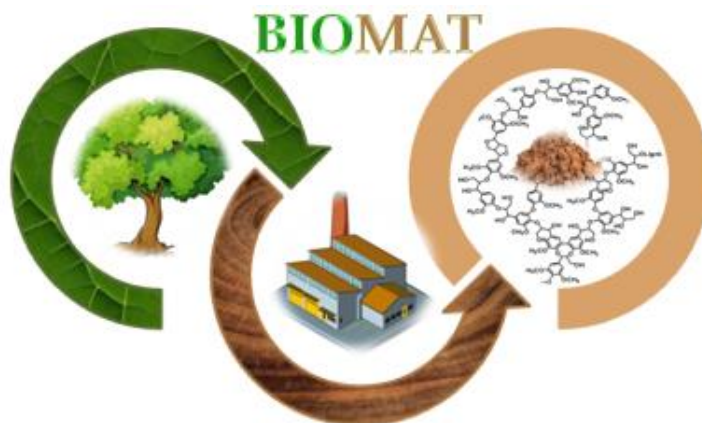


УНИВЕРЗИТЕТ МАРИ КИРИ-СКОДОВСКА ВО ЛУБЛИН, ПОЛСКА



Дел 2

Добивање полимерни материјали со додавање на лигнин, тестирање и евалуација на нивните својства

автори:

BEATA PODKOŚCIELNA, MONIKA WAWRZKIEWICZ, ANNA WOŁOWICZ,
MARTA GOLISZEK-CHABROS, ŁUKASZ SZAJNECKI, PRZEMYSŁAW PODKOŚCIELNY

Лублин 2025

Е-скриптата беше креирана
како дел од проектот насловен

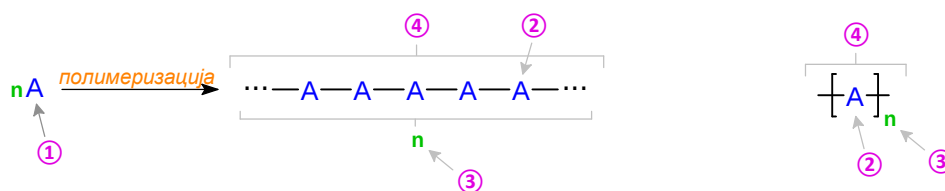
*„Подобрување на наставните компетенции во областа на дизајнирање на
биоматеријали од новата генерација од дрвен отпад “*

Проект бр.: 2024-1-PL01-KA220-HED-000246133
Програма Еразмус+:
KA220-HED – Соработка во високото образование.

1. Синтеза на полимерни микросфери со додаден лигнин со метод на суспензиска полимеризација

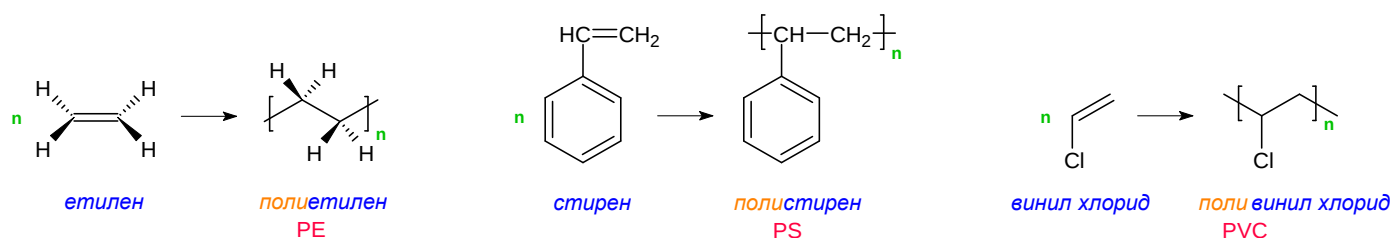
Влез

Полимери (грчки *poly*= „многу“, грчки *meros*= „делови“) е група на макромолекуларни соединенија чии молекули се составени од повторувачки елементи (единици) наречени мери, врзани заедно во доволен број за да поседуваат својства кои не се менуваат значително како резултат на додавање или отстранување на еден или повеќе мери. Полимерните макромолекули можат да се формираат со спојување (полимеризација) на голем број молекули наречени мономери. Бројот на мери присутни во макромолекула е таканаречениот степен на полимеризација (Слика 1.1).



Слика 1.1. Шема на формирање и структура на полимерни макромолекули: ① мономер, ② мер, ③ степен на полимеризација, ④ полимерна макромолекула.

Примери за најпопуларните полимери кои се широко користени се поли(етилен), поли(стирен) и поли(винилхлорид) (Слика 1.2).



Слика 1.2. Хемиски формули на мономери и фрагменти од макромолекуларни структури за поли(етилен), поли(стирен) и поли(винилхлорид).

Покрај терминот *мер* или *структурна единица*, може да се сретнат и термините *конститутивна*, *повторувачка* или *мономерна единица* (Florjańczyk, Penczek, 1997).

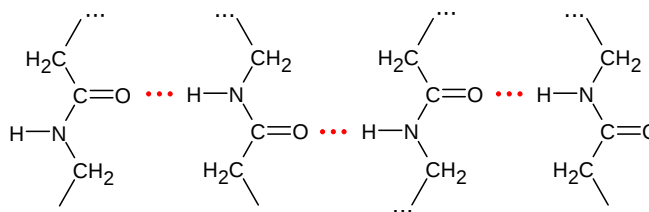
Олигомерите се макромолекули што содржат од 1000 до 10000 мери. Полимерните макромолекули се составени од илјадници атоми поврзани со врски од прв ред (главно ковалентни) со енергии на дисоцијација од 105–106 J/mol.

Физичките интеракции наречени врски од втор ред се јавуваат помеѓу синцирите на истата макромолекула и соседните макромолекули. Овие интеракции, класифицирани како вандерВалсови сили, се карактеризираат со енергии на дисоцијација од редот на 10^2 – 10^3 J/mol, што е значително пониско од енергијата на ковалентните врски во макромолекулите.

Во случај на полимери, следниве интеракции играат особено важна улога:

- перманентен дипол – перманентен дипол,
- перманентен дипол – индуциран дипол,
- индуцирандипол– индуцирандипол,
- сили на дисперзија.

Врските од втор ред, исто така, вклучуваат водородни врски со енергии на дисоцијација од редот на 102–104 J/mol. Овие врски играат важна улога кај многу полимери, вклучувајќи ги и поли(амиди)те (Слика 1.3).



Слика 1.3. Структурата на поли(амид)ниот фрагмент е стабилизирана со присуство на водородни врски.

Врските од втор ред, исто така, ја одредуваат кохезијата помеѓу полимерните макромолекули и затоа имаат значително влијание врз механичките својства на полимерите (Rabek, 2008).

Методи за синтеза на полимери

Постојат многу методи за добивање полимери. Најважните и најчесто користените вклучуваат (O'dian, 2004): полимеризација во голем обем, полимеризација во раствор, полимеризација во суспензија и полимеризација во емулзија (Табела 1.1).

Полимеризација во маса (во блок) има релативно ограничени индустриски примени. Овој процес се одвива во чист течен мономер, без додавање на растворувачи. Овој тип на полимеризација најчесто се иницира со употреба на иницијатори, т.е. супстанции кои се распаѓаат под специфични услови (на пр. покачена температура или УВ зрачење) во реактивни

молекули (на пр. радикали). Процесот резултира со униформен полимерен блок кој ја задржува формата на садот во кој е извршена реакцијата. Полимеризацијата во маса може да се изврши во следниве системи:

- хомоген– кога мономерот и добиениот полимер се раствораат еден во друг,
- хетерогена – кога добиениот полимер се таложи во реакционата средина.

Варијанта на полимеризацијата во маса е полимеризација со блок- таложење, за време на која добиениот полимер не се раствора во мономерот и се таложи како талог.

Полимеризацијата во раствор вклучува разредување на мономерот со соодветен растворувач или мешавина од растворувачи. Полимеризацијата со растворувачи може да се изврши на два начина:

- кога употребениот растворувач ги раствора и мономерот и полимерот (*метод на лакирање*),
- кога употребениот растворувач го раствора само мономерот.

Најважните предности на овој метод на полимеризација се:

- можноста за добивање полимери со релативно тесна дистрибуција на молекуларна маса,
- можноста за директна употреба на полимерни раствори за производство на влакна, лакови и лепила,
- способност за контрола на температурата на системот, особено во случај на високо егзотермни реакции.

Суспензиската полимеризација (исто така позната како *бисерна полимеризација* или *суспензиска полимеризација*) се иницира со иницијатор растворен во мономер дисперзиран во воден раствор од органски колоиди или водена суспензија од неоргански соли. Овие стабилизатори (фиксатори) ја фиксираат суспензијата, спречувајќи агломерација на честичките од суспензијата и влијаејќи на големината на добиените „бисери“. Оваа полимеризација се одвива според механизам типичен за полимеризација во маса, со таа разлика што во овој случај, секоја капка дисперзиран мономер претставува „микроблок“.

Факторите што влијаат на текот на полимеризацијата на суспензијата и својствата на добиениот полимер вклучуваат: вид/количина на иницијатор на полимеризација, вид/количина на стабилизатор на суспензијата, мешање на системот, рН вредност на околината.

Некои од најчесто користените иницијатори се бензоил пероксид (BPO) и азобисизобутиронитрил (AIBN). Зголемувањето на концентрацијата на иницијаторот во системот го скратува времето на полимеризација, но исто така ја намалува порозноста на производот. Прекумерното скратување на должините на полимерниот ланец може да биде резултат на претерано високи температури на полимеризација.

Многу често, покрај главниот стабилизатор на суспензијата, се користат адитиви за да се модифицираат неговите перформанси или да се компензираат евентуални недостатоци. Овие адитиви се нарекуваат помошни стабилизатори на суспензијата. Суштинската карактеристика на

главниот заштитен колоид мора да биде неговата растворливост или навлажнување во вода, додека помошниот стабилизатор треба подобро да се раствора во мономерот. Најчесто користените заштитни колоиди вклучуваат: поли(винилалкохол), целулоза и негови деривати: хидроксиетилцелулоза, метилцелулоза, карбоксиметилцелулоза и модифициран скроб, желатин, агар, пектини итн. Заштитниот колоид формира тенок слој околу капките мономер, со што се стабилизира суспензијата механички и електростатски, што спречува соединување на дисперзираната фаза.

За да се добијат порозни полимери, мора да се користи соодветен систем на растворувачи, обично двокомпонентен. Едниот растворувач е добар растворувач за полимерот, додека другиот е нерастворувач. Структурата и волуменот на порите на финалниот кополимер зависат од нивниот тип и волуменски однос кон мономерот. По полимеризацијата, растворувачот што ги пополнува празнините се отстранува со екстракција со употреба на серија растворувачи, како што се ацетон, метанол и толуен.

Емулзиска полимеризација – во овој метод, мономерот се дисперзира во вода со помош на емулгатор, обично синтетички детергент. Детергентот формира фини мицели кои содржат мал дел од мономерот, додека остатокот е суспендиран во водата без помош на сурфактант. Емулзиската полимеризација се одвива првенствено во кластери од сурфактанти. Мономерите што се користат за овој тип на полимеризација мора да бидат високо чисти и без инхибитори. Во овој метод се користат следните помошни агенци:

- емулгатори,
- стабилизатори на емулзија,
- супстанции за регулирање,
- иницијатори (H_2O_2 , кумен хидропероксид, персулфати, редокс системи).

Емулгаторите се површински активни соединенија кои овозможуваат формирање на стабилна емулзија на мономер во вода. Повеќето од нив се состојат од хидрофилен дел и хидрофобен (алкил) дел. Емулгаторите што се користат во емулзиската полимеризација вклучуваат: глицерол естри на масни киселини, кватернерни амониумовисоли, пиридиниумови соли, фосфониумови соли, солинамасни киселини, алкилсулфати и алкилсулфати.

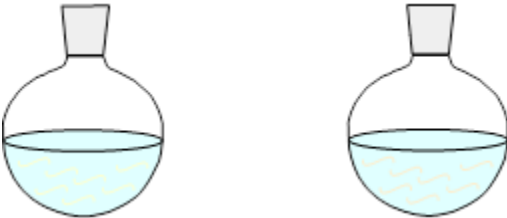
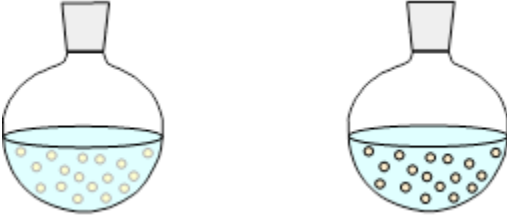
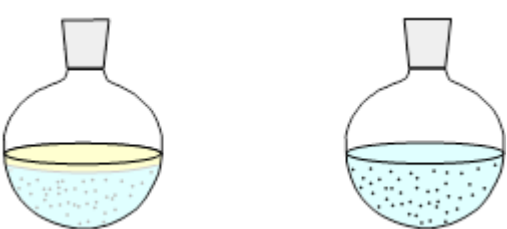
Во реакционата смеса често се додаваат пуферни супстанции (кисели соли на јаглородна киселина, ацетати, фосфати). Ова е за да се одржи константна рН вредност, бидејќи влијае на стабилноста на емулзијата и кинетиката на полимеризацијата. Емулзионата полимеризација произведува полимерни емулзии наменети за производство на лепила, емулзиони бои и средства за импрегнирање.

Кај емулзионата полимеризација, зголемувањето на брзината на реакцијата не го намалува значително степенот на полимеризација, за разлика од полимеризацијата во маса. Производите

добие ни од оваа реакција имаат високи молекуларни маси. Поради предностите споменати погоре, овој метод се користи во голема мера во индустријата.

Главните процеси што се изведуваат со овој метод на индустриско ниво вклучуваат: полимеризација на винил ацетат, винил хлорид, изопрен и естри на акрилна киселина.

Табела 1.1. Карактеристики на избрани техники на полимеризација.

Пред полимеризација	Техника полимеризација	По полимеризација
<u>Иницијатор</u> растворен во <u>мономерот</u> .	1. ВО МАСА 	<u>Полимер</u> во форма на униформен блок.
<u>Иницијатор</u> , <u>мономер</u> и <u>сурфактант</u> во раствор.	2. ВО РАСТВОР 	<u>Полимер</u> растворен во раствор.
<u>Иницијатор</u> растворен во мономер. <u>Мономер</u> во форма на суспензија. <u>Сурфактант</u> фаза континуиран.	3. СУСПЕНЗИЈА 	<u>Полимер</u> во сферична форма (микросфери).
<u>Иницијатор</u> растворен во континуираната фаза. <u>Мономер</u> како посебна фаза што формира мицели. <u>Сурфактант</u> во мицели и во континуирана фаза.	4. ЕМУЛЗИЈА 	<u>Полимер</u> во сферична форма (микросфери).

Експериментален дел

Целта на вежбата

Целта на вежбата е да се синтетизираат полимерни микросфери што содржат лигнин со употреба на техника на суспензиона полимеризација.

Опрема

Колба со тркалезно дно со три грла, 250 mL
Механичка мешалка
Рефлуксен кондензатор за вода
Термометар
Чаши, 50 mL
Стаклено стапче
Стаклена инка
Грејна обвивка со регулатор на напон
Комплет за вакуумска филтрација под притисок
Петриева чинија
Оптички микроскоп
Вага

Реагенси

Етиленгликолдиметакрилат (EGDMA)
Винил ацетат (VA)
Азобисизобутиронитрил (AIBN)
Крафт лигнин (LIG)
Бензил алкохол (BA)
Поли(винилалкохол) (PVA)
Дестилирана вода

Изведување на вежбата

Подготовка на реакционата средина

Додадете 150 mL вода во колба со тригрла и тркалезно дно. Опремете ја колбата со рефлуксен кондензатор, термометар и механичка мешалка. Додека мешате, загрејте ја водата на 80 °C, а потоа додадете 1 g PVA. Одржувајте ја температурата на 80 °C и мешајте континуирано додека PVA целосно не се раствори.

Подготовка на реакционата смеса

Во чаша од 50 mL, подгответе мешавина од 0,43 g лигнин во 10 mL бензил алкохол. Загрејте ја содржината на чашата на 60 °C, а потоа оладете ја на собна температура. Додадете 10 g EGDMA и 4,3 g винил ацетат (VA) во растворот од лигнин и добро измешајте (релативен моларен однос на мономерите = 1:1). Непосредно пред да започнете со полимеризацијата, додадете 0,143 g AIBN (1% wt.) во реакционата смеса во чашата во однос на вкупната маса на мономерите).

Полимеризација

Откако иницијаторот целосно ќе се раствори во реакционата смеса, со континуирано работење на механичката мешалка, истурете ја содржината од чашата во колбата со тркалезно дно. Одржувајќи ја температурата на 80 °C и константна брзина на мешалката, полимеризирајте го системот 2 часа.

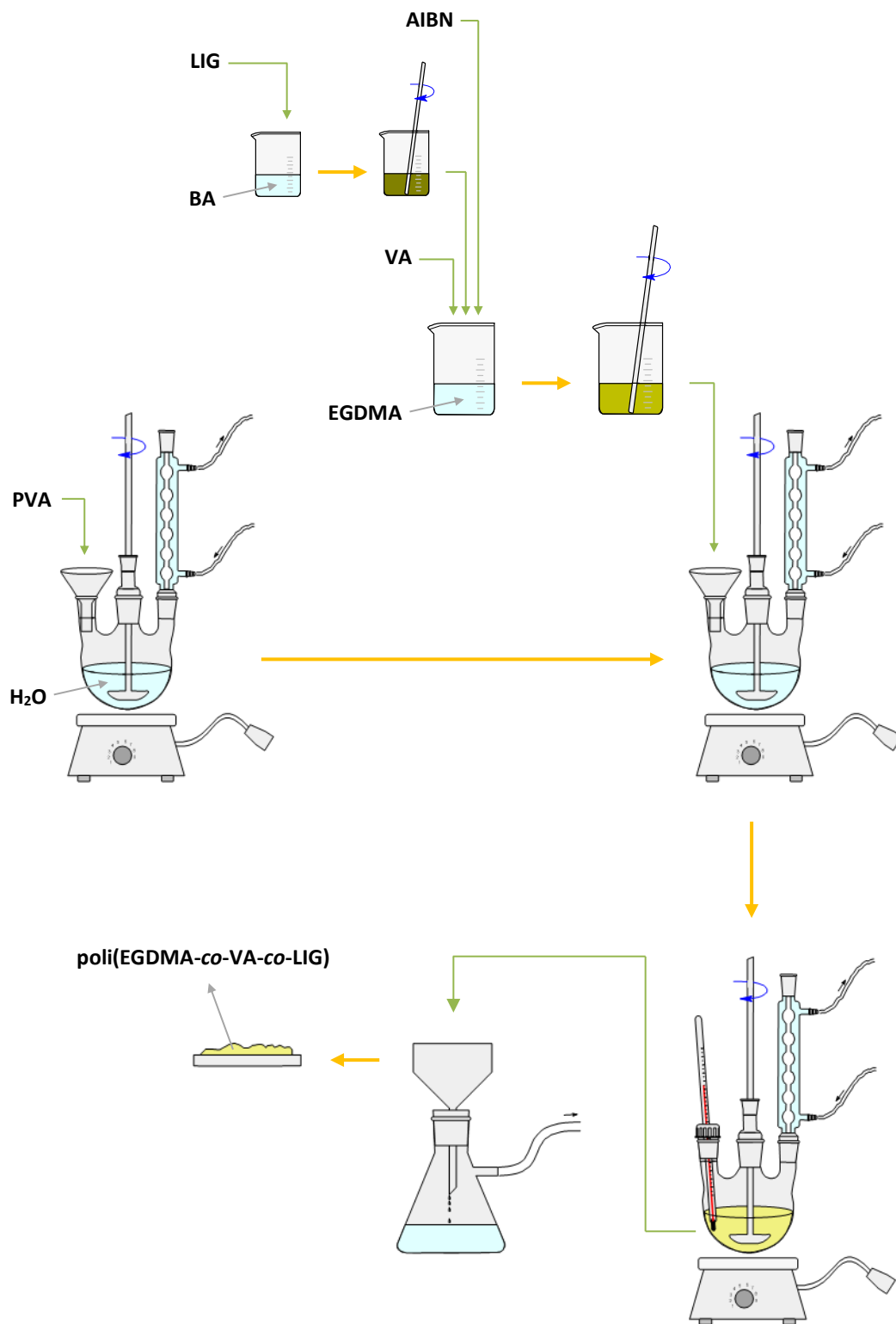
Изолација на производот

Откако ќе заврши полимеризацијата, добиената суспензија филтрирајте ја во колба со тркалезно дно под намален притисок и темелно измијте ги полимерните микросфери што остануваат на филтерот со топла вода (додека не исчезне пената во филтратот). Добиениот полимер, т.е. поли(EGDMA-co-VA-co-LIG), префрлете го во Петриева шоља, исушете го и измерете го.

Шематскиот дијаграм на лабораториската постапка за синтеза на полимерни микросфери што содржат лигнин е прикажан на Слика 1.4.

Интерпретација на резултатите

- Пресметајте го приносот на реакцијата.
- Оценете ја морфологијата (на пр., облик, дијаметар) на добиените поли(EGDMA-co-VA-co-LIG) микросфери врз основа на микроскопско набљудување на примерокот.
- Опционално: снимете го спектарот на поли(EGDMA-co-VA-co-LIG) со инфрацрвена спектроскопија со Фуриеова трансформација (FTIR) и анализирајте го.
- Согледајте ги сорпциските својства на поли(EGDMA-co-VA-co-LIG).
- За да се процени ефектот од присуството на лигнин врз одредени својства на добиениот производ (вклучувајќи ги и својствата на сорпција), тие треба да се споредат со својствата на референтен материјал, т.е. кополимер без лигнин добиен во лабораториска постапка идентична со опишаната, без употреба на лигнин.



Слика 1.4. Шематски дијаграм на лабораториската постапка за синтеза на полимерни микросфери што содржат литнин.

2. Примена на полимерни микросфери со лигнин за атсорпциско отстранување на токсични бои

Влез

Значителен број физички и хемиски процеси се случуваат на интерфејсот помеѓу контактните фази, како што се цврстите и течните фази. Разбирањето на овие феномени е клучно за објаснување на механизмите на многу реакции и технолошки процеси.

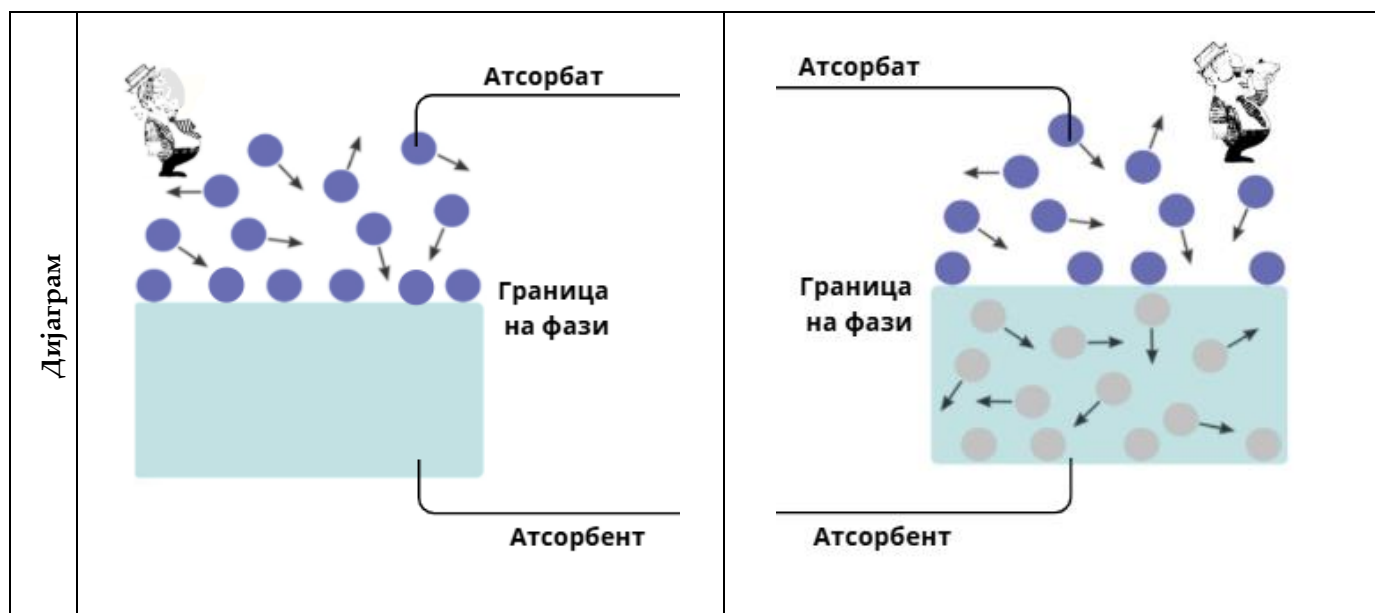
Атсорпцијата е процес на акумулација на супстанции (молекули, атоми или јони) на интерфејс или површина, што доведува до промена на концентрацијата на супстанцијата на границата на две фази (Saleh, 2022) . **Атсорпцијата може да се случи на различни фазни граници:** цврста-гас; цврста-течна; течност-течна; течност-гас (Bielański, 2013). Супстанцата на која соединенијата атсорбираат се нарекува **атсорбент**, а атсорбирачката супстанција се нарекува **атсорбат** (Tien, 2019).

Атсорпција и апсорпција

Поради сличноста во правописот, термините атсорпција и апсорпција често се користат наизменично од страна на неексперти. Сепак, **атсорпцијата** не треба да се меша со **апсорпција**, бидејќи постојат значајни разлики меѓу нив (Табела 2.1).

Табела 2.1. Споредба на атсорпција и апсорпција (Chua et al., 2002; Nguyen et al., 2025; Tien, 2019; Zamljenet al., 2024; Zarzycki et al., 2013).

Сорпција	Атсорпција	Апсорпција
	акумулација на супстанции на површината на друга фаза	апсорпција на супстанција во друга фаза
Примери	- атсорпција на бои на површината на активиран јаглерод (прочистување на раствори) - атсорпција на водена пареа со силика гел (спакувани средства за сушење) - апсорпција на гасови со активен јаглен (гасни маски) - атсорпција на водород на површината на платина во реакции на хидрогенизација (хетерогена катализа)	- растворање на гасови во течности (прехранбена индустрија, на пр. CO₂ во вода) - апсорпција на вода од сунѓер (течноста продира во порозниот материјал) - апсорпција на кислород од хемоглобин во крвта (лек) - апсорпција на водена пареа преку: хигроскопски соли , на пр. CaCl₂ (испорака), концентрирани киселини, на пр. H₂SO₄ или бази, на пр. NaOH (хемиски процеси што бараат безводни услови, сушење на воздух и технички гасови, складирање на производичувствителни на влага)



За разлика од адсорпцијата, која се јавува на површина, апсорпцијата вклучува апсорпција на адсорбатните честички од целиот волумен на течност или цврста материја (Bieleński, 2013). Апсорпцијата на гас е процес во кој гасовита смеса се доведува во контакт со течност за да се раствори една или повеќе од компонентите на смесата во течнота. Апсорпцијата затоа е волуметриски феномен, а степенот на одвојување е ограничен од растворливоста на вклучените гасови. Кога е тешко да се утврди кој од двата феномена се разгледува, накратко го нарекуваме **сорпција** (Tien, 2019; Zarzycki et al., 2013). Адсорпцијата игра најважна улога во аналитичката хемија, каде што адсорбентот е цврста материја, а адсорбатот е супстанца растворена во растворот.

Видови на адсорпција

Во зависност од видот на интеракциите помеѓу молекулите на адсорбираното тело (адсорбат) и површината на адсорбирачкото тело (адсорбент), разликуваме **физичка адсорпција** (физисорпција) и **хемиска адсорпција** (од англиски: *хемисорпција*, *хемиска адсорпција*) (Табела 2.2).

Табела 2.2. Споредба на физичката и хемиската адсорпција (Aljamali et al., 2021; Bielański, 2013).

	Адсорпција физички (физисорпција)	Адсорпција хемиска (хемисорпција)
Влијанија	е определено од релативно слаби меѓумолекуларни сили, ван дер Валсови интеракции	е условено од многу посилни интеракции - се формираат хемиски врски помеѓу адсорбатот и адсорбентот
Адсорбент	адсорбатот може да создаде повеќе слоеви на адсорпција на површината	Адсорбатот може да формира еден адсорпциски слој (монослој) на површината
Реверзибилност	е реверзибилна – адсорбираната супстанца	тоа е прилично неповратно -

процес	може лесно да се отстрани (десорбира) од површината	адсорбираната супстанција обично е тешко да се отстрани од површината на адсорбентот или нејзиното отстранување бара употреба на соодветни средства
Температура	раст температура причини десорпција	зголемувањето на температурата предизвикува зголемување на стапката на адсорпција
Топло	е обично ниска и се движи од 5 до 40 kJ/mol адсорбат	е голем, од редот на топлината на хемиска реакција и се движи од 80-400 kJ/mol

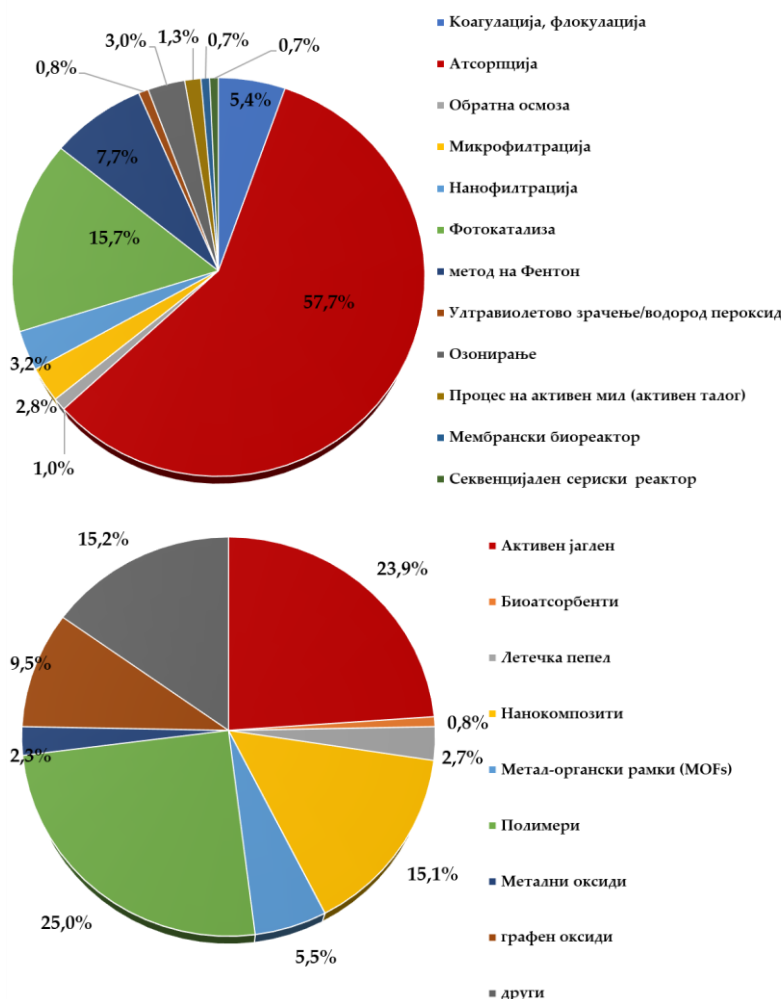
Атсорпција на интерфејсот цврст раствор

Атсорпцијата на интерфејсот помеѓу цврста супстанца и растворувач е посложен процес во споредба со атсорпцијата на гас. Во овој случај, и молекулите на растворената супстанца и молекулите на растворувачот се атсорбираат. Како што се менуваат концентрациите, компонентите на растворот се поместуваат едни со други од површинскиот слој, што е најкарактеристична карактеристика на процесот на атсорпција од растворот. Големината на атсорпцијата е одредена и од интеракцијата помеѓу адсорбентот и секоја од компонентите на растворот и од интеракцијата помеѓу молекулите на компонентите на растворот. Растворената супстанца адсорбира посилно колку што е помалку растворлива во даден растворувач. Количината на адсорбиран растворувач зависи и од нејзината способност да го навлажни адсорбентот. На пример, водата не го навлажнува добро активниот јаглен и затоа, активниот јаглен првенствено ја адсорбира растворената супстанца од воден раствор. Атсорпцијата на слаби електролити е слична на онаа на неелектролити. Во случај на атсорпција на силни електролити, феномените поврзани со интеракцијата на електричните полнежи на јоните играат значајна улога. Само јони со ист знак адсорбираат на површината на цврста супстанца, предизвикувајќи акумулација на електричен полнеж на површината на адсорбентот, што го нарушува принципот на електронеутралност. Затоа, системот има тенденција спонтано да го компензира овој полнеж. Ова може да се постигне на два начина. Една можност е акумулација на јони со спротивен знак (на пр., негативни) на слојот од адсорбирани јони (т.е. позитивни). Овој тип на атсорпција се нарекува *специфична атсорпција*. Вториот метод е адсорбентот да ослободи еквивалентна количина на други јони од ист тип во растворот. Овој тип на атсорпција, наречена *атсорпција со јонска размена*, се јавува кај **вообичаено** користени природни и синтетички зеолити или синтетички органски смоли, таканаречени јонско-разменувачки **смоли** (Bielański, 2013).

Концептот на атсорпција е поврзан со концептот на атсорпциски капацитет. **Атсорпцискиот капацитет** е количината на супстанција адсорбирана по единица маса или волумен на адсорбент под специфични услови, обично изразена во mg адсорбат на g адсорбент (mg/g) или во волуметриски единици, на пр., g/cm³ или mol/L. Оваа вредност ја одразува способноста на

атсорбентот да врзува молекули на загадувач од течната (или гасната) фаза и е еден од основните параметри што ја карактеризираат ефикасноста на атсорбентот. Обично се мери под рамнотежни услови (т.н. рамнотежен капацитет) или во одредено време на контакт со фазата (моментален капацитет).

Атсорпцијата во систем со цврсто-течност е еден од најчесто користените процеси за одвојување и отстранување на загадувачи од животната средина, вклучувајќи органски супстанции, на пр. бои, од водени раствори и отпадни води, поради нејзината ефикасност, не само поради неговите предности, туку и поради широкиот спектар на достапни атсорбенти од различни видови (активиран јаглерод, наноадсорбенти, метални оксиди, метално –органски соединенија, полимери и биоадсорбенти, итн., Слика 2.1.) (Dutta et al., 2021) .



Слика 2.1. Широката употреба на физичко хемиски и биолошки техники и одредени видови атсорбенти за отстранување на бои од водени раствори и отпадни води.

Процесот се базира на сорпција на компонентите на растворот на цврста површина поради нивниот афинитет кон површината на атсорбентот, што може да се должи на нивната хидрофобна природа. **Афинитетот на супстанцијата кон површината на атсорбентот** е мерка за способноста и јачината со која молекулите на атсорбат комуницираат и се врзуваат за површината на атсорбентот за време на процесот на атсорпција. Колку е поголем афинитетот, толку е посилено и потрајно врзувањето на атсорбатот за површината, што доведува до поефикасно задржување на супстанцијата. Ефикасноста на сорпција на органските супстанции зависи и од нивната растворливост во раствор - колку е помала растворливоста на соединението, толку е подобра сорпцијата, а растворливоста на овие соединенија, пак, зависи од должината на јагледородниот синцир - колку е подолг јагледородниот синцир на молекулата, толку е помала растворливоста. Затоа, колку е подолг јагледородниот синцир, толку е поголема ефикасноста на сорпција (Adamczak et al., 2017).

Фактори што влијаат на процесот на атсорпција

Процесот на атсорпција и неговата ефикасност се определени од многу фактори поврзани со својствата и на атсорбентот и на атсорбатот, како и со условите на животната средина и експерименталните услови на процесот и температурата (Aljamaliet al., 2021). Поединечните фактори што можат да влијаат на процесот на атсорпција се прикажани на Слика 2.2.



Слика 2.2. Фактори што влијаат на ефикасноста на атсорпцијата.

Техники на атсорпција

Процесот на атсорпција на боја на цврсти атсорбенти од различни типови може да се спроведе со употреба на статички метод (*серискиметод*) и динамичен, исто таканаречен метод на колона (*динамичен метод*). Споредба на горенаведените методи е прикажана во Табела 2.3. За време на сорпцијата во статичен систем, се воспоставува одредена рамнотежа помеѓу атсорбатот во цврстата фаза и во растворот. Оваа рамнотежа е во согласност со равенките за дејство на масата или равенките на изотермната атсорпција на Фројндлих и Лангмур или сродни односи. Процесот на атсорпција во колоновиден систем вклучува пропуштање на раствор што ги содржи загадувачите (атсорбат) низ колона исполнета со атсорпциски материјал (атсорбент), каде што загадувачите се задржуваат на површината или во порите на овој материјал. Во техниката на колона, се користат три основни методи за одвојување на супстанциите од интерес: фронтниот метод, методот на елуирање и методот на поместување.

Табела 2.3. Споредба на статичкиот и динамичкиот метод (Patel, 2022; Pathirana et al., 2022; Sazali et al., 2020; Tien, 2019).

Принцип методи	Статичен метод	Динамички метод
	Вклучува контактирање на атсорбентот со раствор или гас што го содржи атсорбатот под услови на мирување (без проток).	Вклучува континуирано поминување на раствор или гас што го содржи атсорбатот низ слој на атсорбент.
Постапка	Позната количина на атсорбент и раствор со специфична концентрација на супстанцијата се внесуваат во сад (на пр., колба, шишенце) за да се доведат фазите во контакт. Системот се остава на константна температура соодветно време додека не се постигне рамнотежа на атсорпција. Типично, содржината на реакционите садови се меша за да се забрза реакцијата, на пр., со помош на механичка тресење. По одредено време, фазите се одделуваат со филтрација. Конечната концентрација на атсорбатот во растворот потоа се одредува со помош на аналитички или физичко-хемиски методи. Количината на атсорбирана супстанција се пресметува од разликата во концентрациите пред и по атсорпцијата. Односот помеѓу концентрацијата на атсорбираната супстанција и времето на контакт на фазите или нејзината концентрација во растворот во рамнотежа потоа е графички претставен.	Атсорбентот се става во колона, а раствор (или гас) што содржи позната концентрација на атсорбат се пропушта со одредена брзина низ стационарен слој од цврст атсорбент. За време на процесот, се следи концентрацијата на супстанцијата на излезот од колоната (позната како крива на пробив), одредувајќи ја нејзината концентрација во собраниот отпаден канал. Откако ќе се достигне точката на пробив на колоната, процесот не се прекинува, туку продолжува сè додека концентрацијата на атсорбат во отпадниот канал не ја достигне својата почетна концентрација (концентрацијата на растворот што влегува во колоната). Изедначувањето на концентрациите означува целосно исцрпување на капацитетот на атсорбентот. Врз основа на промените во концентрацијата на отпадниот канал, се пресметуваат количината на атсорбирана супстанција и ефикасноста на слојот.
Контрола на процесот	Помалку контролирана размена на маса.	Подобра контрола врз протокот и преносот на маса.

Скала	Лабораториски тестови. Мали примероци.	Индустриски процеси. Поголеми количини.
Апликација-вана	Студии за кинетика на адсорпција и изотерми. ПРЕЛИМИНАРНА ПРОЦЕНКА НА АДсорПЦИСКИОТ КАПАЦИТЕТ НА РАЗЛИЧНИ АДсорБЕНТИ И МЕХАНИЗМОТ НА адсорПЦИЈА.	Одредување на капацитетот на адсорбентот, кривите на пробив и условите за работа на креветот. Симулација и дизајн на индустриски процеси.
Времетраење	Одредено време на контакт, на пр. 24 часа.	Континуиран процес, времетраењето зависи од брзината на проток.
Цена и опрема	Едноставен, ефтин апарат (колби, тресалка).	Посложена опрема (адсорпциски колони, пумпи, детектори).
Дијаграм		

Примена на адсорпција

Адсорпцијата моментално е широко користена во многу области (Ahmed Alsharif, 2025; Dąbrowski, 2001; Suprakas et al., 2020), вклучувајќи:

- **заштита на животната средина:** процеси на третман на вода, отпадни води и прочистување на воздухот, контрола на индустриски емисии - намалување на штетни гасови, на пр. SO_2 , CO_2 во издувните гасови, на пр. каталитички конвертори на издувни гасови од автомобили,
- **хемиска и технолошка индустрија:** катализа – катализатори за хемиски реакции, на пр. естерификација, хидратација, кондензација или катализаторски носачи – порозни тела со развиена површина (на пр. Al_2O_3 , SiO_2), одвојување и прочистување на супстанции – на пр. адсорпциска хроматографија, обновување на вредни метали, на пр. во хидрометалургија на скапоцени метали, одвојување на силни киселини од нивните соли, NaCl од HCl , FeCl_2 од HCl , одвојување на азот од воздух во концентратори на кислород, сушење на гасови и течности, на пр. силика гел, молекуларни сита, концентриран H_2SO_4 ,
- **медицина и фармација:** труење - отстранување на токсини од гастроинтестиналниот тракт, хемоперфузија - отстранување на токсини од крвта со употреба на адсорбенти, контролирано ослободување на лекови, прочистување со антибиотици,
- **прехранбена и козметичка индустрија:** отстранување на бои и нечистотии – на пр. обезбојување на шеќер, јадливи масла, обезбојување и стабилизација на сокови, отстранување на непожелни супстанции од растителни екстракти, млечни производи: за контрола на содржината на јони на калциум и натриум, вино: за обезкиселување на вина,

стабилизација на производи со употреба на адсорбенти како средства против стврднување, на пр. козметика, апсорбирачи на влага, чистење на кожа, на пр. маски за адсорпција и пилинзи (адсорпција на себум, тешки метали, токсини итн.), отстранување на мириси, контрола на pH вредноста,

- **специјализирани апликации:** адсорпциски топлински пумпи и фрижидери – користење на феноменот на адсорпција за размена на топлина, складирање на гасови во порозни материјали, на пр. водород, метан, гас-маски и филтри – адсорпција на токсични супстанции и мириси.

Експериментален дел

Целта на вежбата

Целта на експериментот е да се изврши адсорпциско отстранување на токсичната боја основна жолта 2 од воден раствор со употреба на полимерен адсорбент со додавање на полилигнин (EGDMA-co-VA-co-LIG) и да се одреди нејзиниот сорпциски капацитет во однос на горенаведената боја.

Опрема

Сад за мерење

Шпатула

Штрцалка

Волуметриски колби, 25 – 250 mL

Мензура, 25 mL

Конусни колби со силиконски затвораи, 100 mL

Градуирани чаши, 10 – 100 mL

Автоматски пипети за мерење со променлив волумен, 0,01 mL – 25 mL

Инки

Филтри

Епрувети

Држач за епрувети

Кварцни кивети

Аналитичка вага

pH метар

Механичка тресалка

УВ-визуелен спектрофотометар

Реагенси

Основна жолта 2

1 M NaOH раствор

1 M HCl раствор

Дестилирана вода

Изведуваче на вежбата

Подготовка на основен раствор од жолта 2 и работни раствори

Во мензура, измерете 1250 mg основна жолта 2 со помош на аналитичка вага. Потоа квантитативно префрлете ја бојата во волуметриска колба од 250 mL и подгответе го нејзиниот раствор во дестилирана вода за да се добие концентрација на боја од 5000 mg/L. Од основниот раствор на основната жолта 2, користете волуметриски пипети за да издвоите соодветни количини на боја во волуметриски колби од 25 mL. Концентрацијата на основната жолта 2 во работните раствори (C_0) треба да биде 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 mg/L. Користејќи pH-метар, прилагодете ја pH вредноста на работните раствори на основната жолта 2 на вредност во опсег од 8-9. Дополнете до ознаката со дестилирана вода и добро измешајте.

Мерење на полимерни адсорбенти со додаден лигнин

во конусна колба, измерете 0,02 g адсорбент користејќи аналитичка вага. Подгответе 11 измерени порции адсорбент.

Адсорпција на основна жолта 2 со статички метод

Додадете 20 mL раствори од основна жолта 2 со концентрации од 10 до 1000 mg/L, мерени со градуирана мензура, во конусни колби што содржат 0,02 g адсорбент. Цврсто затворете ги колбите со силиконски затвораи и ставете ги на механичка тресалка што ротира со 150 циклуси/мин. Протресете ја содржината на колбата 24 часа на собна температура. По истекот на одреденото време, одделете ги растворите за боја од адсорбентот со филтрација. Зачувајте ги растворите за боја по процесот на сорпција за спектрофотометриски определувања.

Извршете тестови за адсорпција на боја на сличен начин на референтен материјал, т.е. кополимер без лигнин.

Одредување на концентрацијата на основна жолта 2 со спектрофотометриски метод

Концентрацијата на боја во растворите по процесот на сорпција (C_e) беше измерена спектрофотометриски. Мерењата на апсорпцијата (Abs) беа направени во однос на водата, која служеше како референца, во кварцни кивети со дијаметар од 1 cm, при максимална бранова должина од 431 nm. Содржината на боја беше одредена од стандардната крива преку равенка со утврдување на врската помеѓу апсорпцијата и концентрацијата на боја под услови на мерење при максимална бранова должина. Согласно равенката од стандардната крива како што следи: $Abs = 0,1222 \cdot C_e + 0,014$. По процесот на сорпција, растворите на основната жолта 2 беа соодветно разредени во волуметриски колби од 10 mL, земајќи го предвид опсегот на анализа од 1 до 20 mg/L. Извршете мерења на апсорпцијата двапати и пресметајте ја средната вредност на апсорпцијата. Определете ја концентрацијата на основната жолта 2 во растворите по процесот на сорпција (C_e) со трансформирање на формулата на калибрациската крива и земајќи го предвид разредувањето на примерокот.

Интерпретација на резултатите

Врз основа на добиените податоци, пресметајте го сорпцискиот капацитет на атсорбентот (q_e , mg/g) со додавање на лигнин, поли(EGDMA-co-VA-co-LIG), во однос на базната жолта 2, користејќи ја следната формула:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \cdot V$$

каде што: C_0 , C_e – концентрација на боја пред и по процесот на сорпција во водната фаза (mg/L), V – волумен на растворот (L), m – маса на атсорбентот (g).

Да се прикаже q_e во однос на C_e за поли(EGDMA-co-VA-co-LIG) на графиконот. Оценете го тестираниот атсорбент во однос на неговата ефикасност и применливост за горенаведената цел и споредете ја неговата ефикасност со референтен атсорбент без лигнин и други атсорбенти што содржат лигнин, врз основа на преглед на литературата.

Литература

Adamczak, M., Bednarski, W., Fiedurek, J., Gawroński, R., Leman, J., Szewczyk, K.W. (2017). Podstawy biotechnologii przemysłowej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Ahmed Alsharif, M. (2025). Understanding adsorption: theories, techniques, and applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1008865>.

Aljamali, N.M., Aldujaili, R.A.B., Alfatlawi, I.O. (2021). Physical and chemical adsorption and its applications. IJTCK. 7, 1-8. <https://doi.org/10.37628/IJTCK>.

Bieleński A. (2013). Podstawy chemii nieorganicznej. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Chua, H.T, Ng, K.C., Chakraborty, A., Oo, N.M, Othman, M.A. (2002). Adsorption characteristics of silica gel + water systems. J. Chem. Eng. Data. 47, 1177-1181.

Dąbrowski, A. (2001). Adsorption – from theory to practice. Adv. Coll. Interf. Sci. 93, 135-224, [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8).

Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S.K., Gupta, A.K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review. Mater. Adv. 2, 4497-4531. <https://doi.org/10.1039/D1MA00354B>.

Florjańczyk, Z., Penczek, S. (1997). Chemia polimerów, T. I, II, III. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

Nguyen, D.T.C, Jalil, Nguyen, A.A.L.M., Nguyen, D.H. (2025). A comprehensive review on the adsorption of dyes onto activated carbons derived from harmful invasive plants. *Environ. Res.* 279, Part 2, 121807. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121807>.

Odian, G. (2004). *Principles of polymerization*. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

Patel, H. (2022). Comparison of batch and fixed bed column adsorption: a critical review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 10409–10426. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03492-y>.

Pathirana C., Ziyath A.M., Egodawatta P., Bandara N.J.G.J., Jinadasa K.B.S.N., Bandala E.R., Wijesiri B, Goonetilleke A. (2022). Biosorption of heavy metals: transferability between batch and column studies. *Chemosphere* 294, 133659. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133659>.

Rabek, J.F. (2008). *Współczesna wiedza o polimerach*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.

Saleh, T.A. (2022). Chapter 2 - Adsorption technology and surface science. *Int. Sci. Technol.* 34, 39-64. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849876-7.00006-3>.

Sazali, N., Harun, Z., Sazali, N. (2020). A review on batch and column adsorption of various adsorbent towards the removal of heavy metal. *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.* 67, 66-88.

Suprakas, S.R., Rashi, G., Kumar, N. (2020). Chapter 4 - Adsorption in the context of water purification, in: Suprakas, S.R., Rashi, G., Kumar N. (Eds.), in: *Micro and nano technologies, carbon nanomaterial-based adsorbents for water purification*, Elsevier, pp. 67-100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821959-1.00004-0>.

Tien, Ch. (2019). Chapter 1 - Introduction, in: Tien, Ch. (Ed.), *Introduction to adsorption, basics, analysis, and applications*, Elsevier, pp. 1-6.

Zamljen, A., Lavrič, Ž., Prašnikar, A., Teržan, J., Grilc, M., Meden, A., Likozar, B. (2024). Understanding platinum-based H₂ adsorption/desorption kinetics during catalytic hydrogenation or hydrogen storage-related reactions. *Renew. Energy*. 226, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120467>.

Zarzycki, R., Chacuk, A., Coulson, J.M. (2013). *Absorption*. Pergamon press, e-book.