

Дефиниција линеарног полимера не значи да њих граде само атоми који чине основни ланац. Такви полимери могу имати *бочне групе* које саме могу бити изграђене од атома који се не налазе у основном ланцу и могу бити у виду дугих ланаца које се не сматрају бочним гранама. Пример је поли(лаурилметакрилат), који не спада у разгранате полимере, а део мера -CO-O-(CH<sub>2</sub>)<sub>11</sub>CH<sub>3</sub> је у ствари бочна група:



У разгранатим макромолекулима за неке од понављајућих јединица главног ланца везани су бочни ланци који су обично мањег степена полимеризације, слика 2.3. Разгранату структуру има, на пример, полиетилен ниске густине- LDPE (енг. Low Density Poly Ethylene).



Слика 2.3. Схематски приказ разгранатих макромолекула са кратким гранама (а) и дугим гранама (б).

Густина полиетилена (PE) различите разгранатости макромолекула показана је у табели 1.1. Назив полиетилен врло ниске густине (PE-VLD) указује на већу разгранатост ланаца него у линеарном полиетилену ниске густине (PE-LLD) и на присутност бочних ланаца променљиве дужине, што омета кристалност. Назив полиетилен ултрависоке молекулске масе (PE-UHMW) користи се за полиетилен релативне молекулске масе веће од једног милиона. Степен кристалности таквог полимера је око 20 %. Оба полимера (PE-VLD и PE-UHMW) имају густину приближно као полипропилен ( $0,90 \text{ kg dm}^{-3}$ ), који је полимер најмање густине међу широкоприменљивим полимерима.

Табела 2.1. Густина различитих типова полиетилена.

Врста полиетилена	Густина ( $\text{kg dm}^{-3}$ )
Полиетилен високе густине (PE-HD)	0,95-0,96
Линеарни полиетилен ниске густине (PE-LLD)	0,93-0,94
Полиетилен ниске густине (PE-LD)	0,91-0,93
Полиетилен врло ниске густине (PE-VLD)	0,89-0,91
Полиетилен ултра-високе молекулске масе (PE-UHMW)	0,88-0,94