

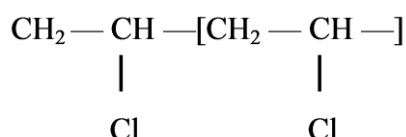
1. Základné pojmy a definície

Makromolekulové látky sa vyznačujú pomerne vysokými relatívnymi mólovými hmotnosťami. Tieto môžu mať hodnotu od desiatok tisíc do niekoľkých miliónov. Mimoriadna veľkosť makromolekúl sa prejaví na mnohých charakteristických vlastnostiach polymérov, ktorými sa výrazne odlišujú od nízkomolekulových zlúčenín.

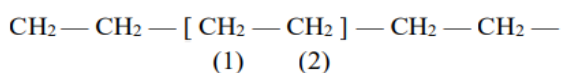
Zoskupenie atómov v makromolekule má svoje stavebné zákonitosti. Podľa nich je väčšina prírodných a syntetických polymérov vybudovaná tak, že sa v ich reťazcoch pravidelne opakuje určitá stavebná alebo štruktúrna jednotka.

Stavebná jednotka – mér, je časť molekuly, zodpovedajúca nízkomolekulovej látke, z ktorej molekula vznikla. Je v priamom vzťahu k východiskovej surovine, monoméru, použitému na syntézu polyméru.

Štruktúrna jednotka (konštitučná jednotka) je najmenšie zoskupenie atómov v molekule, ktoré sa periodicky opakuje. Štruktúrna jednotka môže byť identická so stavebnou jednotkou, napr. pri polyvinylchloride:



V niektorých prípadoch jednu stavebnú jednotku tvorí viac štruktúrnych jednotiek. Napr. stavebnú jednotku polyetylénu vytvoria dve metylénové štruktúrne jednotky:



Inokedy jednu štruktúrnú jednotku môže vytvárať niekoľko stavebných jednotiek. Napr. dve stavebné jednotky (dikarboxylová kyselina a diamín) vytvárajú jednu štruktúrnú jednotku polyamidu.

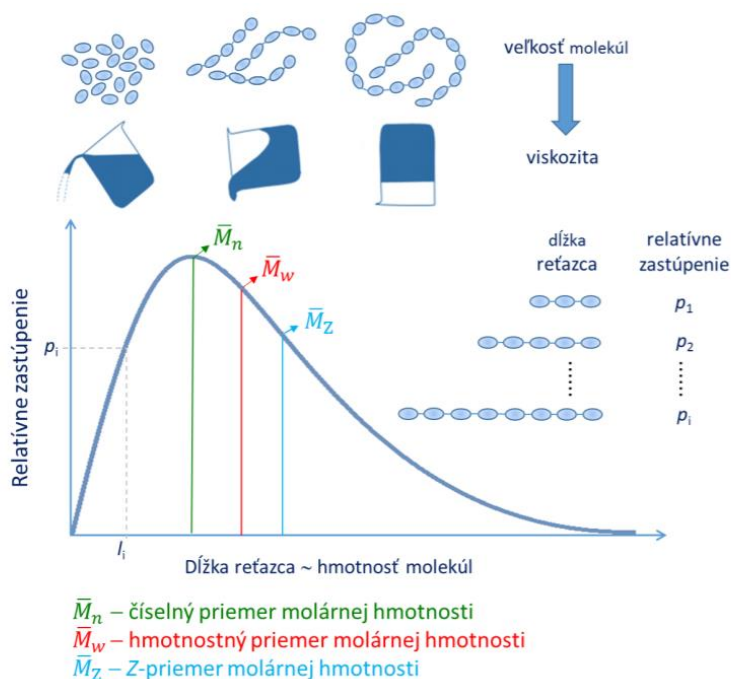
Základnou charakteristikou každého polyméru je jeho **molárna hmotnosť** (M). Je definovaná ako pomer hmotnosti k látkovému množstvu a jej rozmer v SI sústave je $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$. V praxi sa mólóva hmotnosť často meria v jednotkách $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Potom má rovnakú číselnú hodnotu ako relatívna molekulová hmotnosť (M_r), ktorá je bezrozmernou veličinou a vyjadruje pomer strednej hmotnosti častice k jednej dvanástine hmotnosti atómu izotopu ^{12}C .

Na základe mólovej hmotnosti polyméru môžeme určiť **polymerizačný stupeň** (n), ktorý udáva koľkokrát sa stavebná, resp. štruktúrna jednotka s mólovou hmotnosťou M_0 nachádza v reťazci polyméru:

$$n = \frac{M}{M_0} \quad (1)$$

Polymerizačný stupeň máva hodnotu 10 až 10^4 .

Makromolekulové látky sú obvykle zmesou **polymérhomológov**, to znamená, že sa skladajú z molekúl vybudovaných z tých istých stavebných jednotiek, líšiacich sa však ich počtom (rovnaké chemické zloženie, ale rôzne dlhé reťazce). Jednotlivé polymérhomológy, t. j. rôzne dlhé reťazce toho istého polyméru, sa od seba líšia polymerizačným stupňom. Preto hovoríme, že polymér je **polydisperzný** (nerovnorodosť molekúl z hľadiska ich veľkosti). Nerovnorodosť molekúl z hľadiska ich veľkosti výrazne ovplyvňuje niektoré vlastnosti polymérov. Informáciu o tom, akým spôsobom je látkové množstvo alebo hmotnosť polyméru rozdelená do reťazcov rôznych dĺžok (t. j. rôznych mólových hmotností), poskytujú **distribučné funkcie** (obr. 1.1). Rozdelenie polyméru na určitý počet frakcií umožňuje zistiť, akým podielom prispieva i -tá frakcia obsahujúca N_i molekúl s mólovou hmotnosťou M_i k celkovému látkovému množstvu polyméru. V danej vzorke polyméru sa vyskytuje určité množstvo molekúl s danou dĺžkou reťazca, resp. s danou molekulovou hmotnosťou. Ich relatívne zastúpenie znázorníme graficky a modelujeme spojitou krivkou. Tvar distribúcie (šírka) ovplyvňuje úžitkové a spracovateľské vlastnosti polymérov.



Obr. 1.1 Schematické znázornenie distribúcie reťazcov polyméru vzhľadom na ich dĺžku (molekulovú hmotnosť)

Polyméry charakterizuje priemerná molárna hmotnosť. Rôzne metódy určovania molárnej hmotnosti polydisperzného systému nám poskytnú rôzne typy priemerných hodnôt. Priemerná hodnota z osmometrických meraní je číselným priemerom molárnej hmotnosti \bar{M}_n . Každéj molárnej hmotnosti priradíme štatistické zastúpenie – zlomok p_i – podľa počtu príslušných molekúl N_i vo vzorke s celkovým počtom molekúl N . Číselný priemer molárnej hmotnosti je potom rovný aritmetickému priemeru $\langle M \rangle$ (strednej hodnote molárnej hmotnosti):

$$\bar{M}_n = \sum p_i M_i = \langle M \rangle, \text{ kde } p_i = \frac{N_i}{N}, \sum N_i = N \quad (2)$$

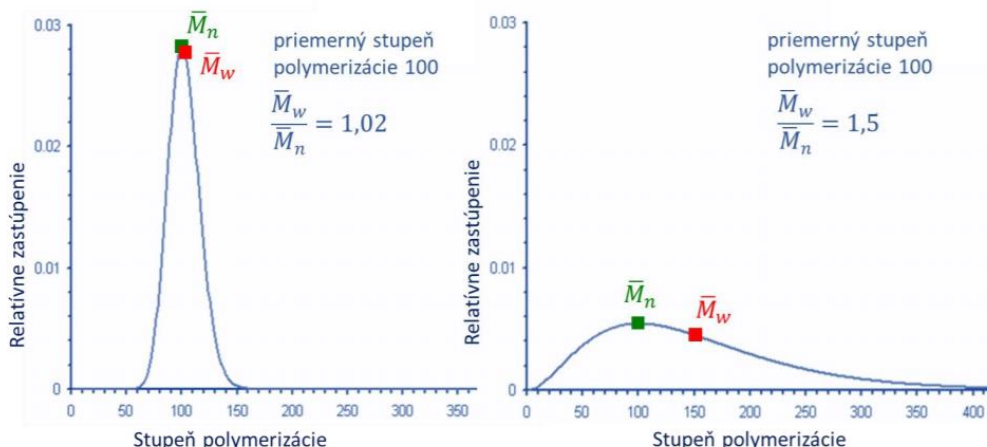
Hmotnostný priemer molárnej hmotnosti \bar{M}_w dostaneme napr. meraním rozptylu svetla. Je určený hmotnosťami m_i jednotlivých polymérhomológov s molárnou hmotnosťou M_i – je to vážený priemer molárných hmotností.

$$\bar{M}_w = \sum w_i M_i, \text{ kde } w_i = \frac{m_i}{m}, \sum m_i = m \quad (3)$$

kde w_i je hmotnostný zlomok daného polymérhomólu a m celková hmotnosť vzorky. Keď uvážime súvislosti, dostaneme rovnicu, ktorá ukazuje, že hmotnostný priemer molárných hmotností je úmerný strednej kvadratickej hodnote molárnej hmotnosti:

$$\bar{M}_w = \sum w_i \cdot M_i = \frac{\sum N_i \cdot M_i^2}{\sum N_i \cdot M_i} = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle} \quad (4)$$

Pomocou meraní viskozity získame viskozitný priemer molárnej hmotnosti \bar{M}_v , pomocou sedimentačných meraní Z-priemer molárnej hmotnosti \bar{M}_z . Pomer hmotnostného a číselného priemeru molárnej (molekulovej) hmotnosti charakterizuje mieru neuniformity (polydisperzity). Podľa vyššie uvedených rovníc je koeficient polydisperzity $\frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n}$ daný pomerom strednej kvadratickej hodnoty molárnej hmotnosti ku druhej mocnine strednej molárnej hmotnosti: $\frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n} = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle^2}$. Distribučná krivka modeluje rozdelenie hodnôt molárných (molekulových) hmotností polyméru pomocou spojitej funkcie. Molekulová hmotnosť samotná a aj jej distribúcia ovplyvňujú vlastnosti polymérov ako sú teplota mäknutia polyméru, rozpustnosť, viskozita roztokov a tavenín polymérov, pružnosť, pevnosť, tepelná stabilita, ... Hmotnostný priemer molárnej hmotnosti je vždy väčší ako číselný priemer molárnej hmotnosti. Čím užšia je distribúcia molárnej hmotnosti, tým viac sa tieto hodnoty k sebe približujú (obr. 1.2). Stupeň polydisperzity závisí od spôsobu prípravy polyméru.



Obr. 1.2 Schematické znázornenie distribúcie dĺžky reťazcov polyméru, vľavo úzka, vpravo široká distribúcia

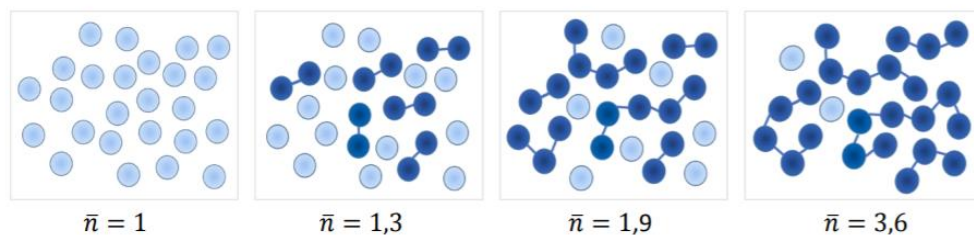
Pomenovanie polyméru je podľa staršieho názvoslovia odvodené väčšinou z názvu monoméru a to najmä v prípadoch, keď polymér vzniká z jedného monoméru reťazovou polymerizáciou, napr. polyetylén, alebo polymerizáciou s otvorením kruhu, napr. poly-ε-kaprolaktám. Veľká časť polymérov vznikajúcich stupňovitou polyreakciou z dvoch rôznych monomérov využíva na pomenovanie názov štruktúrnej jednotky skladajúcej sa z dvoch stavebných jednotiek vstupujúcich do reakcie, napr. polyetyléntereftalát podľa v reťazci sa opakujúcej jednotky. Podľa nomenklatúry pravidiel IUPAC základ pomenovania polymérov tvorí názov najmenej možnej štruktúrnej jednotky opakujúcej sa v reťazci polyméru, uvedený v zátvorke, pričom pre poradie atómov a skupín v jednotke platia tie isté zákonitosti ako pri tvorbe nízkomolekulových organických zlúčenín. Názvy niektorých polymérov podľa staršieho IUPAC názvoslovia sú uvedené v tabuľke 1.1.

Tab. 1.1 Názvy a skratky niektorých polymérov

Starší názov polyméru	Názov podľa IUPAC	Skratka
polyetylén	poly(etylén)	PE
polyformaldehyd	poly(oxymetylén)	POM
polypropylén	poly(1 – metylén)	PP
polystyrén	poly(1 – fenyletylén)	PS
polymetylakrylát	poly[1- (metoxykarbonyl)etylén]	PMA
polyfenylénoxid	poly(oxy – 1,4 – fenylén)	PPO
polyetyléntereftalát	poly(oxyetylénoxytereftaloyl)	PETP

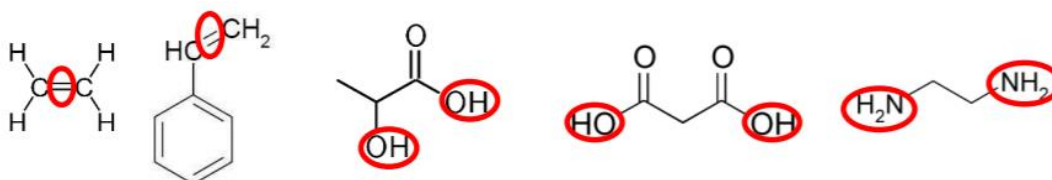
2. Spôsob prípravy polymérov

Podľa spôsobu prípravy, teda druhu chemickej reakcie vedúcej k vzniku makromolekúl, rozlišujeme polyméry pripravené **polymerizáciou, polykondenzáciou alebo polyadáciou**. Môžeme sa stretnúť aj s delením polymérov podľa mechanizmu polyreakcie, ktorý môže byť **stupňovitý alebo reťazový**. Pri stupňovitom mechanizme (obr. 1.3) môžu navzájom reagovať ľubovoľné dve molekuly, napr. monomér-monomér, monomér-dimér, dva diméry, atď. To znamená, že monoméry sa minú rýchlo, ale dĺžka reťazca narastá veľmi pomaly. Týmto spôsobom vzniká polymérny reťazec pri polykondenzácii a polyadácii.



Obr. 1.3 Schematické znázornenie stupňovitého mechanizmu polyreakcie (\bar{n} – priemerný polymerizačný stupeň)

Pri **reťazovom** mechanizme **polyreakcie** sa molekula polyméru vytvára reakciou monoméru s rastúcim reťazcom. Takmer okamžite vzniká makromolekula s vysokým stupňom polymerizácie. Tento mechanizmus je oveľa rýchlejší ako stupňovitý mechanizmus. Realizuje sa pri príprave polymérov **polymerizáciou**. Východiskovou zlúčeninou pre vznik polyméru je tzv. monomér – organický alebo anorganický. Určuje chemickú štruktúru polyméru, zásadne ovplyvňuje jeho chemické, fyzikálne a mechanické vlastnosti. Na to, aby z vybranej nízkomolekulovej látky mohol vzniknúť polymér, je potrebné, aby molekuly monomérov boli reaktívne, t. j. musia obsahovať násobné väzby alebo aspoň dve funkčné skupiny (obr. 1.4), aby sa každý monomér mohol viazať s ďalšími dvoma monomérmi a mohol sa tak vytvoriť reťazec. Pod funkčnou skupinou rozumieme skupinu, ktorá po odštiepení vodíka môže chemicky reagovať – karboxylová skupina $-\text{COOH}$, hydroxylová skupina $-\text{OH}$, aminoskupina $-\text{NH}_2$.



Obr. 1.4 Schematické zobrazenie štruktúry monomérov s označením funkčných skupín a násobných väzieb umožňujúcich vznik polymérneho reťazca

Pri **polymerizácii** sa molekuly nenasýteného monoméru (s násobnou väzbou) zlučujú do väčšieho celku – polyméru – reťazovým mechanizmom bez vzniku vedľajšieho produktu. Na spustenie tejto reakcie je potrebná prítomnosť reaktívnej látky – **iniciátora**, ktorý môže reagovať s molekulou monoméru, pričom sa rozštiepi násobná väzba. Vzniknutá zlúčenina reaguje s ďalšou molekulou monoméru a reťazec postupne narastá až do ukončenia jeho rastu. Polymerizácia prebieha v troch krokoch, ktoré sa nazývajú **iniciácia, propagácia a terminácia**.

Okrem radikálovej a iónovej polymerizácie sa používa aj **polymerizácia koordinačná**, pri ktorej sa využívajú katalyzátory. V tomto prípade pri propagácii dochádza ku koordinácii úsekov reťazca s prechodnými kovmi. Koordinácia môže byť smerovaná a tak možno získať polymér so stereoregulárnym (priestorovo pravidelným) usporiadaním bočných substituentov.

Medzi polyméry pripravené polymerizáciou patria napr. polyetylén (PE), polypropylén (PP), polyvinylchlorid (PVC), polystyrén (PS), polymetylmakrylát (PMMA), polyvinylacetát (PVAC), syntetické chloroprénové, izoprénové a silikónové kaučuky. Pri polykondenzácii vznikajú makromolekuly z východiskových nízkomolekulových látok obsahujúcich aspoň dve funkčné skupiny za súčasného odštiepenia jednoduchých reakčných produktov, napr. vody, HCl, a pod.

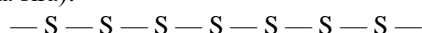
Polykondenzácia prebieha stupňovitým mechanizmom za vhodných podmienok (teplota, tlak, katalyzátor, ...). Pri tejto polyreakcii reagujú dva rovnaké alebo rôzne monoméry. Pri každej reakcii monomérov, ale aj dimérov atď., sa uvoľňuje jedna molekula (najčastejšie je to molekula vody), a tak sa výsledný polymér svojim chemickým zložením odlišuje od východiskovej zlúčeniny. Týmto spôsobom vznikajú skupiny polymérov nazývané polyester, polyamidy (PA), polykarbonát (PC), fenolformaldehdydové živice (PF). Polykondenzácia

prebieha oveľa pomalšie ako polymerizácia, reakciu je možné kedykoľvek prerušiť. Pri polyadícii reagujú spolu zlúčeniny obsahujúce dvojité väzby alebo cyklus so zlúčeninami, ktoré obsahujú v molekule reaktívne skupiny. Nevzniká pritom vedľajší nízkomolekulový produkt, ale vodíkový atóm sa presúva z jednej reaktívnej skupiny na druhú. Pomerné zastúpenie atómov v polyméri a monoméroch je rovnaké. Takto vznikajú polyuretány a epoxidové živice.

Pri príprave polymérov sa využívajú rôzne technologické postupy. Polyreakciou **v bloku** sa pripravujú polyméry všetkými druhmi výstavbových polyreakcií. Na jej priebeh je potrebný monomér a iniciátor (príp. katalyzátor). Výhodou je vysoká čistota produktu. Pri polyreakcii **v roztoku** k tomu navyše potrebujeme rozpúšťadlo. Tento postup sa využíva pri polymerizácii aj pri polykondenzácii. **Suspenzná polymerizácia** prebieha vo vodnom prostredí, iniciátor musí byť rozpustný v monoméri, potrebné sú stabilizátory suspenzie. Pri emulznej polymerizácii sú častice monoméru obalené emulgátorom. Pomocou nej sa pripravujú polyméry s vysokou molárnou hmotnosťou a s úzkou distribúciou molárnych hmotností.

3. Štruktúra polymérov

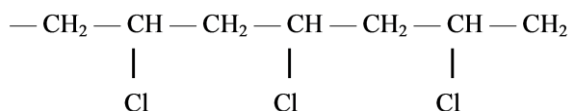
Usporiadanie stavebných jednotiek v reťazci polyméru je rôzne. V **lineárnom polyméri** môžu reťazec vytvoriť atómy jedného prvku (polymérna síra):



alebo jednoduché skupiny (polyetylén):



Vo väčšine prípadov lineárna makromolekula na hlavnom reťazci – chrbtici polyméru obsahuje bočné skupiny (napríklad pri polyvinylchloride je to skupina — Cl):

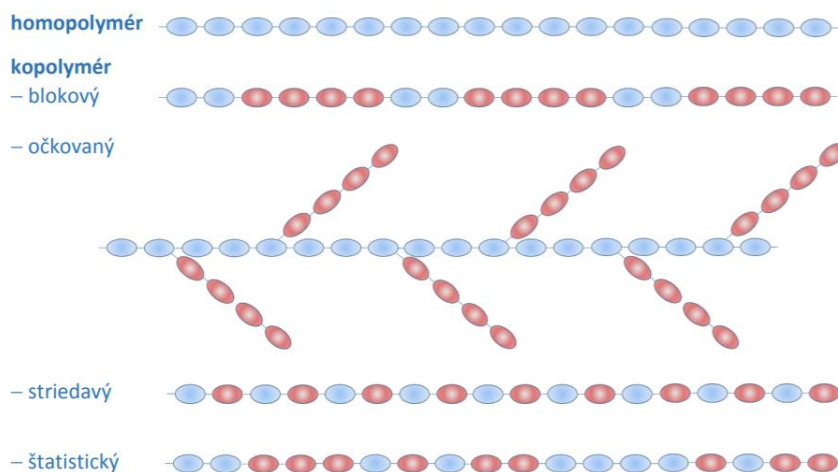


Mnohonásobné opakovanie sa hypotetickej monomérnej jednotky A možno všeobecne nazvať homopolymér, ktorý možno zapísať v tvare:

—A — A — A — A — A—, resp. X — [A]_n — Y, kde n je počet stavebných jednotiek a X, Y sú charakteristické koncové skupiny.

Keď je makromolekulová látka vybudovaná z dvoch chemicky odlišných monomérov dostáva názov **kopolymér**. V prípade zabudovania troch rozličných monomérov do reťazca ide o **terpolymér**.

Podľa usporiadania stavebných jednotiek rozoznávame kopolymér blokový, štepený (očkovaný), alternujúci (striedavý), štatistický kopolymér (obr. 1.5). V reťazci blokového kopolyméru sa striedajú sekvencie jednotlivých východiskových látok s určitým počtom monomérov. Očkovaný kopolymér sa vytvára polyreakciou už zhotovených homopolymérov s rozdielnymi monomermi. V reťazcoch striedavých kopolymérov sa pravidelne striedajú stavebné jednotky jednotlivých druhov monomérov. Štatistický polymér má reťazce tvorené striedaním rôzne dlhých sekvencií jednotlivých monomérov.



Obr. 1.5 Schematické znázornenie homopolyméru a kopolyméru

Podľa tvaru makromolekuly rozdeľujeme polyméry na lineárne, ktorých makromolekuly si môžeme predstaviť ako nitku alebo retiazku, rozvetvené, s makromolekulami podobnými koreňom stromu, a siet'ované makromolekuly, ktoré sú vzájomne prepojené do súvislej 3D štruktúry.

Lineárne makromolekuly (obr. 1.6) vznikajú spájaním monomérov s dvojitou väzbou alebo s dvoma funkčnými skupinami. Ich reťazce sa môžu tesne usporiadať a sú schopné kryštalizovať, čo sa prejaví na vyššej hustote polymérneho materiálu. Polyméry s lineárnymi reťazcami sa v porovnaní s ostatnými vyznačujú vyššími hodnotami modulu pružnosti, pevnosti a tepelnej odolnosti, nižšou ťažnosťou a ich taveniny majú relatívne nízku viskozitu, čo uľahčuje ich spracovanie. Typickými príkladmi lineárnych polymérov sú PE, PP, PAN, PMMA, PVC, PS.

Rozvetvené a siet'ované polyméry (obr. 1.6) vznikajú z viacfunkčných monomérov. Rozvetvené makromolekuly majú na hlavnom reťazci naviazané kratšie bočné substituenty, tie zhoršujú pohyblivosť reťazca, zabráňujú tesnému priblíženiu makromolekúl a tak sa znižujú aj medzimolekulové sily. To má za následok pokles hustoty, mechanickej pevnosti, tvrdosti, modulu pružnosti, tepelnej odolnosti a obmedzenú schopnosť kryštalizácie. Takéto polyméry majú vyššiu ťažnosť a viskozitu ako polyméry s lineárnymi reťazcami. K rozvetveniu reťazcov dochádza niekedy spontánne v procese polymerizácie (napr. PE, PA). V prírodných polysacharidoch vetvenie vzniká počas enzymatických polyreakcií (škrob glykogén, amylopektín). Siet'ované makromolekuly vznikajú z lineárnych makromolekúl spojením susedných reťazcov na rôznych miestach chemickými väzbami. Tým sa obmedzí pohyblivosť reťazcov, čo má za následok stratu rozpustnosti, tavitelnosti, húževnatosti, ťažnosti ale rastie pevnosť, modul pružnosti a teplotná odolnosť. Výsledné vlastnosti závisia od hustoty bodov siet'ovania (tab. 1.2).

Tab. 1.2 Vlastnosti polymérov z závislosti od tvaru molekúl

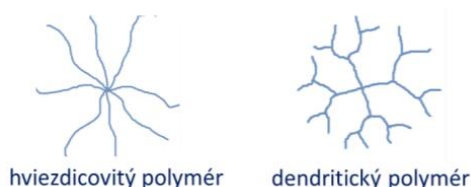
lineárne	rozvetvené	siet'ované
vyššia hustota materiálov	nižšia hustota materiálov	Vlastnosti závisia od hustoty siete.
vyššia pevnosť	nižšia pevnosť	So zvyšujúcou sa hustotou siete sa
vyšší modul pružnosti	nižší modul pružnosti	materiál vyznačuje:
nižšia ťažnosť	vyššia ťažnosť	vysokou pevnosťou
Vyššia teplotná odolnosť	nižšia teplotná odolnosť	vysokým modulom pružnosti
dobrá tekutosť taveniny	nižšia tekutosť taveniny	vysokou teplotnou odolnosťou
jednoduchá kryštalizácia	nižšia schopnosť kryštalizácie	veľmi nízkou ťažnosťou

Siet'ovaná štruktúra vzniká buď pri polyreakcii (ako v prípade nižšie spomínaných reaktoplastov), alebo zámerne dodatočným vytvorením priečných väzieb ako pri vulkanizácii kaučuku alebo vytvrdzovaní polyesterových živíc, alebo pri radiačnom siet'ovaní termoplastov. Pritom sa menia vlastnosti polyméru. Najčastejšie sa siet'ujú kaučuky, epoxidy a polyestery.



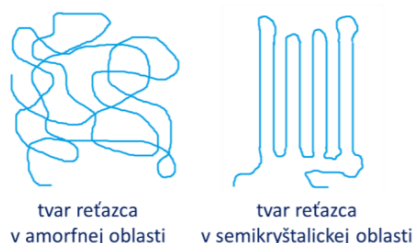
Obr. 6 Schematické znázornenie lineárnych, rozvetvených a siet'ovaných molekúl

Okrem lineárnych a rozvetvených reťazcov je dnes už možné vytvoriť aj iné typy, napr. s hviezdicovitými vetvenými reťazcami alebo dendrity so stromovitým vetvením reťazcov (obr. 1.7). Hviezdicovité polyméry sa používajú ako modifikátory viskozity motorových olejov, dendrity sa uplatňujú v medicíne ako prenášače liečiv.



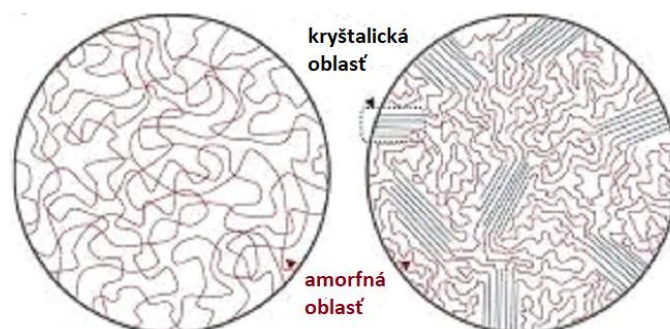
Obr. 1.7 Schematické znázornenie hviezdicovitých a dendritických polymérov

Ďalšou možnosťou je delenie polymérov z hľadiska ich **nadmolekulevej štruktúry**, čiže podľa toho, ako sú navzájom usporiadané reťazce makromolekúl. Polyméry sú charakteristické jednak usporiadaním krátkeho dosahu, teda opakovaním štruktúrnych jednotiek, ako aj usporiadaním dlhého dosahu, t. j. usporiadaním reťazcov makromolekúl. Rozoznávame polyméry **amorfné**, s neusporiadanými reťazcami, a **semikryštalické**, ktorých reťazce vytvárajú oblasti s istým druhom usporiadania (obr. 1.8).



Obr. 1.8 Schematické znázornenie tvaru reťazcov v amorfných a semikryštalických oblastiach polyméru

Pretože sú reťazce veľmi dlhé, nie je možné ich úplne pravidelné usporiadanie ako v prípade kryštálov z malých molekúl. Reťazce sa skladaním usporadávajú do kryštálov, tie sú obklopené neusporiadanými reťazcami, tvoriacimi amorfné oblasti (obr. 1.9). Stupeň usporiadania v prípade polymérov charakterizujeme tzv. **kryštalickým podielom (stupňom kryštalinity)**, ktorý môže byť v rozsahu 0 ~ 90%. Reťazce amorfných polymérov nie sú schopné vytvárať usporiadané štruktúry. Kryštalizácii bránia objemné bočné reťazce, alebo samotný reťazec je málo ohybný alebo chemicky nepravidelný. Typické amorfné polyméry sú napr. polykarbonát (PC) a polymetylmetakrylát (PMMA) a semikryštalický polyetylén (PE), polytetrafluóretylén (PTFE) a polyakrylonitril (PAN).



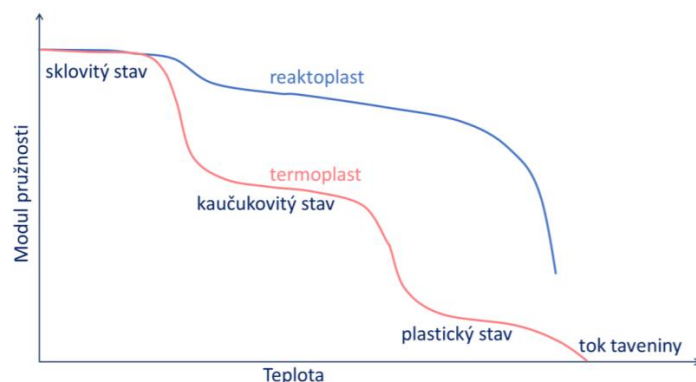
Obr. 1.9 Schematické znázornenie štruktúry amorfných a semikryštalických polymérov

Amorfnú štruktúru možno získať aj v prípade polyméru schopného kryštalizácie a to pri prudkom schladení taveniny. Reťazce tvoria náhodné klobká (globuly), ktoré môžu byť vzájomne prepletené. Takúto štruktúru si možno predstaviť ako špagety na tanieri. V niektorých prípadoch môže dôjsť k vzájomnému usporiadaniu klobiek do mikroskopických kryštalografických útvarov, pričom si zachovávajú svoj individuálny charakter. Pri pôsobení vonkajších síl sa dosiahne vyššia forma usporiadania v polymérom amorfnom materiáli. Reťazce v tvare klobiek sa rozvinú a vytvárajú paralelne združené zväzky, sú to tzv. nepravé kryštality. Amorfné polyméry v tuhom stave sú sklovité. Charakterizuje ich usporiadanie opakujúcich sa jednotiek na krátku vzdialenosť, nie je rozdiel v usporiadaní reťazcov v tavenine a v tuhom amorfnom polyméri. Bežné nefarbené amorfné polyméry sú priehľadné.

Semikryštalické polyméry kryštalizujú z taveniny alebo z koncentrovaného roztoku. Pri kryštalizácii sa vplyvom medzimolekulových príťažlivých síl vytvárajú agregáty s najmenšou možnou potenciálnou energiou, reťazce sa skladajú. Vzniká 3D-štruktúra s usporiadaním na dlhšiu vzdialenosť. Nárast kryštalinity je sprevádzaný

zvýšením hustoty polyméru a nárastom medzimolekulových síl kvôli tesnejšiemu usporiadaniu reťazcov. Rastie pevnosť, tvrdosť a modul pružnosti. Klesá ťažnosť a polymér stráca priehľadnosť. Možno sa však stretnúť aj s nepriehľadnými amorfnými polymérmi – nepriehľadnosť tu spôsobujú prísady – ako aj s priehľadnými semikryštalickými polymérmi, pričom ich priehľadnosť sa dosahuje pomocou prísad, ktoré spôsobujú, že kryštalické oblasti sú veľmi malé, a tak nedochádza k rozptylu svetla. Existujú aj polyméry, v ktorých štruktúra usporiadaných oblastí je viac či menej narušená. Vytvárajú fázy so štruktúrou, ktorá je niečím medzi usporiadanou kryštalickou štruktúrou a neusporiadanou amorfnou štruktúrou. Takéto polyméry nazývame kvapalnokryštalické, typickým príkladom je poly-p-benzamid (PPBA). V prípade kvapalných kryštálov sa v určitom intervale teplôt zachováva usporiadanie, ale medzimolekulové sily sú malé na to, aby zabránili toku. Usporiadanie v týchto látkach sa mení pri zmene fyzikálnych podmienok, napr. teploty. Molekuly látok vytvárajúcich kvapalnokryštalickú fázu majú nesymetrický tvar. Kvapalnokryštalické polyméry sa využívajú pri príprave veľmi ľahkých, vysoko pevných a teplote odolných vlákien ako napr. Kevlar.

Amorfný termoplast pri zahrievaní od najnižších teplôt prechádza zo sklovitého stavu, v ktorom je tuhý a krehký ako sklo, do tzv. kaučukovitého stavu, v ktorom je pružný, potom pri vyšších teplotách do plastického stavu, tzn. je tvarovateľný, a následne sa roztaví, ako to možno vidieť na schematickom grafe závislosti modulu pružnosti od teploty (obr. 1.10). Termoset pri zahriatí zo sklovitého stavu sa stáva trochu pružnejším, ale pri ďalšom zahrievaní sa už jeho mechanické vlastnosti nemenia, nanajvýš dôjde k zuhoľnatiu.



Obr. 1.10 Schematické znázornenie teplotnej závislosti modulu pružnosti pre termoplast a reaktoplast

Mechanické vlastnosti aj správanie polymérov pri zahrievaní vyplývajú z vlastností ich reťazcov – hlavne ich tvaru, ktorý je určený chemickým zložením polyméru a ovplyvňuje aj nadmolekulovú štruktúru. Vhodnou kombináciou monomérov možno vytvoriť kopolymér, v ktorom sa kombinujú elasticita a tvarovateľnosť, tzv. **termoplastický elastomér**. Termoplastické elastoméry majú podobné vlastnosti ako gúmy (sieťované kaučuky s malou hustotou siete); ich štruktúra je tvorená dvojakými úsekmi (segmentami) reťazcov. Jednak mäkkými segmentami elastomérov, jednak tvrdými segmentami termoplastov, ktoré predstavujú uzly siete, ale vo fyzikálnom zmysle, tzn. na základe pôsobiacich medzimolekulových síl. Na rozdiel od gúm termoplastické elastoméry pri zvyšovaní teploty prechádzajú do tekutého stavu, dajú sa teda spracovávať ako termoplasty.

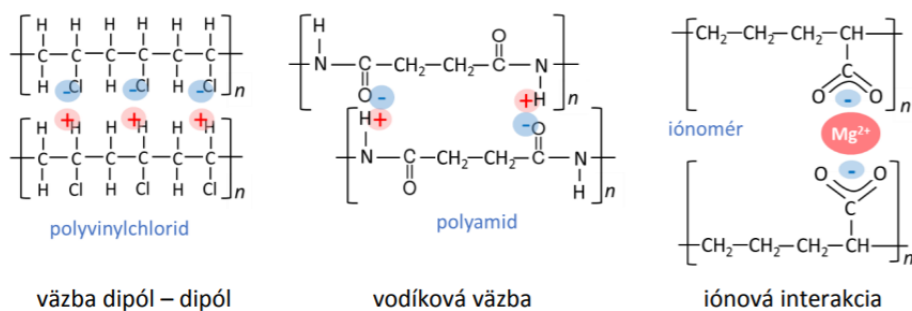
4. Väzbové sily a medzimolekulové interakcie

Nízkomolekulové látky môžu existovať v troch skupenstvách. Plynné skupenstvo je charakteristické tým, že vzdialenosti molekúl sú podstatne väčšie ako ich rozmery a príťažlivé medzimolekulové sily sú zanedbateľné. Častice plynu sú v intenzívnom chaotickom tepelnom pohybe. Plyny sa vyznačujú nízkou hustotou a nestálym tvarom. V kvapalnom skupenstve sú vzdialenosti častíc porovnateľné s ich rozmermi. Medzi časticami je silná medzimolekulová interakcia. Chaotický tepelný pohyb častíc v kvapalinách je čiastočne obmedzený. Kvapaliny majú vyššiu hustotu ako plyny, ich hustota je porovnateľná s hustotou látok v pevnom skupenstve. Kvapaliny nemajú stály tvar. V pevnom skupenstve sú vzdialenosti častíc porovnateľné s kvapalným skupenstvom. Častice na seba intenzívne pôsobia, ich pohyb je tak obmedzený. Materiál v pevnom skupenstve sa vyznačuje stálym tvarom. Vieme, že skupenstvo sa môže za určitých okolností meniť, charakter skupenstva závisí od stavových podmienok (tlak, teplota) a od súdržných síl medzi časticami. V pevnom skupenskom stave je možné náhodné rozloženie molekúl podobne ako v kvapalinách – takéto pevné látky označujeme ako amorfné. Avšak je možné aj priestorovo úspornejšie usporiadanie, ktoré je pravidelné – vtedy hovoríme o kryštalických látkach.

S rastúcim počtom monomérených jednotiek sa mení látka z plynnej na kvapalnú, rastie jej viskozita, rastie teplota topenia aj pevnosť materiálu. Od určitej dĺžky reťazca sa látka správa ako polymér. Špecifické vlastnosti polymérov teda súvisia s veľkosťou ich molekúl. S rastúcou veľkosťou molekúl rastú totiž aj súdržné sily medzi nimi. Keďže polyméry sú makromolekulové látky, úhrnná medzimolekulová súdržnosť reťazcov mnohonásobne prevyšuje dokonca pevnosť kovalentných väzieb, preto je nemožná izolácia molekúl do plynného skupenstva. Polyméry existujú len v kvapalnom a tuhom stave.

Od nízkomolekulových látok sa polyméry najvýraznejšie odlišujú v mechanických vlastnostiach a v závislosti týchto vlastností od teploty. Tieto odlišnosti súvisia s makromolekulovým charakterom polymérov ako aj s pohyblivosťou polymérnych reťazcov v rámci makromolekúl. Istá podobnosť vlastností polymérov s nízkomolekulovými látkami súvisí s charakterom síl súdržnosti. Väzbové sily súdržnosti sú sily pôsobiace medzi časticami látky, súvisia so vzájomným silovým pôsobením elektrónov. Sily medzi časticami látky určujú jedinečné vlastnosti daného materiálu. Tieto sily súvisia s rozložením elektrického náboja v atómoch i molekulách. Rovnovážne rozloženie atómov v látke a vzdialenosti medzi nimi sú výsledkom vzájomného príťažlivého aj odpudivého pôsobenia atómov.

Za primárne sily súdržnosti považujeme tzv. valenčné sily sprostredkované valenčnými elektrónmi, ktoré sa podieľajú na tvorbe chemických väzieb. Atómy sa zhľukujú, dosiahnu tak energeticky výhodnejší stav s nižšou potenciálnou energiou, preto sú tieto väzby pevné. Chemické väzby môžu byť kovalentné, iónové alebo kovové (pozri kap. Stavba čistých kovov a zliatin). V polyméroch významne prevažujú kovalentné väzby. Primárne sily vyplývajú z chemického zloženia materiálu. Sekundárne súdržné interakcie, označované tiež ako kohézne sily alebo aj van der Waalove sily (pozri kap. Stavba čistých kovov a zliatin), sú príťažlivé sily medzi molekulami (atómami) s uzatvorenými elektrónovými obalmi. Sú to interakcie spôsobujúce tvorbu kondenzovanej fázy látok. V prípade polymérov sú to aj interakcie medzi časťami tej istej makromolekuly, na základe ktorých sa usporadúvajú reťazce. Tieto sily určujú výsledné vlastnosti materiálu. Sú to interakcie prostredníctvom vodíkových väzieb medzi vodíkom a vysoko elektronegatívnymi prvkami A, B typu A-H...B, kde A a B sú dusík, kyslík alebo fluór (pozri kap. Stavba čistých kovov a zliatin). Ďalej sú to interakcie dipól – dipól, dipól – indukovaný dipól a indukovaný dipól – indukovaný dipól, t. j. disperzné interakcie. Obr. 1.11 znázorňuje zľava doprava reťazce polymérov s narastajúcimi silami súdržnosti – dipólovej interakcie, vodíkovej väzby a iónovej interakcie. Veľkosť a charakter sekundárnych súdržných síl ovplyvňuje vlastnosti polymérov, preto jednotlivé typy interakcií charakterizujeme podrobnejšie.



Obr. 1.11 Schematické znázornenie sekundárnych súdržných síl medzi reťazcami polymérov

Sekundárne sily súdržnosti sú súdržné (kohézne sily) medzi molekulami alebo časťami molekúl, ktoré pôsobia medzi molekulami (atómami) s uzavretými elektrónovými obalmi. Sú to sily, ktoré podmieňujú existenciu kvapalných a tuhých látok. Tieto sily určujú kryštalizačnú schopnosť polymérov, ich úžitkové vlastnosti, charakter interakcie s kvapalinami a plynmi, technologické procesy ich spracovania. Sú to sily krátkého dosahu účinné na vzdialenosť 0,3 až 0,5 nm, čo je približne 3- až 5-násobne väčšia vzdialenosť ako dĺžka kovalentnej väzby. Disociačná energia sekundárnych väzieb spravidla neprevyšuje hodnotu 50 kJmol⁻¹ na jeden atóm, sú približne 10-krát slabšie ako kovalentné väzby. Súdržnosť molekúl rastie s veľkosťou molekúl, teda aj s dĺžkou polymérneho reťazca.

Porovnanie jednotlivých druhov síl súdržnosti na základe veľkostí ich väzbovej energie je uvedené v tabuľke 1.3.

Tab. 1.3 Približné hodnoty väzbových energií pre rôzne typy interakcií v polyméroch

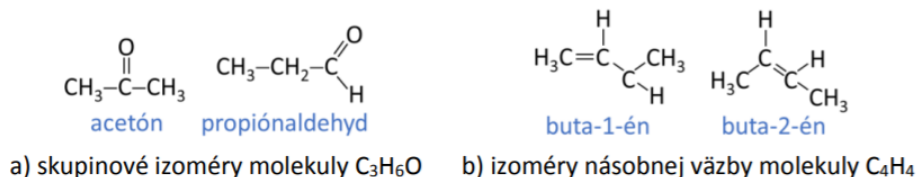
Typy väzby (interakcie)	Väzbová energia (kJmol ⁻¹)
kovalentná	60 ~ 600
iónová	560 ~ 1000
dipól - dipól	≤ 20
vodíková	≤ 50
dipól – indukovaný dipól	≤ 2
indukovaný dipól – indukovaný dipól	0,08 ~ 4

5. Štruktúra a priestorové usporiadanie polymérov

Štruktúra materiálov, myslíme tým spôsob usporiadania a priestorového rozloženia stavebných častíc, ovplyvňuje ich vlastnosti. Napr. uhlík vo forme grafitu a vo forme diamantu sa výrazne odlišujú vo svojich vlastnostiach. Už pri popise rozdelenia polymérov z rôznych hľadísk a pri charakterizovaní súdržných síl sme si mohli uvedomiť, ako štruktúra makromolekulových látok ovplyvňuje ich výsledné vlastnosti. V prípade makromolekulových látok charakterizujeme štruktúru na rôznych úrovniach. **Primárna štruktúra** je daná stabilným usporiadaním atómov v makromolekule. **Sekundárna štruktúra** charakterizuje tvar polymérneho reťazca v priestore, ktorý sa môže meniť bez porušenia chemickej väzby. **Terciárna štruktúra** predstavuje priestorové rozloženie polymérnych reťazcov. **Kvartérna štruktúra** je tvorená nadmolekulovými útvarmi, ktoré vznikli rôznym usporiadaním rovnakých alebo rôznych terciárnych štruktúr. Terciárna a kvartérna štruktúra predstavujú tzv. **nadmolekulovú štruktúru**. V súvislosti so štruktúrou makromolekúl sa často stretávame s pojmami **konformácia** a **konfigurácia**. Termín konfigurácia sa vzťahuje na usporiadanie, ktoré možno zmeniť len zrušením chemickej väzby a vytvorením novej. Zmena poradia atómov tak predstavuje zmenu konfigurácie. Termín konformácia sa týka priestorového usporiadania rôznych častí reťazca. Konformáciu možno zmeniť napr. otočením časti reťazca okolo väzby. Z hľadiska uvedených pojmov konfigurácia predstavuje primárnu a konformácia sekundárnu štruktúru polymérov.

Primárna štruktúra je určená chemickým zložením makromolekuly, priestorovým usporiadaním atómov, ktoré nie je možné meniť bez porušenia chemickej väzby. Vzhľadom na veľkosť makromolekúl je usporiadanie atómov v makromolekule veľmi variabilné. S variabilitou usporiadania atómov sa stretávame aj v prípade nízkomolekulových látok. Nazývame ju **izoméria**. Izoméry sú zlúčeniny s rovnakým sumárnym vzorcom, rovnakou molárnou (molekulovou) hmotnosťou, majú však rozdielne usporiadanie atómov v reťazci alebo v priestore alebo rôzne usporiadanie väzieb. Dôsledkom izomérie sú rozdielne vlastnosti jednotlivých izomérov. Rozlišujeme dva druhy izomérie. V prípade **štruktúrnej (konštitučnej) izomérie** sa izoméry líšia poradím atómov alebo rozložením väzieb alebo skupín atómov, alebo násobných väzieb. Pri **priestorovej izomérii** sa izoméry odlišujú usporiadaním atómov v priestore. Jednotlivé druhy izomérie charakterizujeme bližšie pomocou nízkomolekulových látok.

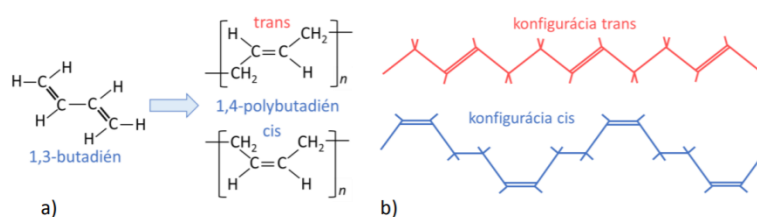
Rozdiel v poradí atómov alebo v rozložení väzieb alebo skupín atómov, alebo násobných väzieb v rámci jednej molekuly sa môže realizovať rôznymi spôsobmi. Pri **reťazovej izomérii** sa molekuly líšia štruktúrou uhlíkovej kostry reťazca, ten môže byť lineárny alebo rozvetvený, napr. zlúčenina so sumárnym vzorcom C₅H₁₂ má tri reťazové izoméry: pentán, izopentán a tetrametylmetán (dimetylpropán). **Polohové izoméry** sa odlišujú polohou funkčných skupín. Pri **skupinovej izomérii** sa izoméry líšia skupinami, ktoré obsahujú kyslík, napr. acetón a propiónaldehyd (obr. 1.12 a). Pri izomérii **funkčných skupín** sa izoméry odlišujú vo funkčných skupinách, napr. dimetyléter a etanol. O **izomérii násobnej väzby** hovoríme v prípade, keď sa v izoméroch nachádza dvojitá väzba na inom mieste reťazca, napr. buta-1-én a buta-2-én (obr. 1.12 b).



Obr. 1.12 Príklady rôznych typov štruktúrnej izomérie

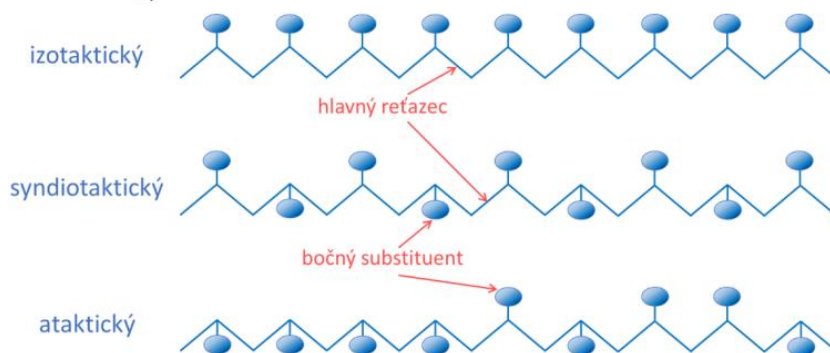
Pri **priestorovej izomérii** majú izoméry rovnakú **konštitúciu**, čiže rovnaké poradie atómov aj rovnaké väzby, ale usporiadanie jednotlivých atómov v priestore je rozdielne. Tieto izoméry nazývame **stereoizoméry**. Stereoizoméry majú rovnaký sumárny vzorec, rozdielne usporiadanie atómov v priestore, sú nezameniteľné, ich 3D-štruktúry sa nazývajú konfigurácie. Konfiguračná – geometrická izoméria sa vyskytuje v zlúčeninách obsahujúcich dvojité väzby (alebo cyklus). Násobná väzba zabraňuje rotácii atómov, a tak v závislosti od rozloženia atómov vznikajú **cis- a trans-izoméry**.

Cis- a trans-izoméry polymérov vznikajú pri polymerizácii monomérov s aspoň dvomi násobnými väzbami, napr. z 1,3-butadiénu vzniká 1,4-polybutadién (obr. 1.13 a). Jeho cis-izomér má obe časti reťazca v blízkosti zvolenej dvojitej väzby na tej istej strane, zatiaľ čo v trans-izoméri sú tieto časti reťazca na opačných stranách zvolenej väzby (obr. 14 b). Tieto polymérne izoméry majú tiež rozdielne vlastnosti. Trans-konfigurácia umožňuje tesnejšie priblíženie reťazcov a ľahšie vytvára kryštalické oblasti, cis-konfigurácia je menej pravidelná, čo obmedzuje usporadúvanie reťazcov a vytvárajú sa rozsiahle amorfné oblasti. Trans-izomér má vyššiu teplotu topenia. Cis-izomér je elastickejší. Konfigurácia cis umožňuje voľnejšiu rotáciu skupín atómov v susedstve dvojitých väzieb ako trans-konfigurácia, preto je napr. prírodný kaučuk (poly-1,4-cis-izoprén) poddajnejší ako gutaperča (poly-1,4-trans-izoprén).



Obr. 1.13 Schematické znázornenie: a) trans- a cis- izomérie 1,4-polybutadiénu, b) tvaru reťazca

Keď sú stereoizomérnymi centrami atómy uhlíka v hlavnom reťazci, s rozličnými bočnými substituentami, tak postupnosť ich radenia v reťazci určuje **takticitu polyméru** (obr. 1.14). Ak sú konfiguračné jednotky rovnakého typu pravidelne usporiadané v priestore, jedná sa o **izotaktický polymér** – substituenty sú pravidelne usporiadané na jednej strane roviny, v ktorej leží uhlíkový reťazec. Izotaktické polyméry zväčša kryštalizujú. V prípade **syndiotaktických polymérov** sú substituenty pravidelne usporiadané nad i pod rovinou polymérneho uhlíkového reťazca, jednotlivé konfiguračné sa pravidelne striedajú. Kryštalizácia týchto polymérov je obmedzená. V **ataktických polyméroch** sú konfiguračné jednotky usporiadané nepravidelne – substituenty sú náhodne rozmiestnené na oboch stranách roviny uhlíkového reťazca. Ataktické polyméry nekryštalizujú. Izotaktický, syndiotaktický a ataktický polymér sú konfiguračné izoméry.



Obr. 1.14 Schematické znázornenie konfigurácie reťazcov s rôznou takticitou

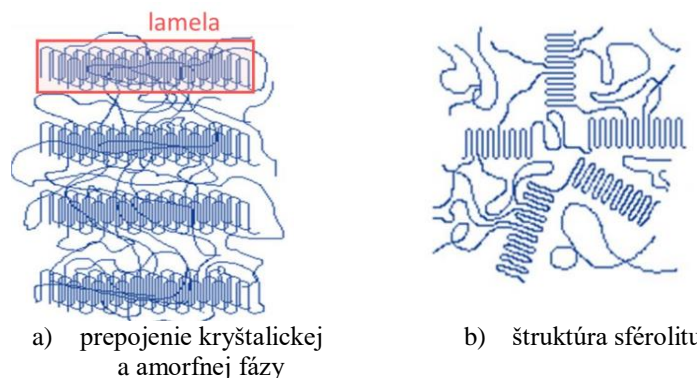
Sekundárna štruktúra predstavuje rozloženie reťazca a substituentov v priestore, ktoré možno zmeniť bez porušenia chemickej väzby – teda pootočením časti reťazca. V podstate sa jedná o **konformáciu**. Konformačné izoméry sa odlišujú rôznym priestorovým rozložením častí reťazcov a môžu mať aj rozdielne fyzikálne vlastnosti. V amorfných oblastiach polymérov zaujímajú reťazce konformáciu náhodného kľbka, zatiaľ čo v kryštalických oblastiach majú reťazce skladanú konformáciu. Rôzne konformačné izoméry sú v látke v dynamickej rovnováhe, nemožno ich od seba izolovať. Konformácie polymérnych reťazcov sú vysoko variabilné vďaka vysokému počtu

atómov a možnosti otáčania častí reťazcov okolo jednoduchých väzieb. V dôsledku tepelného pohybu sa konformácia reťazca neustále mení.

Keď hovoríme o **terciárnej štruktúre** polymérov, máme na mysli vzájomné uloženie reťazcov. Treba si uvedomiť, že reťazce majú rôznu dĺžku, rôzny tvar a že vzájomne interagujú. Ak aj vzniká usporiadanie, nie je úplne pravidelné, ale vytvára mikroštruktúry s rozdielnymi fyzikálnymi vlastnosťami. Tieto vlastnosti vyplývajú práve z **nadmolekulovej štruktúry**, ktorá môže byť neusporiadaná, t. j. amorfná, alebo usporiadaná, ktorú v prípade polymérov označujeme semikryštalická štruktúra.

V prípade kryštalizujúcich polymérov možno nadmolekulovú štruktúru ovplyvniť podmienkami prípravy polyméru. Z taveniny tak môže vzniknúť semikryštalická alebo amorfná tuhá látka. V amorfnej štruktúre sú reťazce náhodne poskladané v nepravidelných útvaroch, klbkách. V nich sú reťazce vzájomne prepletené do nepravidelnej siete. Prepletenia predstavujú fyzikálne uzly siete. Ich množstvo a vzdialenosti medzi nimi určujú mechanickú pevnosť polyméru. Zhluky reťazcov sú v objeme polyméru nepravidelne rozmiestnené. Vzájomne ich viažu van der Waalove sily. V niektorých prípadoch môže dôjsť k vzájomnému usporiadaniu klbk reťazcov do mikroskopických kryštalografických útvarov, pričom si klbká zachovávajú svoj individuálny charakter. Pri pôsobení vonkajších síl sa dosiahne vyššia forma usporiadania v polymérnom amorfnom materiáli. Reťazce sa rozvinú a vytvárajú paralelne združené zväzky, sú to tzv. nepravé kryštalinity. Vlastnosti amorfných polymérov významne závisia od teploty. Amorfná štruktúra je typická pre makromolekuly s nepravidelnou primárnou štruktúrou, pre makromolekuly s objemnými bočnými skupinami v reťazci, ktoré bránia usporiadaniu reťazcov do pravidelných útvarov.

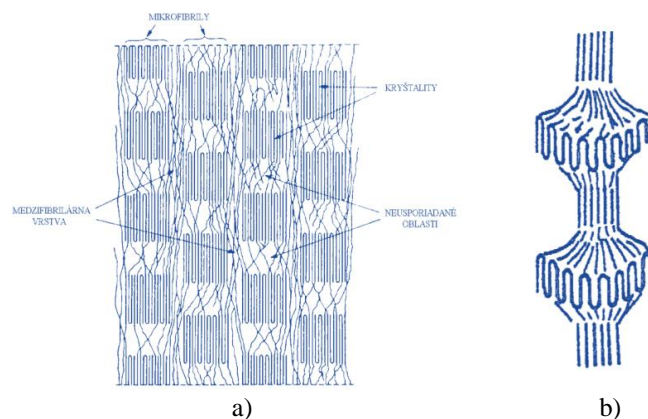
Kvôli veľkosti makromolekúl je štruktúra kryštalizujúcich polymérov len čiastočne kryštalická, nazývame ju semikryštalická. Kryštalická fáza v polyméroch je obklopená a prepojená s amorfnou fázou (obr. 1.15 a). Monokryštalit polyméru možno pripraviť len za špeciálnych podmienok z veľmi zriedeného roztoku PE. Obvykle je vo forme doštičky, ktorú nazývame lamela. Lamelu tvoria reťazce v skladanej konformácii. Šírka lamely je rádovo 10^{-5} m, hrúbka cca 10^{-8} m, niekedy býva pyramídálne prehnutá. Ohyb reťazcov tvorí približne päť až šesť atómov uhlíka, medzi ohybmi je reťazec tvorený asi sedemdesiatimi až stopäťdesiatimi atómami uhlíka (sedem atómov uhlíka v reťazci predstavuje cca 1 nm). Tie atómy, ktoré sa nachádzajú v ohybe, nie sú súčasťou kryštalickej mriežky. Pri kryštalizácii z taveniny nie sú vhodné podmienky na rast kryštalitov. Vytvárajú sa lamelárne útvary s podobnými parametrami ako monokryštalinity prepojené s neusporiadanými oblasťami. Jeden reťazec môže byť súčasťou viacerých susedných lamiel, pričom úseky reťazcov zapojených do lamiel majú skladanú – usporiadanú konformáciu – a časti reťazcov v priestore medzi lamelami neusporiadanú konformáciu. Kryštalické lamely vytvárajú polykryštalické útvary, ktoré už môžeme hodnotiť ako kvartérnu štruktúru, napr. guľovité agregáty oblastí s kryštalickou a amorfnou štruktúrou nazývané sférolity (obr. 1.15 b). Podmienky kryštalizácie ovplyvňujú veľkosť a hrúbku lamiel, a tak aj vlastnosti výsledného materiálu. Ak kryštalizácia prebieha pri šmykovom namáhaní alebo s gradientom teploty, vznikajú vláknité alebo ihlicovité útvary. Podiel kryštalickej fázy v polyméroch označujeme pojmom kryštalinita alebo kryštalický podiel.



Obr. 1.15 Schematické znázornenie usporiadaných a neusporiadaných oblastí v štruktúre polymérneho reťazca

Terciárne štruktúry v polyméroch sú vzájomne prepojené. Spôsob ich rozloženia v priestore predstavuje **kvartérnu štruktúru** označovanú aj ako morfológia. Možno ich identifikovať napr. pomocou elektrónového alebo polarizačného mikroskopu. Sférolitická štruktúra dáva pri pozorovaní polarizačným mikroskopom typické obrazce

maltézskeho kríža. V čisto amorfných polyméroch sa vyskytujú nepravidelné zhluky reťazcov. Tvoria tak oblasti s rôznou hustotou, a tým aj s rôznymi vlastnosťami. V semikryštalických polyméroch sa stretávame s rozmanitejšími útvarmi, okrem spomínaných sférolitov to môžu byť fibrily alebo štruktúra šiškebab, ktoré vznikajú pri použití šmykového napätia v procese kryštalizácie. Sférolity sú guľovité agregáty kryštalických a amorfných subštruktúr. Lamelárne útvary v nich vychádzajú lúčovito z nukleačného centra (zárodok kryštalizácie) v smere polomeru, úseky skladaných reťazcov sú uložené kolmo na smer polomeru. Vo vzdialenejších oblastiach od nukleačného centra sa lamely vetvia. Vo fibrilárnej štruktúre (obr. 1.16 a) sú kryštality oddelené neusporiadanými oblasťami. Úseky skladaných reťazcov sú uložené v smere fibrily. V štruktúre šiškebab (obr. 1.16 b) sa striedajú úseky skladaných a vzpriamených reťazcov.



Obr. 1.16 Schematické znázornenie usporiadaných štruktúr polymérov: a) fibrilárna štruktúra, b) štruktúra šiškebab

Štruktúra polymérov ovplyvňuje ich vlastnosti. Chemické zloženie makromolekuly určuje hustotu materiálu, veľkosť interakcie medzi reťazcami, pohyblivosť reťazcov a následne pevnosť polyméru. Konfigurácia makromolekúl, t. j. primárna štruktúra ovplyvňuje kryštalizáciu, teplotu topenia, pohyblivosť reťazcov, a tým pevnosť polyméru. Konformácie makromolekúl (sekundárna štruktúra) podmieňujú kryštalizáciu polyméru, teplotu sklovitého prechodu, teplotu topenia a aj hustotu prepletení. Prítomnosť defektov v štruktúre vplýva na hustotu, pohyblivosť reťazcov, určuje pevnosť v ťahu a ovplyvňuje aj starnutie polyméru. Mechanické vlastnosti polymérov sú určené najmä ich štruktúrou a morfológiou, ktoré zas vyplývajú z chemického zloženia, veľkosti a tvaru makromolekúl. Výsledné vlastnosti polymérov sú dané celým komplexom parametrov od chemickej povahy stavebnej jednotky až po nadmolekulovú štruktúru. Nesmieme zabudnúť ani na vplyv fyzikálnych podmienok (teplota, tlak, vlhkosť, ...), v akých sa polymérne materiály nachádzajú.

Literatúra:

1. J. Bína a kol.: Malá encyklopédia chémie, OBZOR Bratislava, 1981.
2. M. Jambrich, A. Pikler, I. Diačik: Fyzika vlákien, ALFA Bratislava, 1987.
3. T. Liptáková, P. Alexy, E. Gondár, V. Kuhnová: Polymérne konštrukčné materiály, Žilinská univerzita v Žiline, 2012. [4] B. Meissner, V. Zilvar: Fyzika polymérov, SNTL / ALFA Praha, 1987.
4. P. Atkins, J. de Paula: Fyzikální chemie, ČVUT Praha, 2013.
5. L. Běhálek: Polymery, 2014. <https://publi.cz/books/180/Cover.html>.
6. R. O. Ebewele: Polymer Science and technology, CRC Press LLC, 2000. [4] I. Šimek: Fyzika polymérov, SVŠT Bratislava, 1987.
7. B. Meissner, V. Zilvar: Fyzika polymérov, SNTL / ALFA Praha, 1987.
8. D. Kniewald, J. Hidvéghy, J. Brezinová, A. Guzanová: Náuka o plastoch, EDÍCIA ŠTUDIJNEJ LITERATÚRY Košice, 2007.
9. O. Fričová: Polymérne materiály: Štruktúra a vnútorné interakcie v polyméroch, Košice 2019.
10. P. Palček, L. Markovičová, V. Zatkáliková: Materiály pre biomedicínske inžinierstvo, EDIS 2018.