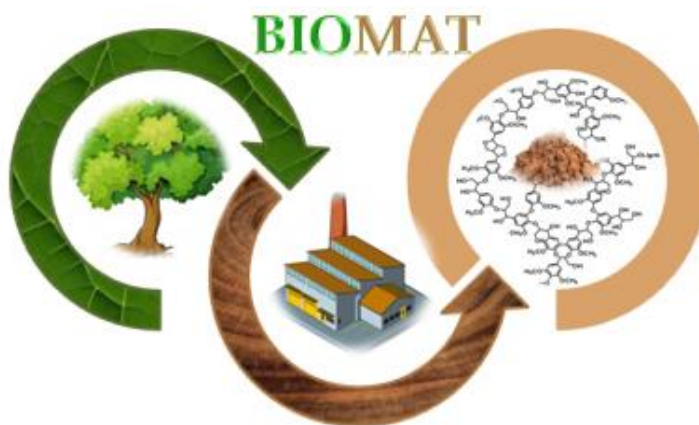


MARIA CURIE-SKŁODOWSKA UNIVERSITETET I LUBLIN, POLEN



Del 2

Utvinning av polymermaterial med tillsats av lignin samt testning och utvärdering av deras egenskaper

av

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

Lublin 2025

Detta laboratorieskript har skapats
inom ramen för projektet med titeln

*"Förbättra undervisningskompetenser i design av nästa generationers
biomaterial från träavfall "*

Projektnummer: 2024-1-PL01-KA220-HED-000246133

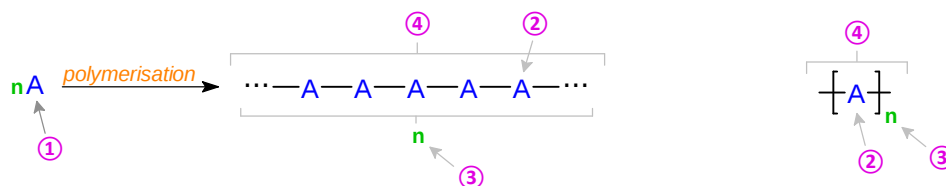
Erasmus+-programmet:

KA220-HED – Samarbetspartnerskap inom högre utbildning.

1. Syntes av polymermikrosfärer med tillsatt av lignin genom suspensionspolymerisation

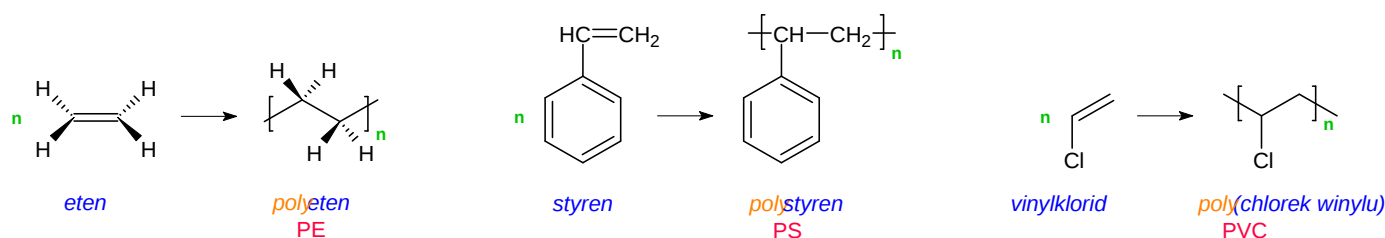
Introduktion

Polymerer (grekiska *poly* = "många", grekiska *meros* = "delar") är en grupp makromolekylära föreningar vars molekyler består av upprepade element (enheter) som kallas merer, bundna tillsammans i tillräckligt antal för att ha egenskaper som inte förändras signifikant till följd av tillsats eller borttagning av en eller flera merer. Polymermakromolekyler kan bildas genom sammanfogning (polymerisation) av ett stort antal molekyler som kallas monomerer. Antalet merer som finns i en makromolekyl är den så kallade polymerisationsgraden (Figur 1.1).



Figur 1.1. Schema för bildning och struktur av polymera makromolekyler: ① monomer, ② mer, ③ polymerisationsgrad, ④ polymermakromolekyl.

Exempel på de mest populära polymererna som används i stor utsträckning är polyeten, polystyren och polyvinylklorid (Figur 1.2).



Figur 1.2. Kemiska formler för monomerer och fragment av makromolekylära strukturer för polyeten, polystyren och poly (vinylklorid).

Förutom termen *mer* eller *strukturell enhet* kan man även hitta termerna konstitutionell, *upprepande* eller *monomer enhet* (Florjańczyk, Penczek, 1997).

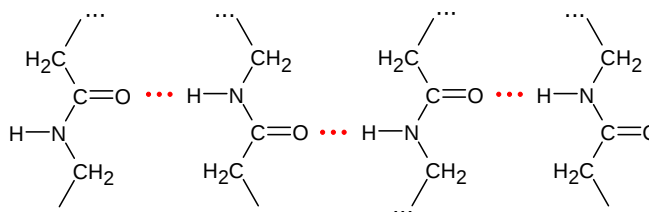
Oligomerer är makromolekyler som innehåller från 1000 till 10 000 merer. Polymermakromolekyler består av många tusen atomer sammankopplade med bindningar av första ordningen (främst kovalenta) med dissociationsenergies på 10^6 – 10^6 J/mol.

Fysiska interaktioner som kallas andra ordningens bindningar uppstår mellan kedjorna i samma makromolekyl och intilliggande makromolekyler. Dessa interaktioner, klassificerade som van der Waals -krafter, kännetecknas av dissociationsenergies i storleksordningen 10^2 – 10^3 J/mol, vilket är betydligt lägre än energin hos kovalenta bindningar i makromolekyler.

När det gäller polymerer spelar följande interaktioner en särskilt viktig roll:

- permanent dipol – permanent dipol,
- permanent dipol – inducerad dipol,
- inducerad dipol – inducerad dipol,
- spridningskrafter.

Andra ordningens bindningar inkluderar även vätebindningar med dissociationsenergies i storleksordningen 10^2 – 10^4 J/mol. Dessa bindningar spelar en viktig roll i många polymerer, inklusive polyamider (Figur 1.3).



Figur 1.3. Strukturen hos ett polyamidfragment stabiliserad genom närvaron av vätebindningar.

Andra ordningens bindningar bestämmer också kohesionen mellan polymermakromolekyler och har därför en betydande inverkan på polymerers mekaniska egenskaper (Rabek, 2008).

Polymersyntesmetoder

Det finns många metoder för att framställa polymerer. De viktigaste och mest använda inkluderar (Odian, 2004): bulkpolymerisation, lösningspolymerisation, suspensionspolymerisation och emulsionspolymerisation (Tabell 1.1).

Bulkpolymerisation (i ett block) har relativt begränsade industriella tillämpningar. Denna process sker i en ren flytande monomer, utan tillsats av lösningsmedel. Denna typ av polymerisation initieras oftast med hjälp av initiatörer, dvs. ämnen som sönderfaller under specifika förhållanden (t.ex. förhöjd temperatur eller UV-strålning) till reaktiva molekyler (t.ex. radikaler). Processen resulterar i ett enhetligt

polymerblock som behåller formen på kärlet i vilket reaktionen utfördes. Bulkpolymerisation kan utföras i följande system:

- homogen – när monomeren och den resulterande polymeren upplöses i varandra,
- heterogen – när den resulterande polymeren utfälls i reaktionsmediet.

En variant av bulkpolymerisation är blockutfällningspolymerisation, under vilken den resulterande polymeren inte löses upp i monomeren och fälls ut som en fällning.

Lösningsspolymerisation innebär att monomeren späds ut med ett lämpligt lösningsmedel eller en lösningsmedelsblandning. Lösningsspolymerisation kan utföras på två sätt:

- när det använda lösningsmedlet löser upp både monomeren och polymeren (*lackmetoden*),
- när det använda lösningsmedlet endast löser upp monomeren.

De viktigaste fördelarna med denna polymerisationsmetod är:

- möjligheten att erhålla polymerer med en relativt snäv molekylviktsfördelning,
- möjligheten att direkt använda polymerlösningar för produktion av fibrer, lacker och lim,
- förmågan att kontrollera systemets temperatur, särskilt vid mycket exoterma reaktioner.

Suspensionspolymerisation (även känd som *pärllpolymerisation* eller *suspensionspolymerisation*) initieras av en initiator löst i en monomer dispergerad i en vattenlösning av organiska kolloider eller en vattensuspension av oorganiska salter. Dessa stabilisatorer (fixeringsmedel) binder suspensionen, förhindrar agglomerering av suspensionspartiklar och påverkar storleken på de resulterande "pärlorna". Denna polymerisation fortskrider enligt en mekanism som är typisk för bulkpolymerisation, med skillnaden att i detta fall bildar varje droppe av dispergerad monomer ett "mikroblook".

Faktorer som påverkar suspensionspolymerisationens förlopp och den resulterande polymerens egenskaper inkluderar: typ/mängd polymerisationsinitiator, typ/mängd suspensionsstabilisator, systemets blandning och miljöns pH.

Några av de vanligaste initiatorerna är bensoylperoxid (BPO) och azobisisobutyronitril (AIBN). Att öka initiatorkoncentrationen i systemet förkortar polymerisationstiden men minskar också produktens porositet. Överdriven förkortning av polymerkedjelängderna kan bero på alltför höga polymerisationstemperaturer.

Mycket ofta används, utöver den huvudsakliga suspensionsstabilisatorn, tillsatser för att modifiera dess prestanda eller kompensera för eventuella brister. Dessa tillsatser kallas hjälpsuspensionsstabilisatorer. Den viktigaste egenskapen hos den huvudsakliga skyddande kolloiden måste vara dess löslighet eller vätkbarhet i vatten, medan hjälpstabilisatorn bör lösas upp bättre i monomeren. De vanligaste skyddande kolloiderna inkluderar: poly(vinylalkohol), cellulosa och dess derivat, derivat: hydroxyetylcellulosa, metylcellulosa, karboximetylcellulosa och modifierad stärkelse, gelatin, agar, pektiner, etc. Den skyddande kolloiden bildar ett tunt lager runt monomerdropparna, varigenom suspensionen stabiliseras mekaniskt och elektrostatiskt, vilket förhindrar koalescens av den dispergerade fasen.

För att erhålla porösa polymerer måste ett lämpligt lösningsmedelssystem, vanligtvis ett tvåkomponentssystem, användas. Det ena lösningsmedlet är ett bra lösningsmedel för polymeren, medan det andra är ett icke-lösningsmedel. Strukturen och porvolymen hos den slutliga sampolymeren beror på dess typ och volymförhållande till monomeren. Efter polymerisationen avlägsnas det tomrumsfyllande lösningsmedlet genom extraktion med en serie lösningsmedel, såsom aceton, metanol och toluen.

Emulsionspolymerisation – i denna metod dispergeras monomeren i vatten med hjälp av ett emulgeringsmedel, vanligtvis ett syntetiskt tvättmedel. Tvättmedlet bildar fina miceller som innehåller en liten del av monomeren, medan resten suspenderas i vattnet utan hjälp av ett tensid. Emulsionspolymerisation sker huvudsakligen inom kluster av tensider. Monomererna som används för denna typ av polymerisation måste vara mycket rena och inhibitorfria. Följande hjälpmedel används i denna metod:

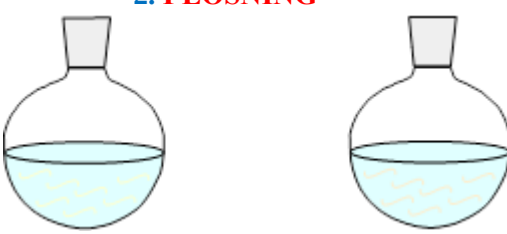
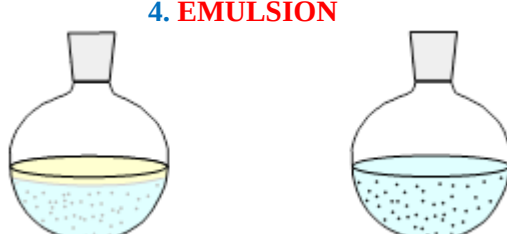
- emulgeringsmedel,
- stabilisatorer emulsion,
- ämnen reglerande,
- initiatorer (H_2O_2 , kumenhydroperoxid, persulfater, redoxsystem).

Emulgeringsmedel är yttaktiva föreningar som möjliggör bildandet av en stabil emulsion av en monomer i vatten. De flesta av dem består av en hydrofil del och en hydrofob (alkyl) del. Emulgeringsmedel som används vid emulsionspolymerisation inkluderar: glycerolestrar av fettsyror, kvaternära ammoniumsalter, pyridiniumsalter, fosfoniumsalter, fettsyrasalter, alkylsulfater och alkylsulfater.

Buffertsubstanser (sura kolsyrasalter, acetater, fosfater) tillsätts ofta till reaktionsblandningen. Detta för att upprätthålla ett konstant pH-värde, eftersom det påverkar emulsionsstabilitet och polymerisationskinetik. Emulsionspolymerisation producerar polymeremulsioner avsedda för produktion av lim, emulsionsfärger och impregneringsmedel. Vid emulsionspolymerisation minskar inte ökning av reaktionshastigheten polymerisationsgraden signifikant, till skillnad från vid bulkpolymerisation. Produkterna som erhålls från denna reaktion har höga molekylvikter. På grund av de ovan nämnda fördelarna används denna metod i stor skala inom industrin.

De huvudsakliga processerna som utförs med denna metod i industriell skala inkluderar: polymerisation av vinylacetat, vinylklorid, isopren och akrylsyrastrar.

Tabell 1.1. Egenskaper hos valda polymerisationstekniker.

Före polymerisation	Teknik polymerisation	Efter polymerisation
<u>Initiativtagare</u> upplöst i <u>monomeren</u> .	1. I MASSA 	<u>Polymer</u> i form av ett enhetligt block.
<u>Initiator</u> , <u>monomer</u> och <u>yttaktivt</u> medel i lösning.	2. I LÖSNING 	<u>Polymer</u> upplöst i lösning.
<u>Initiator</u> löst i monomer. <u>Monomer</u> i suspensionsform. <u>Surfa k</u> <u>tant w</u> fas kontinuerlig.	3. SUSPENSION 	<u>Polymer</u> i sfärisk form (mikrosfärer).
<u>Initiatorn</u> löstes i den kontinuerliga fasen. <u>Monomer</u> som separat fas som bildar miceller. Tensid i miceller och i kontinuerlig fas.	4. EMULSION 	<u>Polymer</u> i sfärisk form (mikrosfärer).

Experimentell del

Syftet med övningen

Syftet med övningen är att syntetisera lignininnehållande polymermikrosfärer med hjälp av suspensionspolymerisationsteknik.

Utrustning

Rundbottnad kolv trehalsad, 250 ml
Mekanisk omrörare
Vattenmantel-återflödeskondensor
Termometer
Bägare, 50 ml
Glasbaguette
Glastratt
Värmemantel med spänningsregulator
Vakuumtryckfiltreringskit
Petriskål
Optiskt mikroskop
Vågen

Reagenser

Etylenglykoldimetakrylat (EGDMA)
Vinylacetat (VA)
Azobisisobutyronitril (AIBN)
Kraftlignin (LIG)
Bensylalkohol (BA)
Polyvinylalkohol (PVA)
Destillerat vatten

Förfarande

Förbered reaktionsmiljön

Tillsätt 150 ml vatten till en trehalsad rundbottnad kolv. Förse kolven med en vattenmantlad återflödeskylare, en termometer och en mekanisk omrörare. Värm vattnet till 80 °C under omrörning och tillsätt sedan 1 g PVA. Håll temperaturen vid 80 °C och rör om kontinuerligt tills PVA:n är helt upplöst.

Förberedelse av reaktionsblandningen

I en 50 ml bägare, bered en blandning av 0.43 g lignin och 10 ml bensylalkohol. Värm innehållet i bägaren till 60 °C och svalna sedan till rumstemperatur. Tillsätt 10 g EGDMA och 4.3 g vinylacetat (VA) till ligninlösningen och blanda noggrant (relativt molförhållande monomerer = 1:1). Omedelbart innan polymerisationen påbörjas, tillsätt 0.143 g AIBN (1 viktprocent) till reaktionsblandningen i bägaren i förhållande till den totala massan av monomerer).

Polymerisation

Efter att initiatorsn har löst sig helt i reaktionsblandningen, håll innehållet i bägaren i rundbottenadskolven med den mekaniska omröraren igång kontinuerligt. Håll temperaturen vid 80 °C och konstant omrörarhastighet och polymerisera systemet i 2 timmar.

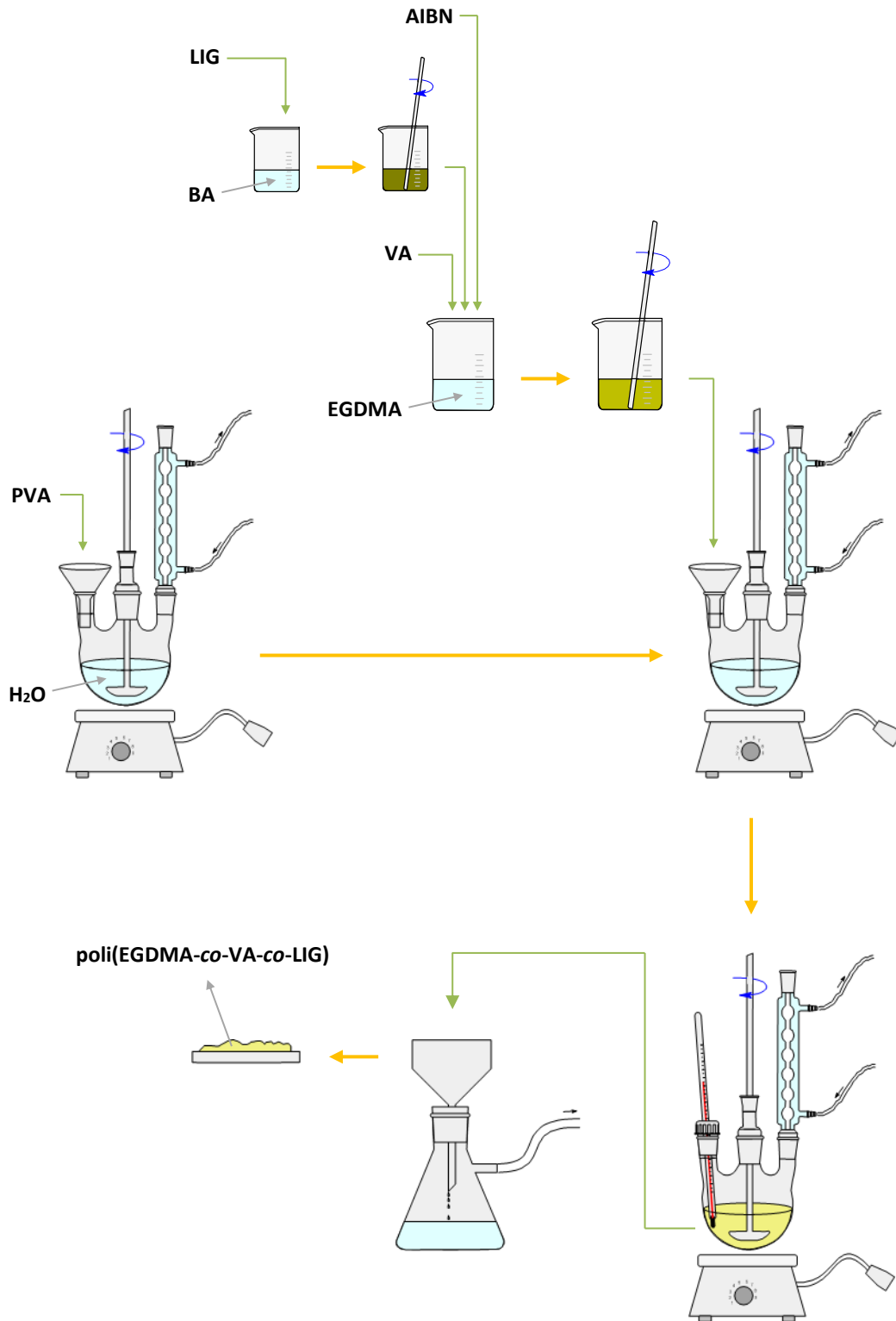
Produktisolering

Efter att polymerisationen är avslutad, filtrera suspensionen som erhållits i rundbottenadskolv under reducerat tryck och tvätta de polymermikrosfärer som finns kvar på filtret noggrant med varmt vatten (tills skummet i filtratet försvinner). Överför den erhållna polymeren, dvs. poly(EGDMA-*co*-VA-*co*-LIG), till en petriskål, torka och väg.

Ett diagram över laboratorieproceduren för syntes av lignininnehållande polymermikrosfärer visas i Figur 1.4.

Tolkning av resultat

- Beräkna reaktionsutbytet.
- Utvärdera morfologin (t.ex. form, diameter) hos de erhållna poly (EGDMA-*co*-VA-*co*-LIG) mikrosfärerna baserat på mikroskopisk observation av provet.
- Valfritt: registrera spektrumet för poly(EGDMA-*co*-VA-*co*-LIG) med Fouriertransform infrarödspektroskopi (FTIR) och analysera det.
- Undersök sorptionsegenskaperna hos poly(EGDMA-*co*-VA-*co*-LIG).
- För att bedöma effekten av närvaron av lignin på utvalda egenskaper hos den erhållna produkten (inklusive sorptionsegenskaper) bör de jämföras med egenskaperna hos ett referensmaterial, dvs. en ligninfri sampolymer som erhållits i en laboratorieprocedur identisk med den som beskrivs förutom användningen av lignin.



Figur 1.4. Schematiskt diagram över laborierproceduren för syntes av lignininnehållande polymermikrosfärer.

2. Användning av lignininnehållande polymermikrosfärer för att avlägsna giftiga färgämnen genom adsorption

Introduktion

Ett betydande antal fysikaliska och kemiska processer sker i gränssnittet mellan faser som kommer i kontakt, såsom fasta och flytande faser. Att förstå dessa fenomen är avgörande för att förklara mekanismerna bakom många reaktioner och tekniska processer.

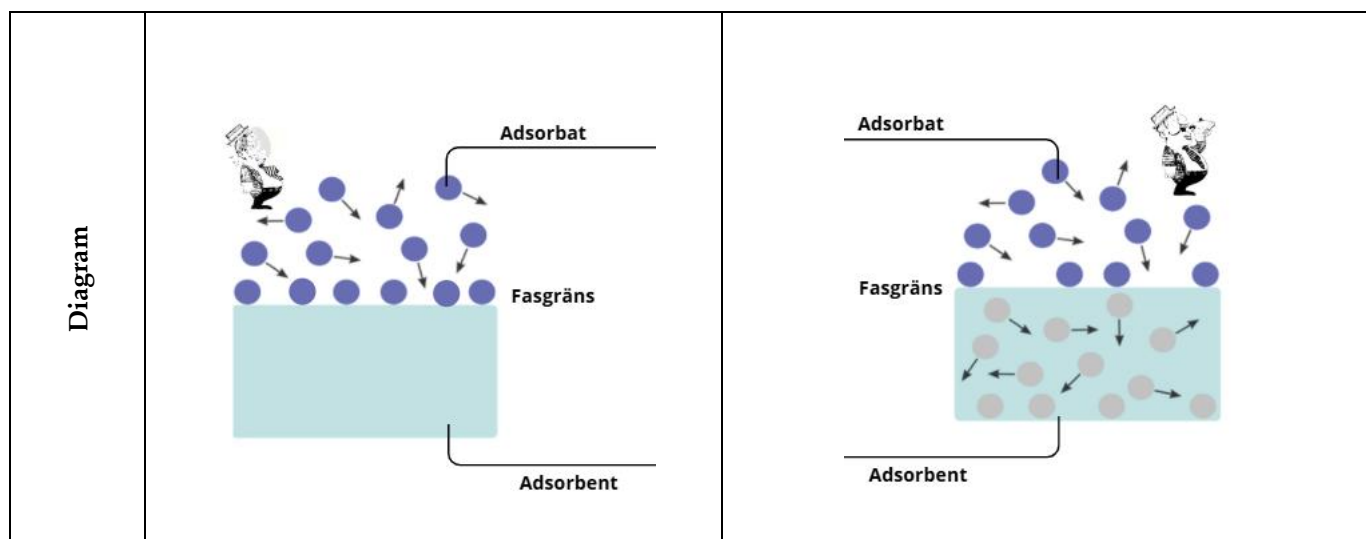
Adsorption är processen där ämnen (molekyler, atomer eller joner) ansamlas vid ett gränssnitt eller en yta, vilket leder till en förändring i ämnets koncentration vid gränsen mellan två faser (Saleh, 2022). **Adsorption kan ske vid olika fasgränser:** fast ämne–gas; fast ämne–vätska; vätska–vätska; vätska–gas (Bielański, 2013). Ämnet på vilket föreningar adsorberar kallas **adsorbent** och det adsorberande ämnet kallas **adsorbat** (Tien, 2019).

Adsorption och absorption

På grund av stavningslikheten används termerna adsorption och absorption ofta synonymt av icke-expert. **Adsorption** bör dock inte förväxlas med **absorption**, eftersom det finns betydande skillnader mellan dem (Tabell 2.1).

Tabell 2.1. Jämförelse av adsorption och absorption (Chua et al., 2002; Nguyen et al., 2025; Tien, 2019; Zamljen et al., 2024; Zarzycki et al., 2013).

Sorption	Adsorption	Absorption
	ansamling av ämnen på ytan av en annan fas	absorption av ett ämne till en annan fas
Exempel	- adsorption av färgämnen på ytan av aktivt kol (rening av lösningar) - adsorption av vattenånga med kiselgel (förpackade torkmedel) - absorption av gaser med aktivt kol (gasmasker) - väteadsorption på platinaytan i hydreringsreaktioner (heterogen katalys)	- upplösning av gaser i vätskor (livsmedelsindustrin, t.ex. CO₂ i vatten) - absorption av vatten av svampen (vätskan penetrerar det porösa materialet) - absorption av syre av hemoglobin i blodet (medicin) - absorption av vattenånga genom: hygroskopiska salter, t.ex. CaCl₂ (leverans), koncentrerade syror, t.ex. H₂SO₄ eller baser, t.ex. NaOH (kemiska processer som kräver vattenfria förhållanden, torkning av luft och tekniska gaser, lagring av fukt känsliga produkter)



Till skillnad från adsorption, som sker på en yta, innebär absorption absorption av adsorbatpartiklar av hela volymen av en vätska eller ett fast ämne (Bieleński, 2013). Gasabsorption är en process där en gasformig blandning bringas i kontakt med en vätska för att lösa upp en eller flera av blandningens komponenter i vätskan. Absorption är därför ett volymetriskt fenomen, och separationsgraden begränsas av de inblandade gasernas löslighet. När det är svårt att avgöra vilket av de två fenomenen som behandlas, refererar vi kort till det som **sorption** (Tien, 2019; Zarzycki et al., 2013). Adsorption spelar den viktigaste rollen inom analytisk kemi, där adsorbenten är ett fast ämne och adsorbatet är ett ämne löst i lösningen.

Typer av adsorption

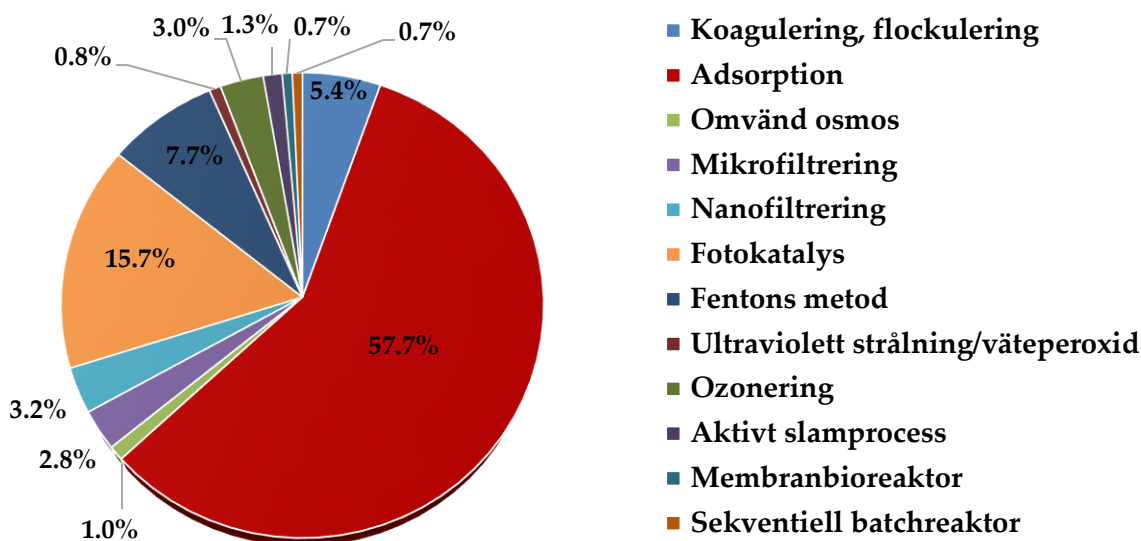
Beroende på typen av interaktioner mellan molekylerna i den adsorberade kroppen (adsorbat) och ytan på den adsorberande kroppen (adsorbent) skiljer vi mellan **fysisk adsorption** (*fysisorption*), och **kemisk adsorption** (från engelska: *kemisorption*) (Tabell 2.2).

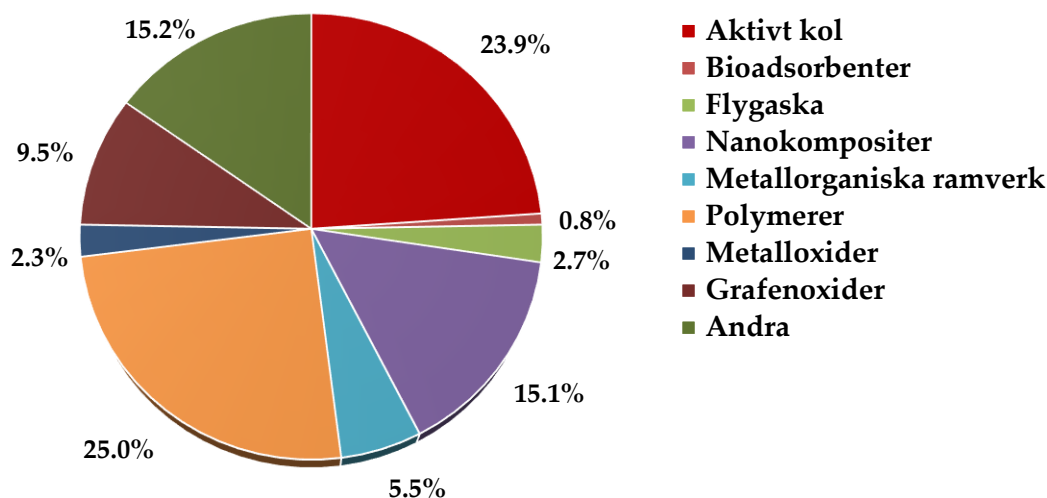
Adsorption vid gränssnittet mellan fast lösning

Adsorption vid gränssnittet mellan fast ämne och lösning är en mer komplex process jämfört med gasadsorption. I detta fall adsorberas både lösta ämnen och lösningsmedelsmolekyler. När koncentrationerna ändras förskjuter lösningskomponenterna varandra från ytskiktet, vilket är det mest karakteristiska kännetecknet för adsorptionsprocessen från lösningar. Adsorptionens storlek bestäms av både interaktionen mellan adsorbenten och var och en av lösningskomponenterna och interaktionen mellan lösningskomponentmolekylerna. Ett löst ämne adsorberar starkare ju mindre lösligt det är i ett givet lösningsmedel. Mängden adsorberat lösningsmedel beror också på dess förmåga att väta adsorbenten. Till exempel väter vatten inte aktivt kol bra, och därför adsorberar aktivt kol främst det lösta ämnet från en vattenlösning. Adsorptionen av svaga elektrolyter liknar den för icke-elektrolyter. Vid

adsorption av starka elektrolyter spelar fenomen relaterade till interaktionen mellan jonernas elektriska laddningar en betydande roll. Endast joner med samma tecken adsorberar på ytan av ett fast ämne, vilket orsakar en ansamling av elektrisk laddning på den adsorberande ytan, vilket bryter mot principen om elektroneutralitet. Systemet tenderar därför att spontant kompensera för denna laddning. Detta kan uppnås på två sätt. En möjlighet är ansamling av joner med motsatt tecken (t.ex. negativa) på lagret av adsorberade joner (dvs. positiva). Denna typ av adsorption kallas *specifik adsorption*. Den andra metoden är att adsorbenten frigör en motsvarande mängd andra joner av samma typ i lösningen. Denna typ av adsorption, kallad jonbytesadsorption, sker på *vanligt förekommande naturliga och syntetiska zeoliter eller syntetiska organiska hartser*, så kallade **jonbytesthartser** (Bielański, 2013).

Adsorptionsbegreppet är relaterat till adsorptionskapacitet. **Adsorptionskapacitet** är mängden av ett ämne som adsorberas per massenhet eller volymenhet adsorbent under specifika förhållanden, vanligtvis uttryckt i mg adsorbat per g adsorbent (mg/g) eller i volymetriska enheter, t.ex. g/cm³ eller mol/L. Detta värde återspeglar adsorbentens förmåga att binda förorenande molekyler från vätskefasen (eller gasfasen) och är en av de grundläggande parametrarna som kännetecknar adsorbentens effektivitet. Det mäts vanligtvis under jämviktsförhållanden (s.k. jämviktskapacitet) eller vid en specificerad faskontaktid (momentan kapacitet). Adsorption i ett fast-vätskesystem är en av de mest använda processerna för separation och avlägsnande av miljöföroreningar, inklusive organiska ämnen, t.ex. färgämnen, från vattenlösningar och avloppsvatten, på grund av dess effektivitet, inte bara på grund av dess fördelar, utan också på grund av det breda utbudet av tillgängliga adsorbenter av olika typer (aktivt kol, nanoadsorbenter, metalloxider, metallorganiska ramverk, polymerer och bioadsorbenter, etc., Figur 2.1., Dutta et al., 2021).



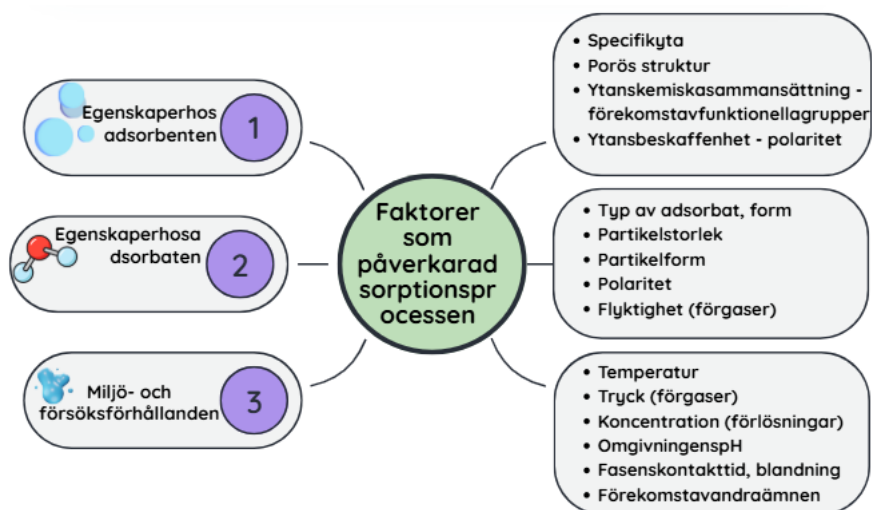


Figur 2.1. Den utbredda användningen av fysikalisk-kemiska och biologiska tekniker och särskilda typer av adsorbenter för att avlägsna färgämnen från vattenlösningar och avloppsvatten.

Processen är baserad på sorption av lösningskomponenter på en fast yta på grund av deras affinitet för den adsorberande ytan, vilket kan bero på deras hydrofoba natur. **Ett ämnes affinitet för en adsorberande yta** är ett mått på förmågan och styrkan med vilken adsorbatmolekyler interagerar och binder till den adsorberande ytan under adsorptionsprocessen. Ju högre affinitet, desto starkare och mer hållbar binder adsorbatet till ytan, vilket leder till effektivare substansretention. Sorptionseffektiviteten hos organiska ämnen beror också på deras löslighet i lösning – ju lägre föreningens löslighet är, desto bättre sorption, och lösligheten hos dessa föreningar beror i sin tur på kolvätekedjans längd – ju längre kolvätekedjan i molekylen är, desto lägre löslighet. Därför, ju längre kolvätekedjan är, desto högre sorptionseffektivitet (Adamczak et al., 2017).

Faktorer som påverkar adsorptionsprocessen

Adsorptionsprocessen och dess effektivitet bestäms av många faktorer relaterade till egenskaperna hos både adsorbenten och adsorbatet, såväl som de miljömässiga och experimentella förhållandena för processen och temperaturen (Aljamali et al., 2021). Enskilda faktorer som kan påverka adsorptionsprocessen visas i Figur 2.2.



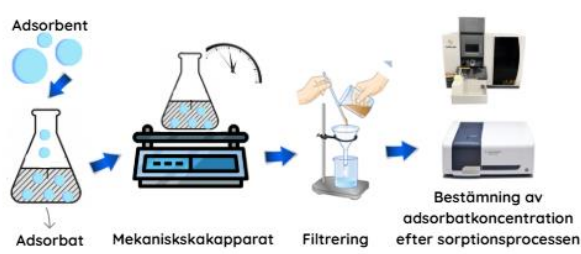
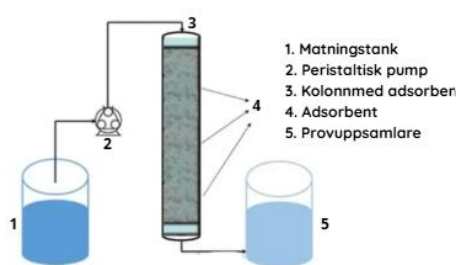
Figur 2.2. Faktorer som påverkar adsorptionseffektiviteten.

Adsorptionstekniker

Processen för färgämnesadsorption på fasta adsorbenter av olika typer kan utföras med hjälp av den statiska metoden (*batchmetoden*) och dynamisk, även kallad kolumnmetoden (*dynamisk metod*). En jämförelse av ovan nämnda metoder presenteras i Tabell 2.3.

Tabell 2.3. Jämförelse av statisk och dynamisk metod (Patel, 2022; Pathirana et al., 2022; Sazali et al., 2020; Tien, 2019).

Princip metoder	Statisk metod	Dynamisk metod
	Det innebär att adsorbenten bringas i kontakt med en lösning eller gas som innehåller adsorbaten under viloförhållanden (inget flöde).	Det innebär att en lösning eller gas som innehåller adsorbaten kontinuerligt passerar genom ett adsorbentskikt.
Förfarande	En känd mängd adsorbent och en lösning med en specifik koncentration av ämnet införs i ett kärl (t.ex. kolv, ampull) för att bringa faserna i kontakt. Systemet lämnas vid en konstant temperatur under lämplig tid tills adsorptionsjämvikt uppnås. Vanligtvis blandas innehållet i reaktionskärlen för att accelerera reaktionen, t.ex. med hjälp av en mekanisk skakapparat. Efter en viss tid separeras faserna genom filtrering. Den slutliga koncentrationen av adsorbaten i lösningen bestäms sedan med hjälp av analytiska eller fysikalisk-kemiska metoder. Mängden adsorberad substans beräknas utifrån skillnaden i koncentrationer före och efter adsorption. Sambandet mellan koncentrationen av den adsorberade substansen	Adsorbenten placeras i en kolumn, och en lösning (eller gas) innehållande en känd koncentration av adsorbat passerar med en specifik hastighet genom ett stationärt lager av fast adsorbent. Under processen övervakas koncentrationen av ämnet vid kolumnens utlopp (känd som genombrottskurvan), vilket bestämmer dess koncentration i det uppsamlade utflödet. När kolumnens genombrottspunkt har nåtts avbryts inte processen utan fortsätter tills adsorbatkoncentrationen i utflödet når sin initiala koncentration (koncentrationen av lösningen som

	och tiden för faskontakt eller dess koncentration i lösningen vid jämvikt presenteras sedan grafiskt.	kommer in i kolonnen). Utjämning av koncentrationerna indikerar fullständig utarmning av adsorbentkapaciteten. Baserat på förändringarna i utflödeskoncentrationen beräknas mängden adsorberat ämne och bädeffektiviteten.
Processkontroll	Mindre kontrollerat massutbyte.	Bättre kontroll över flöde och massöverföring.
Skala	Laboratorietester. Små prover.	Industriella processer. Större mängder.
Ansökanvana	Studier av adsorptionskinetik och isotermer. Preliminär bedömning av adsorptionskapaciteten hos olika adsorbenter och adsorptionsmekanismen.	Bestämning av adsorbentkapacitet, genombrottskurvor och bäddens driftsförhållanden. Simulering och design av industriella processer.
Varaktighet	Specificerad kontakttid, t.ex. 24 timmar.	Kontinuerlig process, varaktigheten beror på flödes hastigheten.
Kostnad och utrustning	Enkel, billig apparatur (kolvar, shaker).	Mer komplex utrustning (adsorptionskolonner, pumpar, detektorer).
Diagram		

Under sorption i ett statiskt system upprättas en viss jämvikt mellan adsorbatet i den fasta fasen och i lösningen. Denna jämvikt överensstämmer med massverkansekvationerna eller Freundlich – och Langmuir – adsorptionsisotermekvationerna eller relaterade samband. Adsorptionsprocessen i ett kolonnssystem innebär att en lösning som innehåller föroreningarna (adsorbat) passerar genom en kolonn fylld med ett adsorptionsmaterial (adsorbent), där föroreningarna kvarhålls på ytan eller i porerna i detta material. I kolonn tekniken används tre grundläggande metoder för att separera de intressanta ämnena: frontmetoden, elueringsmetoden och undanträngningsmetoden.

Tillämpning av adsorption

Adsorption används för närvarande i stor utsträckning inom många områden (Ahmed Alsharif, 2025; Dąbrowski, 2001; Suprakas et al., 2020), inklusive:

- **miljöskydd:** vattenreningsprocesser, avloppsvatten och luftrening, industriell utsläppskontroll – minskning av skadliga gaser, t.ex. SO_2 , CO_2 i avgaser, t.ex. katalysatorer för bilavgaser,
- **kemisk och teknologisk industri:** katalys – katalysatorer för kemiska reaktioner, t.ex. förestring, hydrering, kondensation eller katalysatorbärare – porösa kroppar med utvecklad yta (t.ex. Al_2O_3 , SiO_2), separation och rening av ämnen – t.ex. adsorptionskromatografi, återvinning av värdefulla metaller, t.ex. vid hydrometallurgi av ädelmetaller, separation av starka syror från deras salter, NaCl från HCl , FeCl_2 från HCl , separation av kväve från luft i syrekonsentratorer, torkning av gaser och vätskor, t.ex. kiselgel, molekylsiktar, koncentrerad H_2SO_4 ,
- **medicin och farmaci:** förgiftning – avlägsnande av gifter från mag-tarmkanalen, hemoperfusion – avlägsnande av gifter från blodet med hjälp av adsorbenter, kontrollerad läkemedelsfrisättning, antibiotikarening,
- **livsmedels – och kosmetikaindustrin:** borttagning av färgämnen och föroreningar – t.ex. avfärgning av socker, ätbara oljor, avfärgning och stabilisering av juicer, borttagning av oönskade ämnen från växtextrakt, mejeriprodukter: för att kontrollera innehållet av kalcium- och natriumjoner, vin: för avsyraning av viner, stabilisering av produkter med adsorbenter som klumpförebyggande medel, t.ex. kosmetika, fuktabsorbenter, hudrengöring, t.ex. adsorptionsmasker och peeling (adsorption av talg, tungmetaller, gifter etc.), lukt borttagning, pH-kontroll,
- **specialtillämpningar:** adsorptionsvärmepumpar och kylskåp – användning av adsorptionsfenomenet för värmeväxling, lagring av gaser i porösa material, t.ex. väte, metan, gasmasker och filter – adsorption av giftiga ämnen och lukter.

Experimentell del

Syftet med övningen

Syftet med experimentet är att utföra adsorptionsborttagning av det toxiska färgämnet basisk gul 2 från en vattenlösning med hjälp av ett polymert adsorbent med tillsats av poly(lignin) (EGDMA-co-VA-co-LIG) och att bestämma dess sorptionskapacitet med avseende på ovannämnda färgämne.

Utrustning

Vägningskärl

Spatel

Tvätta flaskan

Mätkolvar, 25–250 ml

Mätcylindrar, 25 ml

Koniska kolvar med silikonproppar, 100 ml

Graderade bägare, 10–100 ml

Automatiska pipetter med variabel volymmätning, 0.01 ml – 25 ml

Trattar

Filter

Provrör

Provrörsställ
Kvartskyvetter
Analytisk balans
pH- mätare
Mekanisk skakmaskin
UV-vis spektrofotometer

Reagenser

Grundläggande gul 2
1 M NaOH-lösning
1 M HCl-lösning
Destillerat vatten

Förfarande

Beredning av basisk gul 2 stamlösning och arbetslösningar

Väg upp 1250 mg basisk gul 2 i en vägflaska med hjälp av en analysvåg. Överför sedan kvantitativt färgämnet till en 250 ml mätkolv och bered dess lösning i destillerat vatten för att erhålla en färgämneskoncentration på 5000 mg/l. Använd mätpipetter för att dra upp lämpliga mängder färgämne i 25 ml mätkolvar från stamlösningen av basisk gul 2. Koncentrationen av basisk gul 2 i arbetslösningarna (C_0) ska vara 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 mg/l. Justera pH-värdet för de basiska gula 2-arbetslösningarna till ett värde inom intervallet 8-9 med hjälp av en pH-mätare. Fyll på med destillerat vatten upp till märket och blanda väl.

Vägning av polymeradsorbenter med tillsatt lignin

Väg upp 0.02 g adsorbent med hjälp av en analysvåg i en 100 ml konisk kolv. Bered 11 vägda portioner adsorbent.

Adsorption av basisk gul 2 med statisk metod

Tillsätt 20 ml Basic Yellow 2-lösningar i koncentrationer från 10 till 1000 mg/l, mätt med graderade cylindrar, till koniska kolvar innehållande 0.02 g adsorbent. Förslut kolvarna ordentligt med silikonproppar och placera dem på en mekanisk skakanordning som roterar med 150 cykler/min. Skaka kolvens innehåll i 24 timmar vid rumstemperatur. Separera färglösningarna från adsorbenten genom filtrering efter den angivna tiden. Spara färglösningarna efter sorptionsprocessen för spektrofotometriska bestämningar. Utför färgämnesadsorptionstester på ett liknande sätt på ett referensmaterial, dvs. en ligninfri sampolymer.

Bestämning av koncentrationen av basiskt gult 2 med spektrofotometrisk metod

Färgämneskoncentrationen i lösningarna efter sorptionsprocessen mättes spektrofotometriskt. Absorbansmätningar (Abs) gjordes i förhållande till vatten, som fungerade som referens, i 1 cm tjocka kvartskyvetter, vid en maximal våglängd på 431 nm. Färgämneshalten bestämdes från standardkurvekvationen genom att fastställa förhållandet mellan absorbans och färgämneskoncentration

under mätförhållanden vid maximal våglängd. Standardkurvekvationen är följande: $Abs = 0.1222 \cdot C_e + 0.014$. Efter sorptionsprocessen späddes basiska gul 2-lösningar på lämpligt sätt i 10 ml mätkolvar, med hänsyn till analysintervallet från 1 till 20 mg/l. Utför absorbansmätningar två gånger och beräkna medelabsorbansvärdet. Bestäm den basiska gul 2-koncentrationen i lösningarna efter sorptionsprocessen (C_e) genom att transformera kalibreringskurvans formel och ta hänsyn till provutspädning.

Tolkning av resultat

Baserat på de erhållna uppgifterna, beräkna adsorbentens sorptionskapacitet (q_e , mg/g) med tillsats av lignin, poly (EGDMA-co-VA-co-LIG), i förhållande till basiskt gult 2, med hjälp av följande formel:

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

där: C_0 , C_e – färgämneskoncentration före och efter sorptionsprocessen i vattenfasen (mg/l), V – lösningsvolym (l), m – adsorbentmassa (g).

q_e vs. C_e - förhållandet för poly (EGDMA-co-VA-co-LIG) i ett diagram. Utvärdera det testade adsorbentet med avseende på dess effektivitet och tillämpbarhet för ovan nämnda ändamål och jämför dess effektivitet med ett referensadsorbent utan lignin och andra lignininnehållande adsorbenter baserat på en litteraturgenomgång.

Litteratur

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>.

Bielański 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., N. Kumar (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.