

Adsorpcija mravlje kiseline na aktivnom ugljenu u koloni

Pollak, Ema

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:654116>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ema Pollak

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Ema Pollak

ADSORPCIJA MRAVLJE KISELINE NA AKTIVNOM
UGLJENU U KOLONI

ZAVRŠNI RAD

Mentor rada: doc. dr. sc. Davor Dolar

Članovi ispitnog povjerenstva:

doc. dr. sc. Davor Dolar

prof. dr. sc. Juraj Šipušić

prof. dr. sc. Vanja Kosar

Zagreb, rujan 2019.

*Ovaj rad je izrađen na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilišta u Zagrebu,
Zavod za fizikalnu kemiju, akademske godine 2018./2019.*

Najviše se zahvaljujem svom mentoru, doc. dr. sc. Davoru Dolaru, na ukazanoj prilici, strpljenu i odličnim savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Također, hvala mojim roditeljima, sestri i ostalim članovima obitelji na podršci i razumijevanju za vrijeme studija.

Posebno hvala Marku što je bio uz mene i pružio mi najveću podršku.

SAŽETAK

Adsorpcija je metoda separacije između krute faze i čestica u plinu ili otopini koje adsorbiraju. Veliku važnost i primjenu ima u industriji, posebice za obradu otpadnih voda, uklanjanje teških metala, otrova, bojila te mirisa. Prilikom adsorpcije proučavaju se razne veličine i parametri koji se mogu ispitati preko adsorpcijskih izoterma.

Cilj ovoga rada bio je provesti adsorpciju mravlje kiseline. Adsorpcija se izvodila u kolonskom sustavu s granuliranim aktivnim ugljenom (GAC) pri različitim visinama fiksnog sloja i promjera kolone te stalne brzine protoka. Visine fiksnog sloja bile su 10, 15 i 20 cm, promjeri 3 i 4 cm, a brzina protoka $24,7 \pm 3,9 \text{ mL min}^{-1}$. Ispitivanje se sastojalo od dva dijela. Prvo se preko Freundlich-ove izoterme opisala adsorpcijska ravnoteža mravlje kiseline te se onda otopina propuštala kroz kolonu.

Rezultati mjerenja prikazani su preko krivulja proboja koje opisuju ovisnost omjera izlazne i ulazne koncentracije otopine (c/c_0) o volumenu propuštene otopine. Parametri Freundlich-ove izoterme pokazali su dobar afinitet za adsorpciju. Prilikom usporedbe krivulja proboja kiseline različitih visina GAC-a te različitih zadanih koncentracija, vidljivo je da je adsorpcija najbolja kod najviše razine ugljena zbog većeg broja pora unutar sloja te povećanjem koncentracije otopine, adsorpcija je brža.

Ključne riječi: adsorpcija u koloni, mravlja kiselina, granulirani aktivni ugljen, Freundlich-ova izoterma

ABSTRACT

Adsorption is a method of separation between the solid phase and the particles in the gas or solution they adsorb. It is of great importance and application in industry, especially for wastewater treatment, removal of heavy metals, poisons, dyes and odors. During the adsorption, various sizes and parameters are studied, which can be tested via adsorption isotherms.

The purpose of this paper was to perform the adsorption of formic acid. Adsorption was carried out using a granular activated carbon (GAC) column system at different heights of fixed bed and column diameter and constant flow rate. The default heights were 10, 15 and 20 cm, diameters 3 and 4 cm, and flow rate is $24.7 \pm 3.9 \text{ mL min}^{-1}$. The test consisted of two parts. First, the adsorption balance of formic acid was described via the Freundlich isotherm and then the solution was passed through the column.

The measurement results are presented through breakthrough curves describing the dependence of the ratio of the output and the inlet concentration of the solution (c/c_0) on the volume of the leaked solution. The parameters of the Freundlich isotherm have shown a good affinity for adsorption. When comparing the acid breakdown curves of different GAC heights and different set concentrations, it is evident that adsorption is best at the highest coal level due to the larger number of pores within the layer and by increasing the concentration of the solution, the adsorption is faster.

Key words: column adsorption, formic acid, granulated active carbon, Freundlich isotherm

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1. ADSORPCIJA | 2 |
| 2.1.1. Faktori koji utječu na adsorpciju | 3 |
| 2.1.2. Adsorpcijska ravnoteža | 3 |
| 2.1.3. Adsorpcijske izoterme | 3 |
| 2.1.3.1. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma | 5 |
| 2.1.3.2. Langmuir-ova izoterma | 6 |
| 2.1.3.3. B.E.T. izoterma | 6 |
| 2.2. ADSORBENSI | 6 |
| 2.2.1. Aktivni ugljen | 7 |
| 2.2.1.1. Praškasti aktivni ugljen | 8 |
| 2.2.1.2. Granulirani aktivni ugljen | 8 |
| 2.3. ADSORPCIJSKI SUSTAVI | 9 |
| 2.3.1. Adsorpcija u koloni s čvrstom fazom adsorbensa | 9 |
| 2.4. UKLANJANJE ORGANSKIH KISELINA | 10 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO | 11 |
| 3.1. Određivanje Freundlich-ove izoterme | 11 |
| 3.1.1. Aparatura i kemikalije | 11 |
| 3.1.2. Opis rada | 11 |
| 3.1.2.1. Račun Freundlich-ove izoterme, $a = K_f * c^{1/n}$ | 12 |
| 3.2. Adsorpcija na aktivnom ugljenu u koloni | 13 |
| 3.2.1. Aparatura i kemikalije | 13 |
| 3.2.2. Opis rada | 14 |
| 4. REZULTATI I RASPRAVA | 15 |
| 4.1. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma | 15 |
| 4.2. Adsorpcija na aktivnom ugljenu u koloni | 17 |
| 4.2.1. Usporedba adsorpcije mravlje kiseline promjera kolone 3 i 4 cm pri različitim visinama GAC-a | 21 |
| 4.2.2. Usporedba adsorpcije mravlje kiseline pri različitim koncentracijama | 23 |
| 5. ZAKLJUČCI | 25 |
| 6. POPIS SIMBOLA I KRATICA | 26 |
| 7. LITERATURA | 27 |
| 8. ŽIVOTOPIS | 30 |

1.UVOD

Adsorpcija je jedna od najznačajnijih metoda separacije fizikalno – kemijskih procesa gdje se čestice iz plinovite faze ili iz otopine vežu za površinu neke čvrste tvari. Adsorbatom se nazivaju čestice plinovite faze ili otopljene čestice u otopini koje se vežu na fiksni sloj, a adsorbensom se zovu čvrste faze na koje se vežu te čestice. Prilikom adsorpcije proučava se volumen adsorbiranih čestica plina ili koncentracija adsorbiranih čestica iz otopine, površina koju te čestice zauzimaju na adsorbensu te ovisnosti tih parametara o temperaturi i tlaku. Ovisnosti svih tih karakteristika mogu se ispitivati preko adsorpcijskih izoterma.

Primjena adsorpcije je jako velika u industriji i najviše se upotrebljava prilikom pročišćavanja otpadnih voda i zraka te u medicini za uklanjanje teških metala i otrova. Zbog tolike upotrebe ovog procesa bitno je znati vrstu i uvjete adsorpcije te pri kojim temperaturama i tlakovima je ovaj proces najučinkovitiji. Također, važno je znati kemijska i fizikalna svojstva tvari koja sudjeluju u procesu.

U ovom radu utvrđena je adsorpcija mravlje kiseline na aktivnom ugljenu u koloni. Svrha eksperimenta je uvidjeti da li parametri Freundlich-ove izoterme pokazuju dobar afinitet za adsorpciju, ispitati kako visina kolone ispunjene granuliranim aktivnim ugljenom (GAC) pospješuje adsorpciju te kako koncentracija otopine mravlje kiseline utječe na brzinu adsorpcije.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. ADSORPCIJA

Adsorpcija je sposobnost povećanja ili smanjenja koncentracije pojedinih komponenata (adsorbata) na površini faze (adsorbensa) uslijed čega dolazi do smanjenja slobodne energije na graničnoj površini.¹ Adsorpcija se može odvijati na svim granicama faza, a najviše se govori o granici krutina – plin i krutina – kapljevina. Adsorpcija je popraćena oslobađanjem topline jer je uzrokovana privlačnim silama između površine adsorbensa i molekula u plinu ili otopini koje se adsorbiraju. U procesu adsorpcije, molekule, atomi ili ioni, u plinu ili tekućini difundiraju u površini krutine, gdje se vežu s čvrstom površinom ili tamo drže slabe intermolekularne sile. Adsorbirane otopljene tvari se nazivaju adsorbatom, dok je kruti materijal adsorbens.²

Adsorpcija može biti fizikalna, kemijska i ionska s obzirom na vrstu privlačnih sila. Kod fizikalne adsorpcije, adsorbat se veže na površinu čvrstog adsorbensa slabim van der Waalsovima silama pri čemu se oslobađa malo topline te se ravnoteža postiže brzo. U kemijskoj adsorpciji, molekule na površini adsorbensa vežu se kovalentnim kemijskim vezama gdje se oslobađa toplina i ravnoteža se postiže razmjerno sporo. Pri ionskoj adsorpciji nastaju ionske veze elektrostatskog naboja pa se ne oslobađa toliko topline. Fizikalna i kemijska adsorpcija, osim po prirodi veze između adsorbata i adsorbensa, razlikuju se po vrijednostima entalpije adsorpcije, temperaturama na kojima se proces adsorpcije dešava, reverzibilnosti, zavisnosti od karakteristika adsorbensa i adsorbata i dr. (Tablica 1).³

Tablica 1. Usporedba fizikalne i kemijske adsorpcije³

| Fizikalna adsorpcija | Kemijska adsorpcija |
|---|--|
| Reverzibilna | Ireverzibilna |
| Promjena entalpije od 10 do 20 kJ mol ⁻¹ | Promjena entalpije od 40 do 400 kJ mol ⁻¹ |
| Slabe van der Waals-ove veze | Prave kemijske veze |
| Odvija se pri niskim temperaturama | Odvija se pri visokim temperaturama |
| Ne zahtjeva energiju aktivacije | Zahtjeva energiju aktivacije |
| Jedno ili višeslojna adsorpcija | Jednoslojna adsorpcija |
| Nije pretjerano specifična | Vrlo je specifična |

2.1.1. Faktori koji utječu na adsorpciju

Na adsorpciju utječu površina i priroda adsorbensa, veličina, struktura i oblik molekula tvari koja adsorbira te pH vrijednost i temperatura otopine. Ako je površina adsorbensa veća znači da postoji više mjesta za adsorpciju što ujedno rezultira s više adsorbirane tvari. Polarne tvari će se jače adsorbirati u polarnim otapalima. Topljivost znatno utječe na adsorpciju te ona pokazuje da što je topljivost manja to je adsorpcija veća. Odnosno ako je veća topljivost tada je jača veza između otapala i otopljene tvari pa je time adsorpcija slabija. Adsorbens može biti svaka čvrsta tvar, ali je bitan površinski karakter te čvrste tvari. Povećanjem molekulske mase, većim brojem funkcionalnih grupa, dvostrukom vezom, prisutnošću halogenih elemenata i spojeva te povećanjem polarnosti molekula, raste sposobnost tvari za adsorpcijom. Dok kod smanjenja pH vrijednosti raste adsorpcija organskih tvari iz vode - površina aktivnog ugljena ima veći kapacitet adsorpcije pri nižim pH vrijednostima. Za adsorpcijsku ravnotežu pogodnije su niže temperature jer je egzotermnog karaktera.⁴

2.1.2. Adsorpcijska ravnoteža

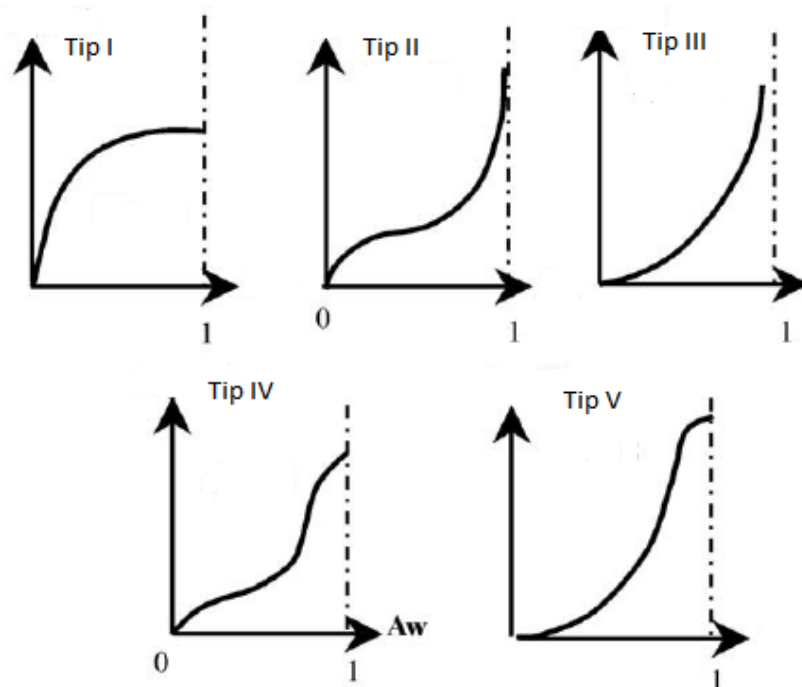
Kada se izjednače brzina adsorpcije i desorpcije, nastaje adsorpcijska ravnoteža na granici faza adsorbens – adsorbat. Otopljene čestice iz otopine su na početku procesa usmjerene prema površini čvrste faze pri čemu se neke odmah adsorbiraju, a neke difundiraju nazad u otopinu. Tijekom vremena, koncentracija adsorbata na površini adsorbensa raste. Paralelno s procesom adsorpcije, odvija se i proces desorpcije koji obuhvaća vraćanje adsorbata s adsorbensa nazad u otopinu. U određenom trenutku brzine adsorpcije i desorpcije se izjednačavaju te se postiže termodinamička ravnoteža. U slučaju da je temperatura sustava konstanta, proces se opisuje adsorpcijskim izotermama koje daju uvid u sam mehanizam adsorpcije.⁵

2.1.3. Adsorpcijske izoterme

Pri fizikalnoj i kemijskoj adsorpciji pri određenim uvjetima i nakon nekog vremena, dolazi do uspostavljanja ravnotežnog stanja između čestica, iona, atoma ili molekula na granici faza. Jedan se dio čestica adsorbata odmah adsorbira na površini adsorbensa, dok se drugi dio vraća u kapljevitu fazu. Takva raspodjela može se opisati izotermnim krivuljama, odnosno njihovim jednadžbama, koje se nazivaju adsorpcijskim izotermama, na osnovu kojih

se može vidjeti više informacija o adsorbentu, adsorbensu i mehanizmu adsorpcije.⁶ Kao takve, najčešće se koriste: empirijska *Freundlich-ova izoterma* te teorijski izvedene *Langmuir-ova* i *B.E.T.* (Brunauer, Emmet i Teller) *izoterme*.

Postoji 5 osnovnih tipova adsorpcijskih izotermi (Slika 1). Tip I je najjednostavniji oblik izoterme koji opisuje monoslojnu adsorpciju na temperaturi većoj od kritične (T_k). Taj tip izoterme predstavlja Freundlich-ovu izotermu, a karakterizirana je maksimalnom količinom adsorbirane tvari. Tip II predstavlja B.E.T. višeslojnu adsorpciju koja se primjenjuje za plinove na temperaturi većoj od kritične i tlakovima koji su niži od tlaka zasićenja. Tip I i II su najpoželjnije izoterme jer prikazuju snažnu adsorpciju. Tip III je nepoželjnog konveksnog oblika koji prikazuje značajnu adsorpciju tek pri visokim tlakovima. Ono opisuje višeslojnu adsorpciju kod koje je toplina adsorpcije prvog sloja manja od sljedećih slojeva. Tipovi IV i V su kompleksno kapilarno kondenzacijske verzije tipova II i III. U gornjem dijelu se primjećuje račvanje krivulje histereze zbog istovremene višeslojne adsorpcije i kapilarne kondenzacije. Kod silaznog toka krivulje javlja se samo kapilarna kondenzacija. Pojava histereze nije ograničena samo na tipove IV i V, već se može pojaviti kod bilo kojeg tipa ako se u sustavu nalaze nečistoće velikog adsorpcijskog kapaciteta.⁷



Slika 1. 5 osnovnih tipova adsorpcijskih izotermi⁶

2.1.3.1. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma

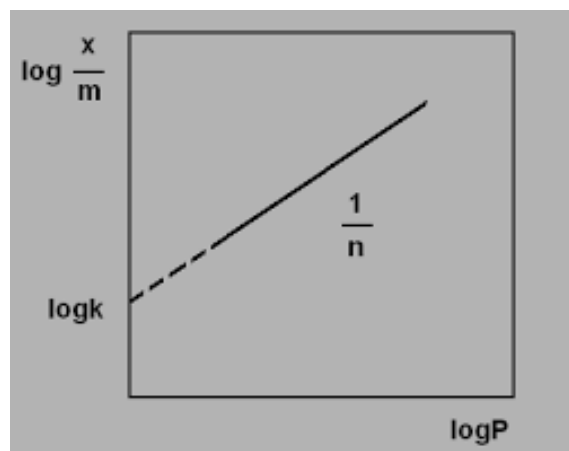
Freundlich-ova izoterma (Slika 2) je najranije poznati model koji opisuje neidealnu i reverzibilnu adsorpciju (adsorbirane molekule asociraju i disociraju na površini), a predložio ju je 1909. njemački kemičar Herbert Freundlich. Ona je empirijska i primjenjuje se pri višeslojnim procesima kada vjerojatnost adsorpcije nije jednaka za sva mjesta na površini adsorbensa. Na Slici 3, može se vidjeti njen linearizirani oblik. Njena jednačba glasi:

$$a = K_f * c^{1/n},$$

gdje je a količina adsorbirane tvari po gramu adsorbensa, K_f kapacitet adsorpcije, c koncentracija otopljene tvari te $1/n$ intenzitet adsorpcije.⁸



Slika 2. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma⁹



Slika 3. Linearizirani oblik Freundlich-ove izoterme⁹

2.1.3.2. Langmuir-ova izoterma

Irwing Langmuir 1916. prvi je dao fizikalno i matematičko objašnjenje adsorpcije i interpretaciju izoterma koje opisuju takve procese. Izoterma govori o adsorpciji plina na čvrstu fazu gdje molekule plina zauzimaju jednaku površinu pri adsorpciji, ali ne disociraju s površine adsorbensa niti nema interakcija među njima. Za Langmuir-ovu izotermu bitno je da se molekula može adsorbirati na mjesto tek kada je ono prazno odnosno kada se neki atom ili molekula desorbira. Tada se uspostavlja ravnoteža između adsorpcije i desorpcije. Također je bitno da se prilikom potpune pokrivenosti površine stvara monosloj.¹⁰

2.1.3.3. B.E.T. izoterma

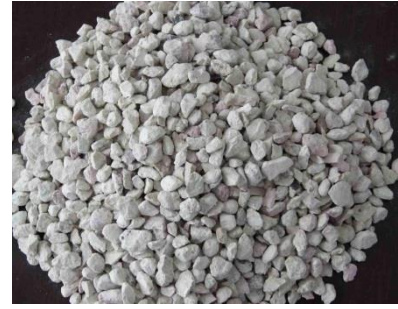
Brunauer, Emmet, i Teller izveli su B.E.T. jednadžbu preko Langmuir-ove teorije monoslojne adsorpcije. Ta izoterma predstavlja višeslojnu adsorpciju što znači da se adsorbira nekoliko slojeva molekula. B.E.T. teorija je zadržala Langmuirovu pretpostavku koja govori o ravnoteži između adsorpcije i desorpcije. Postoji ravnoteža između adsorpcije i desorpcije u 1. sloju, zatim ravnoteža između desorpcije 1. sloja i adsorpcije 2. sloja, itd. U prvom sloju molekule su najčvršće i najjače vezane, a energija vezanja u drugom i višim slojevima je znatno niža. Ovoj izotermi odgovara područje umjerenog tlaka te ako se procjeni niski ili visoki tlak, može doći do pogreške.¹¹

2.2. ADSORBENSI

Adsorbensi su krutine koje na svojoj površini mogu vezati molekule plina ili otopljene tvari. Te krutine imaju složenu poroznu strukturu koja se sastoji od pora različitih veličina i oblika te se odnose za porozne tvari čija je specifična aktivna površina vrlo velika. Prema veličini pora razlikuju se tri skupine: mikropore (širina pora ne prelazi 2 nm), mezopore (širina između 2 i 50 nm) i makropore (širina veća od 50 nm). Poznajemo samo četiri tipa adsorbensa koji su postigli značaj u industriji: aktivni ugljen (Slika 4), zeoliti (Slika 5), silikagel (Slika 6) i aktivna glina (Slika 7).^{12,13}



Slika 4. Aktivni ugljen¹⁴



Slika 5. Zeolit¹⁵



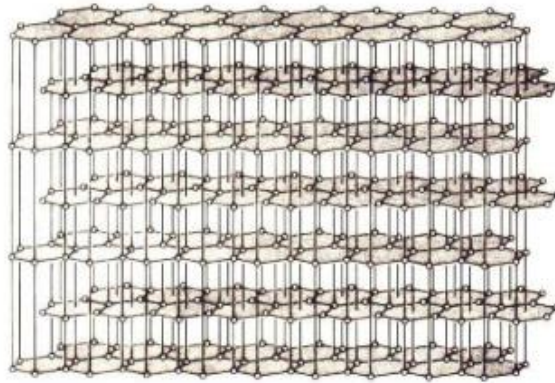
Slika 6. Silikagel¹⁶



Slika 7. Aktivna glina¹⁷

2.2.1. Aktivni ugljen

Aktivni ugljen je najčešće upotrebljavani adsorbens u industriji. Ima važnu prednost što pokazuje visoki adsorpcijski kapacitet organskih zagađivača zbog njihove visoke specifične površine, odgovarajuću raspodjelu veličine pora te relativno visoku mehaničku čvrstoću.¹⁸ Struktura je mikrokristalična, sastavljena od slojeva kondenziranih heksagonalnih ugljikovih prstenova, tzv. grafenskih slojeva sličnih kao u strukturi grafita (Slika 8). U strukturi leži adsorpcijska moć aktivnog ugljena. Najvažnije grupe koje utječu na površinu i adsorpcijska svojstva su funkcionalne grupe koje sadrže kisik.¹⁹ Najvažnije fizikalno svojstvo u aktivnom ugljenu je porozna struktura koja sadrži mali udio kisika i vodika. Neke vrste aktivnog ugljena sadrže i različite količine mineralnih tvari ovisno o prirodi početne sirovine.²⁰



Slika 8. Struktura aktivnog ugljena²¹

Upotreba aktivnog ugljena proteže se od uklanjanja organskih i anorganskih zagađenja pitke vode, sanacije otpadnih voda, pročišćavanja zraka putem ventilacijskih sustava ili zaštitnih maski pa sve do medicinske upotrebe u svrhu uklanjanja toksina, teških metala i kao pomoć kod nekih bakterijskih oboljenja. Po svojoj prirodi je hidrofoban, amorfan i velike specifične aktivne površine. Ima veliku sposobnost regeneracije i ponovne uporabe zbog toga što s adsorbatom tvori van der Waals-ove veze.^{2,22}

S obzirom na veličinu pora razlikuju se praškasti aktivni ugljen (PAC) i granulirani aktivni ugljen (GAC).

2.2.1.1. Praškasti aktivni ugljen

Praškasti aktivni ugljen (eng. *Powdered Activated Carbon*) sadrži čestice veličine između 15×10^{-6} m i 25×10^{-6} m. Najčešće se koristi za pročišćavanje otpadnih voda, u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, za obezbojenje u industriji šećera te za uklanjanje žive i dioksina u dimnjacima. Prednosti PAC-a su mogućnost mijenjanja količine samog ugljena ovisno o procesu i niže cijene. Većina industrijskih procesa dovodi do gubitka ugljena pa ga je teško regenerirati jer je regeneracija ekonomski neisplativa.²⁰

2.2.1.2. Granulirani aktivni ugljen

Granulirani aktivni ugljen (eng. *Granular Activated Carbon*) sadrži čestice čija je veličina od 1 do 5 mm. Također se koristi za pročišćavanje voda, točnije, za poboljšavanje

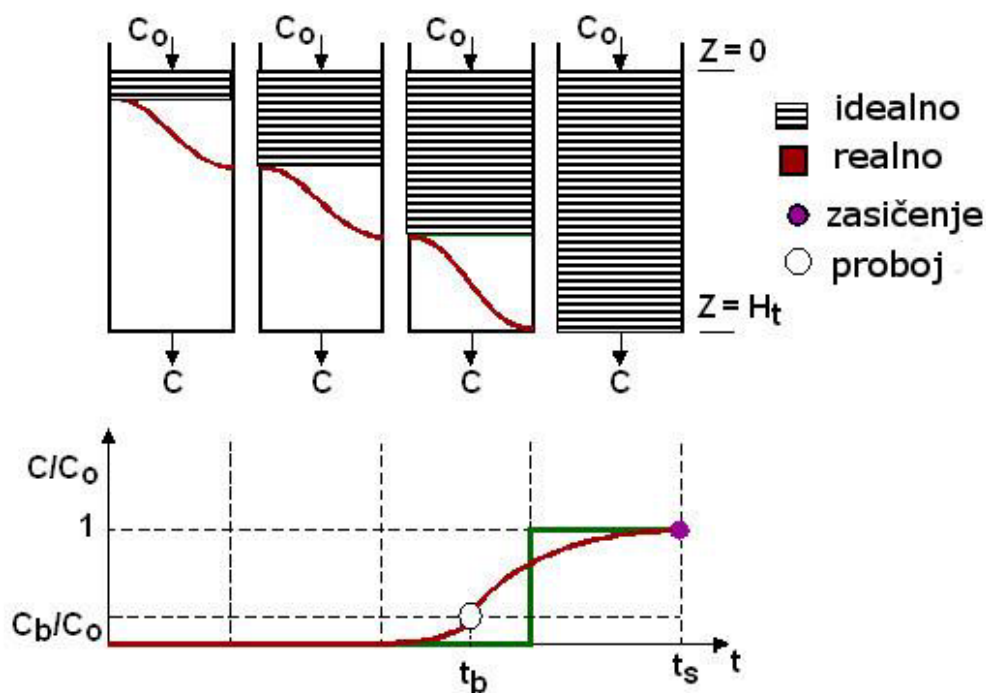
boje, mirisa i okusa te uklanjanje pesticida. Njegova uporaba ističe se i kod uklanjanja boja iz prehrambenih proizvoda te kod uklanjanja BTK (benzen, toluen i ksilen) aromatskih spojeva tijekom sanacije voda i zemljišta. U odnosu na praškasti aktivni ugljen, prednost granuliranog je mogućnost regeneracije, tj. korištenje više od jednog puta.²⁰

2.3. ADSORPCIJSKI SUSTAVI

Adsorpcijski sustavi dijele se na šaržne, polukontinuirane i kontinuirane. U zatvorenoj posudi gdje su adsorbens i kapljevina u neprekidnom kontaktu bez dovoda i odvoda kapljevine odvija se šaržni proces. U tom procesu najčešće se koristi praškasti aktivni ugljen, a zbog poboljšanja kontakta između adsorbensa i kapljevine otopina se miješa. Najkompliciraniji proces zapravo je polukontinuirani jer se adsorbens zadržava u posudi, a pojna smjesa se uvodi i odvodi iz posude kontinuiranim, fiksnim protokom. Kontinuirani proces se odvija istovremenim dovođenjem i odvođenjem otopine i adsorbensa.²

2.3.1. Adsorpcija u koloni s čvrstom fazom adsorbensa

Adsorpcija u koloni, polukontinuirani je sustav u kojem dolazi do adsorpcije pri prvim slojevima aktivnog ugljena gdje se brže zasićuju. Što se otopina više spušta prema izlazu kolone, to je adsorpcija veća te dolazi do potpunog zasićenja. Takav oblik adsorpcije naziva se prijenos mase kroz čvrsti fiksni sloj adsorbensa (eng. *Fixed bed adsorption*). Koncentracija otopine u početku eksponencijalno pada na nulu prije nego što dospije do kraja adsorbensa. Prilikom daljnog prolaska otopine kroz adsorbens, otopini koncentracija postepeno raste. U trenutku potpunog zasićenja, izlazna otopina imati će istu koncentraciju kao početna. Tada govorimo o ravnoteži ovog sustava. Ovisnost tih koncentracija o vremenu iskazuje se krivuljom proboja. Ovaj profil koncentracije i krivulja proboja prikazani su na Slici 9. Područje u kojem se događa većina promjene koncentracije naziva se adsorpcijskom zonom. Te vrijednosti c/c_0 (koncentracija izlazne otopine / koncentracija ulazne otopine) najčešće budu između 0,05 i 0,95. Adsorpcijska zona doseže do točke probijanja (t_b, c_b) te točke zasićenja (t_s, c_s). Do proboja u realnim slučajevima dolazi prije potpunog zasićenja te krivulja proboja ima karakterističan „S“ oblik, dok u idealnim slučajevima, u trenutku proboja, zasićena je cijela površina adsorbensa, a krivulja proboja ima oblik „Z“ (zelena krivulja na Slici 9).²³



Slika 9. Prikaz adsorpcijske zone i krivulje proboja gdje je c_0 početna koncentracija, c_b koncentracija izlazne otopine, t_b vrijeme proboja i Z visina kolone²⁴

2.4. UKLANJANJE ORGANSKIH KISELINA

Metodom adsorpcije na aktivnom ugljenu u kolonskom sustavu uklanjaju se industrijska bojila, teški metali te organske kiseline. Što se tiče alifatskih monokarbonilnih kiselina, one su također našle sve veću primjenu u farmaciji, tekstilnoj i kožnoj industriji. Nažalost, te kiseline su jedan od štetnih čimbenika otpadnih voda tih industrija. Zato su Iqbal i sur.²⁵ promatrali adsorpciju nekih alifatskih kiselina (mravlja, octena, propanska i n-butanska) na GAC-u. Adsorpcija se odvijala u šaržnom sustavu te je promatrana u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji adsorbata. Opaženo je da pri većim koncentracijama kiselina brže dolazi do zasićenja adsorbensa. Promatrane temperature su bile 105, 300 i 800 °C. Pri temperaturi od 800 °C adsorpcija je bila znatno brža. Površina ugljena postala je nepolarna jer je došlo do raspada površinskih oksida te je bolje privlačila nepolarne ili slabo polarne organske kiseline. Chaithra i sur.²⁶ istražili su utjecaj veličine čestica na adsorpciju octene kiseline te su dokazali da smanjenjem veličine čestica, tj. povećanjem specifične površine raste kapacitet za adsorpciju.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Određivanje Freundlich-ove izoterme

3.1.1. Aparatura i kemikalije

Za određivanje Freundlich-ove izoterme upotrebljavalo se standardno laboratorijsko posuđe te termostat koji je održavao konstantnu temperaturu adsorpcijske ravnoteže (Slika 10). Također se koristila analitička vaga preciznosti 0,0001 g, posudica za vaganje i granulirani aktivni ugljen. Od kemikalija koristila se mravlja kiselina (Lachner, Češka republika), natrijev hidroksid (NaOH , $c = 0,5 \text{ mol dm}^{-3}$) te indikator fenolftalein.



Slika 10. Vodena kupelj s termostatom



Slika 11. Automatska bireta

3.1.2. Opis rada

U vodenoj kupelji namjestio se termostat na zadanu temperaturu ($T = 25,4 \text{ }^\circ\text{C}$) zbog tromosti zagrijavanja vode. Priredile su se zadane otopine mravlje kiseline koncentracija 0,20, 0,50, 0,70, 0,90 i 1,10 mol dm^{-3} u odmjernim tikvicama od 250 cm^3 iz matične otopine koncentracije 4 mol dm^{-3} . Odvagao se aktivni ugljen od $1 \pm 0,25 \text{ g}$, s točnošću od 0,01 g. Ugljen se prebacio u reagens boce te se odmjernom (trbušastom) pipetom otpipetirao alikvot

od 100 cm³ kiseline. Zatim su se reagens boce stavile u termostat u kojemu je postignuta zadana temperatura. Svih pet otopina kiseline moraju biti jednako dugo u doticaju s aktivnim ugljenom pri zadanoj temperaturi. Da bi došlo do potpune uspostave adsorpcijske ravnoteže, potrebno je boce držati u kupelji oko 90 min. Dok traje termostatiranje, određivala se početna koncentracija pripremljenih otopina mravlje kiseline. U Erlenmeyerovu tikvicu odmjernom (trbušastom) pipetom otpipetirao se alikvot kiseline koji se odabire tako da utrošak titracije bude između 5 – 15 cm³. Titrira se otopinom NaOH (0,5 mol dm⁻³) uz indikator fenolftalein do prve promjene boje u ružičastu (Slika 11). Reagens boce se izvade nakon 90 min te se otopina filtrirala preko filter papira kako bi se uklonio aktivni ugljen. Na prethodno opisani način određivala se i ravnotežna koncentracija kiseline nakon adsorpcije.

3.1.2.1. Račun Freundlich-ove izoterme, $a = K_f * c^{1/n}$

- ❖ Za svaku otopinu izračunao se srednji volumen uzetih alikvota kiseline ($V(\text{kis.}) / \text{cm}^3$) i natrijeva hidroksida ($V(\text{NaOH}) / \text{cm}^3$).
- ❖ Koncentracija otopine kiseline prije (c_1) i nakon (c_2) adsorpcije izračuna se preko izraza:

$$c(\text{kis.}) / \text{cm}^3 = \frac{\bar{V}(\text{NaOH})}{\text{cm}^3} * \frac{c(\text{NaOH})}{\text{mol dm}^{-3}} * f(\text{NaOH})}{\bar{V}(\text{kis.}) / \text{cm}^3}$$

- ❖ Izračuna se količina adsorbirane kiseline (x / mmol) i količina adsorbirane kiseline po masi aktivnog ugljena ($a / \text{mmol g}^{-1}$):

$$\frac{x}{\text{mmol}} = \frac{V(\text{kis.})}{\text{cm}^3} * \frac{c_1 - c_2}{\text{mol dm}^{-3}} * (1000 \text{ cm}^3 \text{ dm}^{-3} * 0,001 \text{ mmol mol}^{-1})$$

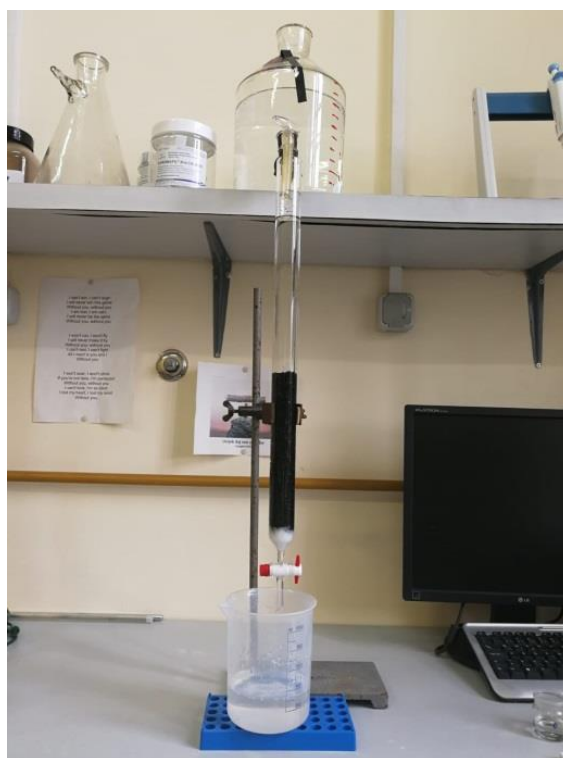
$$\frac{a}{\text{mmol g}^{-1}} = \left(\frac{x}{\text{mmol}} \right) / \left(\frac{m}{\text{g}} \right)$$

- ❖ Nacrta se linearizirani graf ovisnosti $\log a$ o $\log c_2$. Odsječak pravca predstavlja konstantu K_f , a nagib pravca konstantu $1/n$.

3.2. Adsorpcija na aktivnom ugljenu u koloni

3.2.1. Aparatura i kemikalije

Kao aparatura za adsorpciju na aktivnom ugljenu koristila se kolona s ručnim regulatorom protoka unutarnjeg promjera 3 i 4 cm te visine od 60 cm pričvršćena za metalni stalak (Slika 12). Također koristilo se standardno laboratorijsko posuđe, analitička vaga (KERN ALS 220-4) preciznosti 0,0001 g, posudice za vaganje te granulirani aktivni ugljen. Od kemikalija upotrebljavala se mravlja kiselina (Lachner, Češka republika), natrijev hidroksid ($0,5 \text{ mol dm}^{-3}$) te indikator fenolftalein.



Slika 12. Kolona

3.2.2. Opis rada

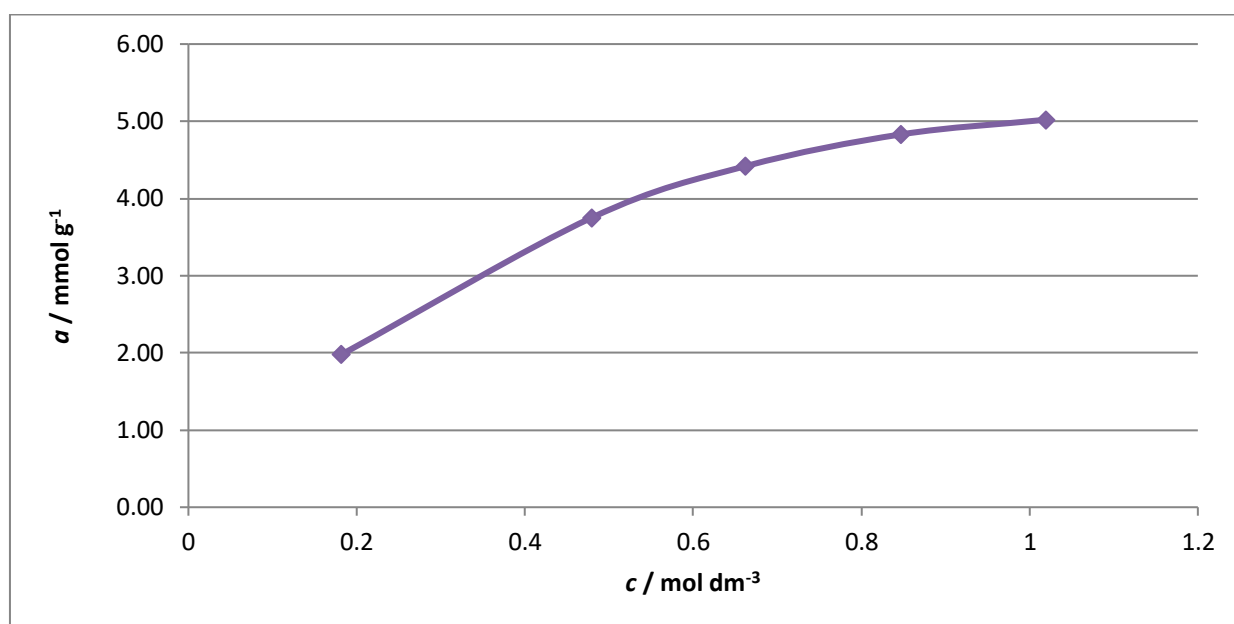
Na početku eksperimenta otopina mravlje kiseline titrirala se s NaOH radi određivanja početne koncentracije. Iz matične otopine kiseline pripremljeno se 5 L otopine tri različite koncentracije: 0,5, 1,0 i 2,0 mol dm⁻³. Složi se aparatura tako da se kolona učvrsti na stalak. Na dno kolone postavi se komadić vate kako aktivni ugljen ne bi začepio otvor na dnu kolone. Zatim se usipa aktivni ugljen na vatu visine 10, 15 i 20 cm. Ispod otvora kolone postavi se graduirana posuda u koju se propušta otopina te se na taj način mjeri ukupni volumen propuštene otopine. U kolonu se ulije otopina mravlje kiseline do malo ispod vrha te se regulacijom ventila propušta kroz kolonu. Brzina strujanja mjeri se ručno tako da se povremeno uzimaju uzorci, u trajanju od 15 s, te se važu na analitičkoj vagi. Nakon vaganja, uzorak se vraća u graduiranu posudu kako bi se mogao očitati točan volumen koji je prošao kroz kolonu te kako ne bi došlo do pogreške pri mjerenju volumena. Brzina strujanja iznosila je $24,7 \pm 3,9$ mL min⁻¹. Za vrijeme protjecanja potrebno je održavati visinu otopine u koloni konstantnim. Za vrijeme protjecanja uzimali su se uzorci. Do prve litre otopine, uzorci su se uzimali svakih 200 mL zbog veće brzine adsorpcije, a nakon litre uzimali su se svakih 500 mL. Svi uzeti uzorci tokom protjecanja titrirali su se sa NaOH. Podaci se bilježe te se crta graf. Postupak adsorpcije ponavlja se s drugim zadanim parametrima te se preko grafova uspoređuju rezultati.

4. REZULTATI I RASPRAVA

Glavni cilj rada je provesti adsorpciju mravlje kiseline na granuliranom aktivnom ugljenu, tako da se prvo preko Freundlich-ove izoterme odredi adsorpcijska ravnoteža te se onda otopina kiseline provodi kroz kolonu. Eksperiment adsorpcije u koloni izvođen je sa visinama 10, 15 i 20 cm GAC-a, promjera kolone od 3 i 4 cm te stalnom brzinom protoka od $24,7 \pm 3,9 \text{ mL min}^{-1}$. Također ispitan je i utjecaj koncentracije mravlje kiseline (0,5, 1,0 i $2,0 \text{ mol dm}^{-3}$) na adsorpciju u koloni.

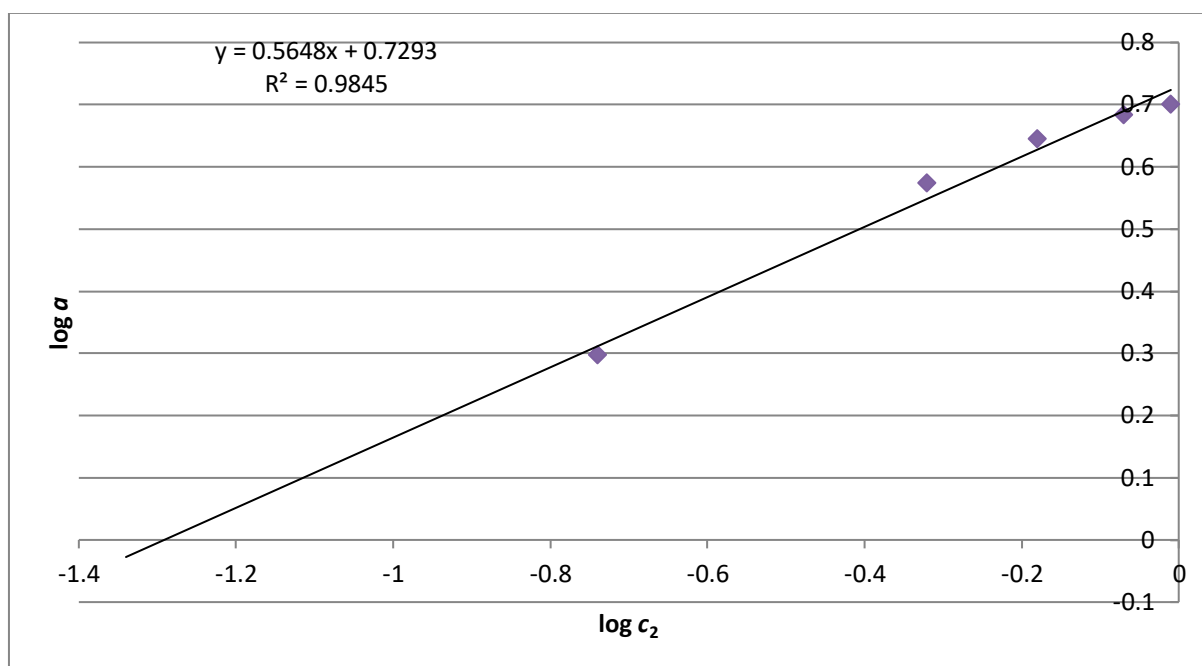
4.1. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma

Na Slici 13 prikazana je adsorpcijska krivulja mravlje kiseline pri temperaturi $25,1 \pm 0,10 \text{ }^\circ\text{C}$. Iz Slike 13 vidi se da porastom koncentracije raste količina adsorbirane kiseline po masi adsorbensa. Pri najnižoj koncentraciji mravlje kiseline od $0,2 \text{ mol dm}^{-3}$ adsorbirano je $1,98 \text{ mmol g}^{-1}$ dok je pri najvišoj koncentraciji od $1,1 \text{ mol dm}^{-3}$ adsorbirano $5,02 \text{ mmol g}^{-1}$. Također, vidljivo je da dobivena adsorpcijska krivulja ima tendenciju stvaranja platoa koji predstavlja Tip I adsorpcijske izoterme (Slika 13). Međutim, zbog nedovoljno visokih koncentracija ispitivane otopine, nije postignut plato niti vrijednost maksimalnog kapaciteta.



Slika 13. Freundlich-ova adsorpcijska izoterma mravlje kiseline

Da bi se odredili parametri Freundlich-ove izoterme (K_f i n) izotermu prikazanu na Slici 13 potrebno je linearizirati. Na Slici 14 prikazan je linearizirani oblik dobivene izoterme. Graf prikazuje ovisnost logaritama vrijednosti a i vrijednosti c_2 koja predstavlja koncentraciju otopina zadanih kiselina nakon provedene adsorpcije. Također, određen je i R^2 koji predstavlja linearni korelacijski koeficijent. On govori o slaganju eksperimentalnih podataka i linearnog oblika izoterme. Izračunate vrijednosti Freundlich-ovih parametara nalaze se u Tablici 2. Iz linearizacije pravca dobiveno je da K_f iznosi 5,36, a predstavlja vrijednost kapaciteta adsorpcije. Što je ta vrijednost veća, bolji je kapacitet adsorpcije. Parametar $1/n$ (intenzitet adsorpcije) je nagib pravca na Slici 14 i iznosi 0,5648. Što je intenzitet adsorpcije veći, adsorpcija je pogodnija. Te vrijednosti potvrđuju dobar afinitet za adsorpciju. Dakle, za istraživani sustav dobivena je Freundlich-ova izoterma u obliku $a=5,36 \cdot c^{0,5648}$.



Slika 14. Linearizirani oblik Freundlich-ove izoterme mravlje kiseline

Tablica 2. Parametri Freundlich-ove adsorpcijske izoterme

| Kiselina | T(°C) | $1/n$ | K_f | R^2 |
|----------|-----------------|--------|-------|--------|
| Mravlja | $25,1 \pm 0,10$ | 0,5648 | 5,36 | 0,9845 |

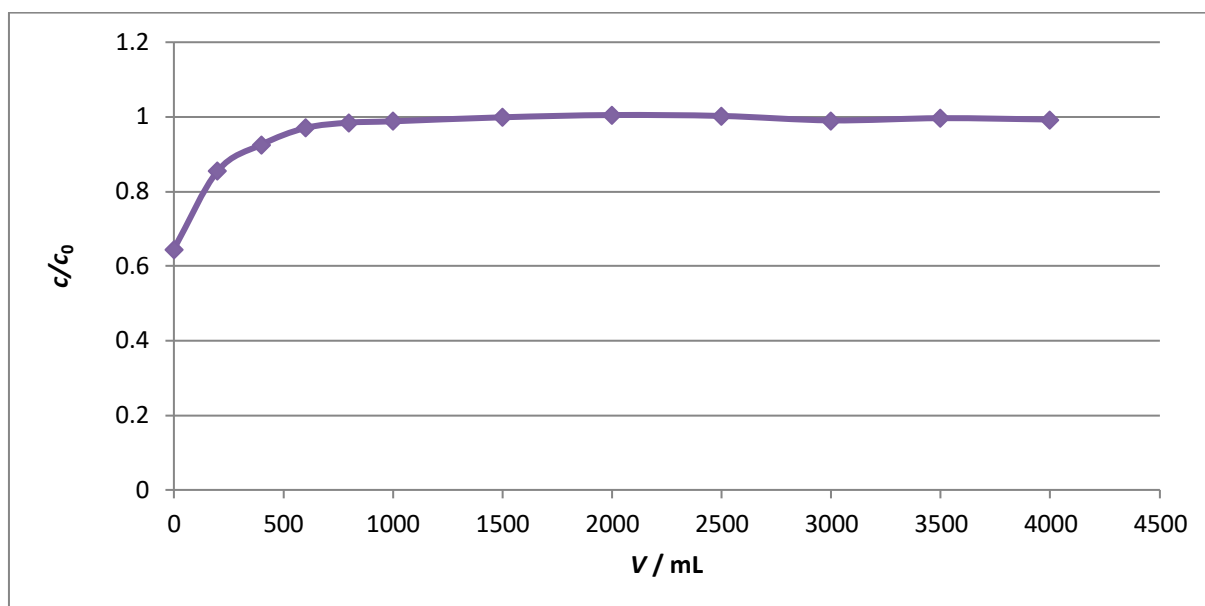
4.2. Adsorpcija na aktivnom ugljenu u koloni

U ovome radu provedeni su eksperimenti adsorpcije na aktivnom ugljenu u koloni sa zadanim različitim parametrima kao što su unutarnji promjer kolone (3 i 4 cm), visina aktivnog ugljena (10, 15 i 20 cm) te koncentracija otopine mravlje kiseline (0,5, 1,0 i 2,0 mol dm⁻³). Na Slikama 15 do 17 prikazane su krivulje proboja kolone promjera 3 cm visina GAC-a 10, 15 i 20 cm. Krivulje proboja opisuju adsorpciju u kolonskom sustavu u kojem otopina kontinuirano struji kroz fiksni sloj u ovom slučaju kroz aktivni ugljen. Te krivulje prikazuju ovisnosti vrijednosti c/c_0 o propuštenom volumenu, V/mL . c/c_0 predstavlja omjer koncentracije efluenta nakon određenog volumena obrađene ulazne otopine i početne koncentracije otopine. Što je veća vrijednost c/c_0 , to nam govori da je koncentracija uzorka bliža početnoj koncentraciji te dostiže maksimalnu vrijednost 1 gdje je adsorbens u potpunosti zasićen.

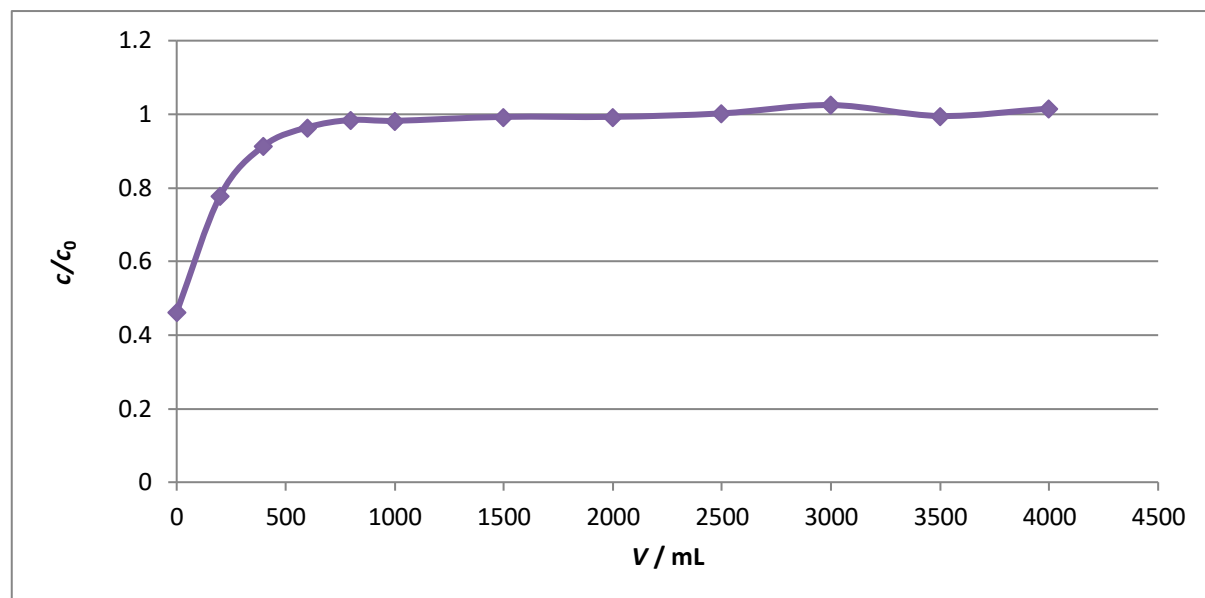
Slika 15 prikazuje krivulju proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm⁻³ pri visini aktivnog ugljena od 10 cm i unutarnjeg promjera od 3 cm. Isto tako na Slici 16 vidi se krivulja proboja mravlje kiseline, samo pri visini od 15 cm te na Slici 17 krivulja proboja pri visini od 20 cm aktivnog ugljena. Slike 15 i 16 nemaju karakteristični „S“ oblik krivulje proboja kao što se uočava na Slici 17. Razlog tome je razlika u visini GAC-a što znači da je adsorpcija bolja ako je veći volumen fiksnog sloja. Također, što je veći volumen GAC-a, postoji više pora unutar čvrste faze odnosno veći broj mjesta na površini na kojoj se mogu vezati molekule adsorbata čime se pospješuje adsorpcija. Ta mjesta se u početku popunjavaju iznimno brzo što se vidi naglim rastom krivulje, a daljnim popunjavanjem, smanjuje se vjerojatnost za molekulu adsorbata da dođe u dodir sa slobodnim veznim mjestom. Zbog toga dolazi do sve sporijeg rasta krivulje pri većim volumenima te kada se sva mjesta popune dolazi do potpunog zasićenja.

Na Slici 17 koncentracija mravlje kiseline je odmah na početku smanjena za 53% i do 500 mL obrađene kiseline raste brzo. Daljnja adsorpcija na GAC je smanjena što se vidi iz slike s obzirom da je nagib krivulje smanjen i približava se vrijednosti 1 odnosno potpunom zasićenju aktivnog ugljena. Kod volumena obrađene kiseline od 2000 mL omjer c/c_0 iznosi 0,98 i nakon tog volumena krivulja proboja se stabilizirala. S obzirom da je taj pokus rađen s koncentracijom 1 mol dm⁻³ očito je bila pripremljena premala količina mravlje kiseline od 4 mol dm⁻³ te nije postignuto potpuno zasićenje GAC-a. Drugi razlog što nije postignuto potpuno zasićenje može biti nepreciznost analitičke metode (svaki uzorak je titriran 2 puta)

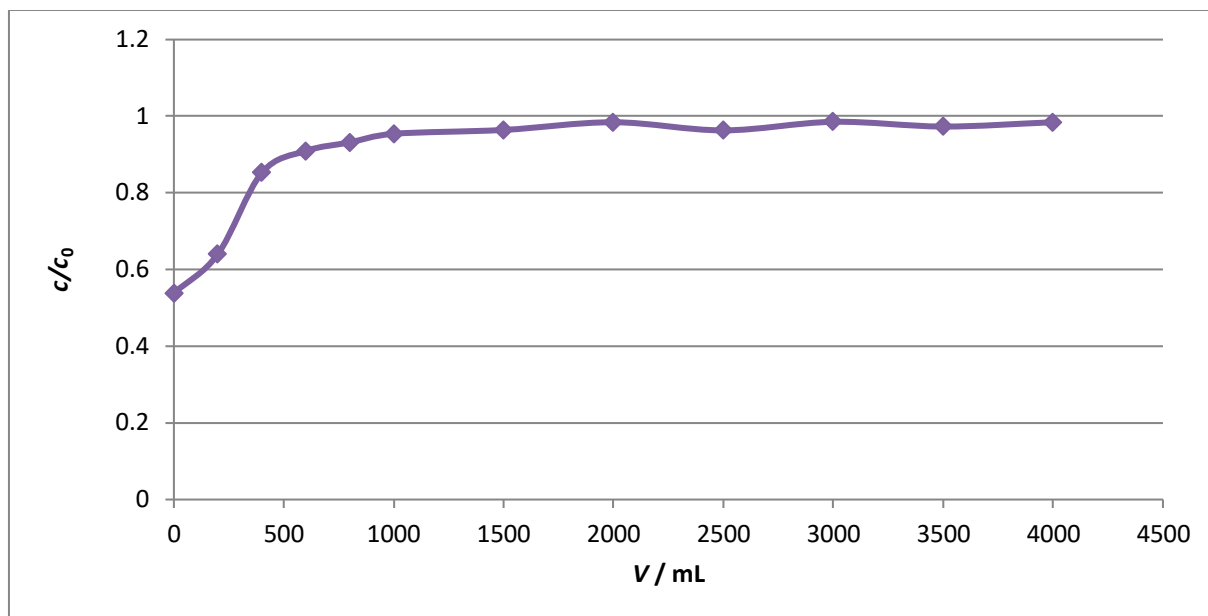
međutim taj razlog je manje vjerojatan jer je u daljnjim pokusima postignuto potpuno zasićenje.



Slika 15. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 10 cm i promjera kolone 3 cm



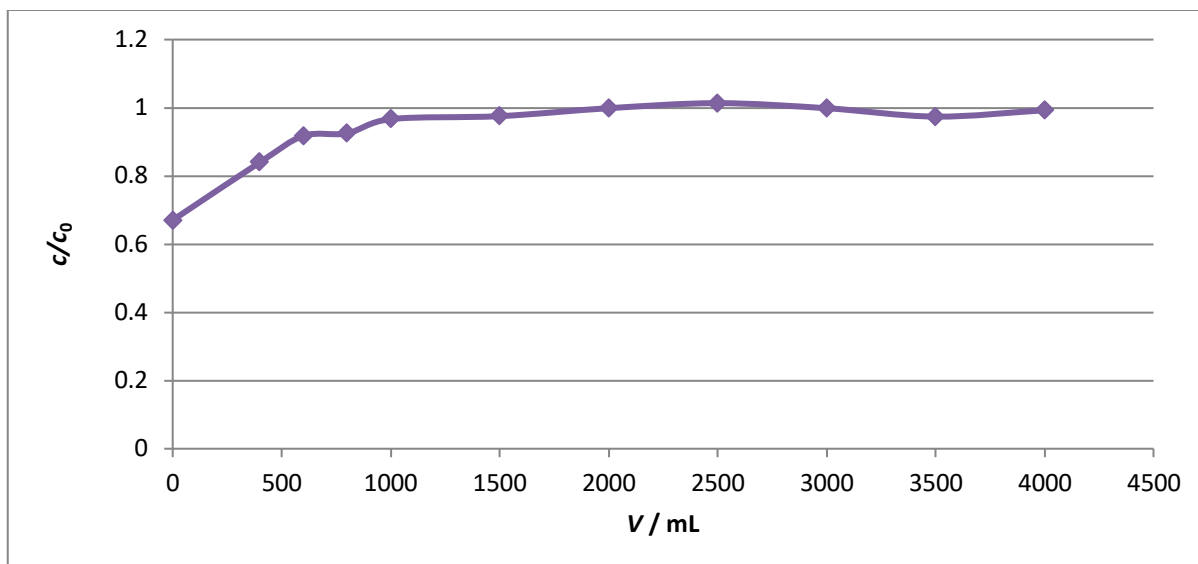
Slika 16. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 15 cm i promjera kolone 3 cm



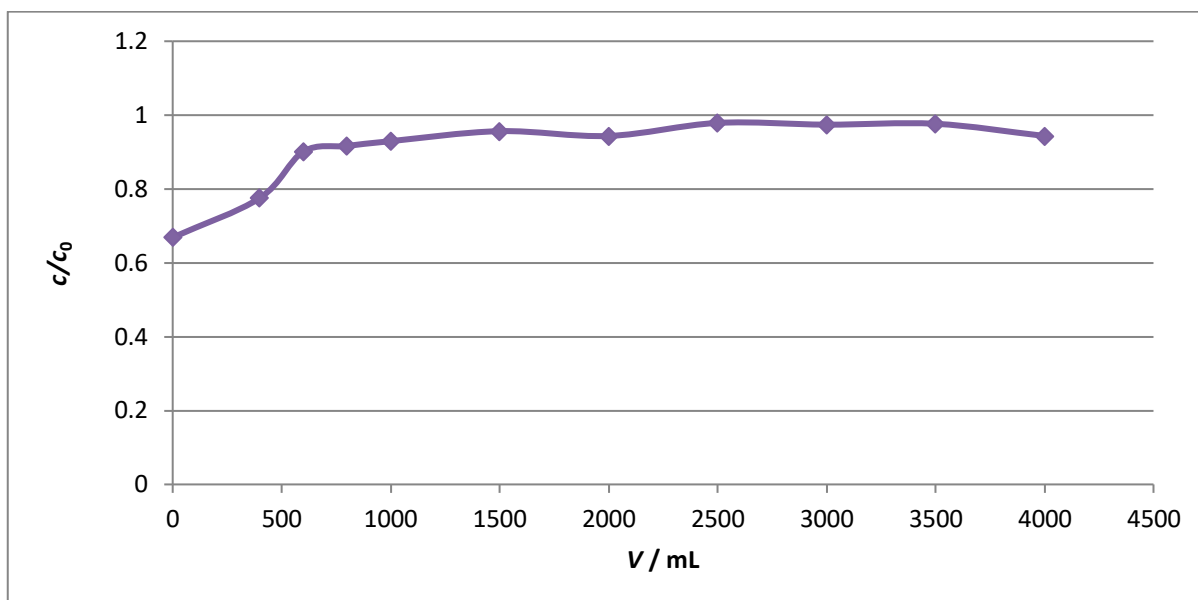
Slika 17. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 20 cm i promjera kolone 3 cm

Na Slikama 18 do 20 prikazane su krivulje proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} , unutarnjeg promjera kolone 4 cm i visine stupca GAC-a 10, 15 i 20 cm. Kao kod kolone promjera 3 cm, tako i kod kolone promjera 4 cm na Slikama 18 i 19 gubi se „S“ oblik krivulje proboja dok se na Slici 20 uočava karakterističan oblik krivulje. Pokus s kolonom visine GAC-a od 10 cm pokazuje potpuno zasićenje kod 2000 mL obrađene ulazne mravlje kiseline (Slika 18). Kod visine od 15 cm (Slika 19) te kod visine od 20 cm (Slika 20), nije postignuto potpuno zasićenje.

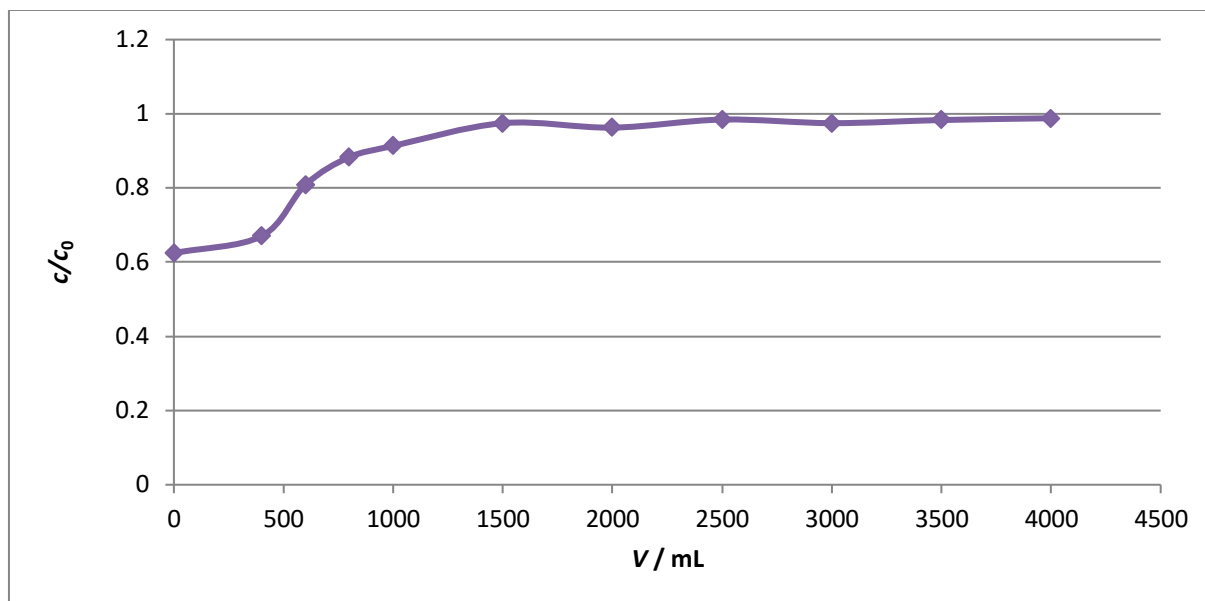
Međusobna usporedba (promjeri kolona 3 i 4 cm pri visini od 10, 15 i 20 cm te adsorpcija pri koncentracijama od 0,5, 1,0 i 2,0 mol dm^{-3}) do sada prikazanih rezultata biti će prikazana u sljedećim poglavljima.



Slika 18. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 10 cm i promjera kolone 4 cm



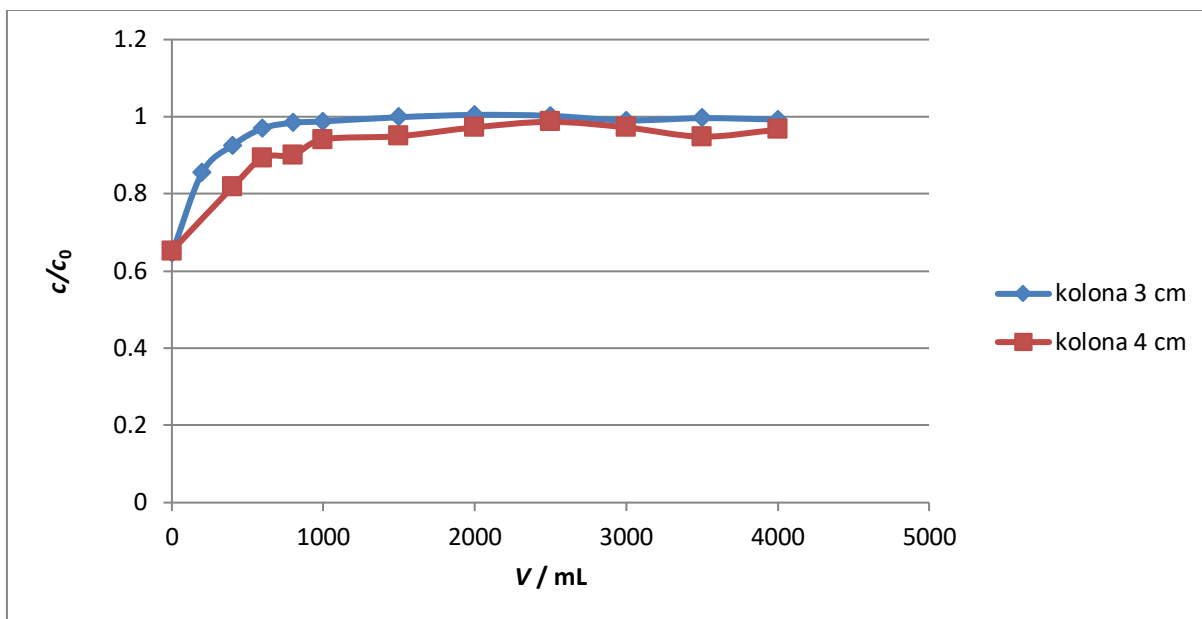
Slika 19. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 15 cm i promjera kolone 4 cm



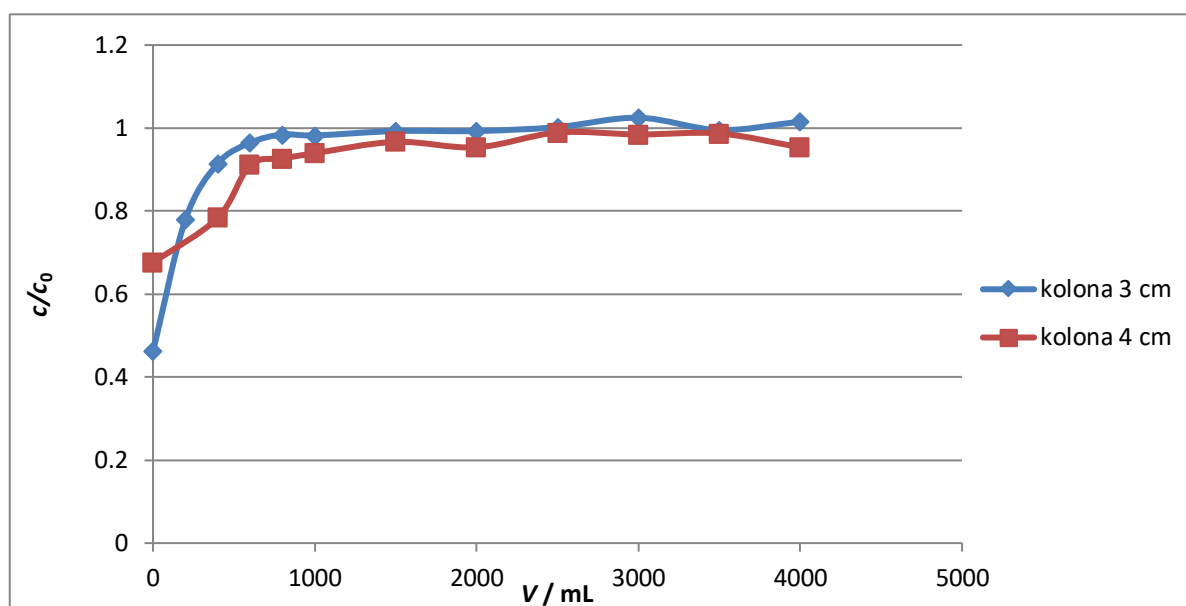
Slika 20. Krivulja proboja mravlje kiseline koncentracije 1 mol dm^{-3} pri visini GAC-a od 20 cm i promjera kolone 4 cm

4.2.1. Usporedba adsorpcije mravlje kiseline promjera kolone 3 i 4 cm pri različitim visinama GAC-a

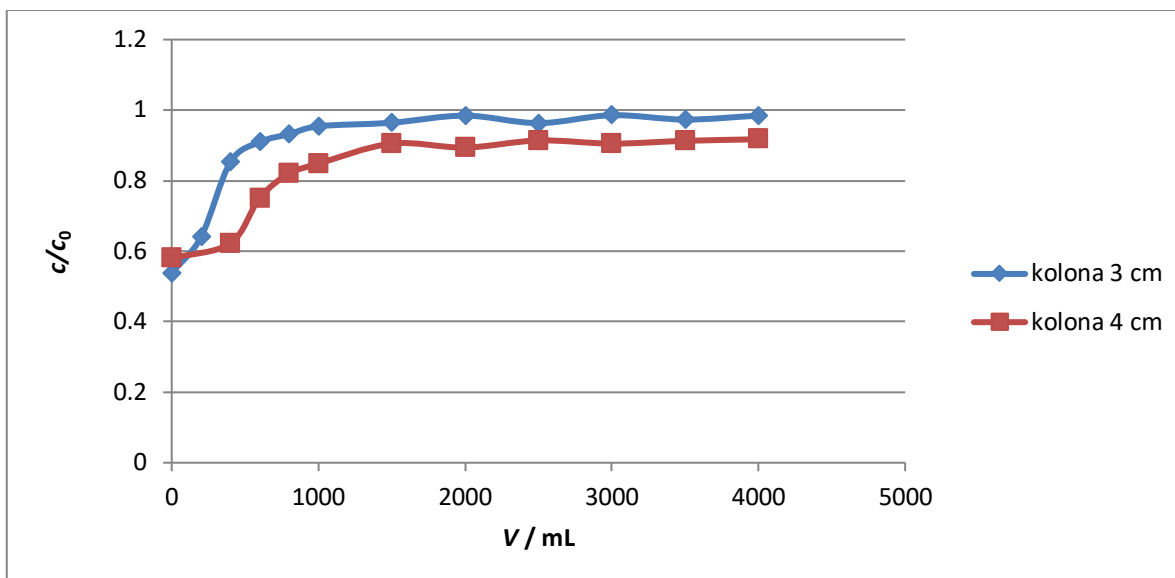
Na Slikama 21, 22 i 23 vidi se usporedba krivulje proboja mravlje kiseline pri različitim visinama GAC-a. Na Slici 21, uzorak pri volumenu 200 mL ima vrijednost c/c_0 0,855 dok pri volumenu od 1000 mL iznosi 0,988. Na Slici 22 kod kolone promjera 3 cm, uzorak pri volumenu 200 mL ima vrijednost c/c_0 0,779 dok pri volumenu od 800 mL iznosi 0,985. Vrijednosti c/c_0 kod prvog uzorka rastu smanjenjem visine GAC-a u koloni, što znači da će više vremena trebati da dođe do zasićenja. Odnosno što je veća površina fiksnog sloja to će u kraćem periodu doći do potpunog zasićenja. Na Slici 23 primjećuje se ubrzano zasićenje adsorbensa. Za kolonu promjera 3 cm, uzorak pri volumenu 200 mL ima vrijednost c/c_0 0,640 dok pri volumenu od 600 mL iznosi 0,909 što je već vrlo blizu potpunog zasićenja. Uzorci 800 i 1000 mL pokazuju znatno sporiji rast, a od uzorka 1500 mL postiže se potpuno zasićenje. Kod kolone promjera 4 cm, vrijednosti su poprilično slične samo što se uočava razlika u postizanju potpunog zasićenja. Tako se može vidjeti da kod kolone promjera 4 cm, do potpunog zasićenja dolazi pri nižim vrijednostima c/c_0 nego kod kolone promjera 3 cm. Usporedimo li krivulje proboja Slike 21, 22 i 23, primjećuje se kako smanjenjem visine GAC-a u koloni, mijenjaju se vrijednosti zasićenja adsorbata.



Slika 21. Usporedni prikaz krivulje proboja mravlje kiseline pri visini GAC-a od 10 cm



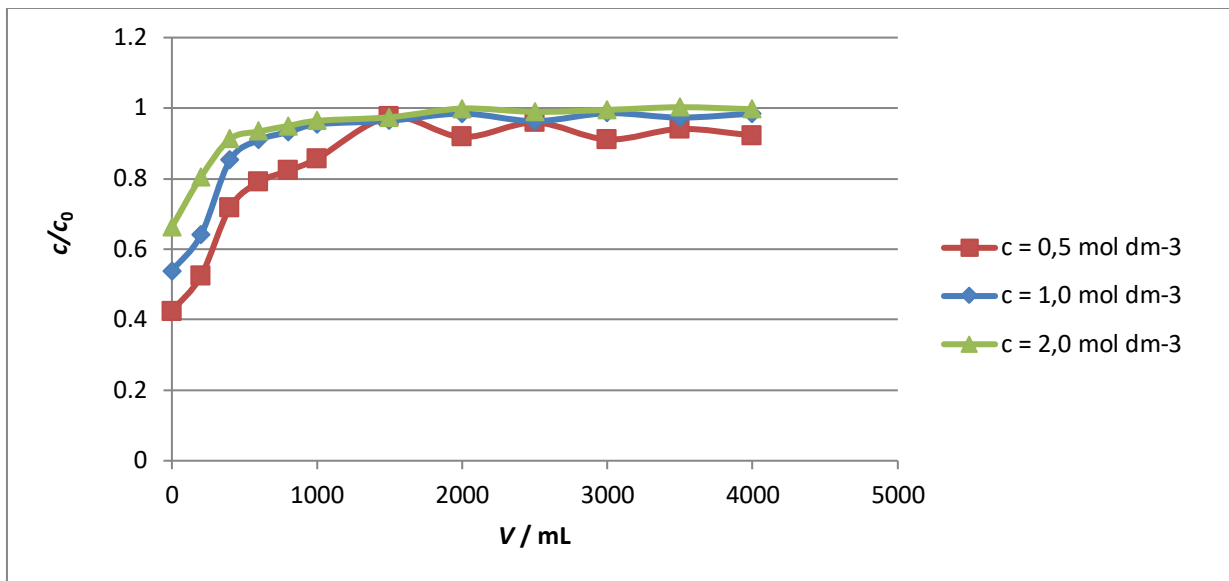
Slika 22. Usporedni prikaz krivulje proboja mravlje kiseline pri visini GAC-a od 15 cm



Slika 23. Usporedni prikaz krivulje proboja mravlje kiseline pri visini GAC-a od 20 cm

4.2.2. Usporedba adsorpcije mravlje kiseline pri različitim koncentracijama

Na Slici 24 prikazana je usporedba krivulje proboja mravlje kiseline pri koncentracijama 0,5, 1,0 i 2,0 mol dm⁻³. Prvi najmanji volumen uzorka pri kojem imamo mjerenja za sve tri koncentracije je 200 mL. Pri tom volumenu vrijednost c/c_0 za koncentraciju 0,5 mol dm⁻³ iznosi 0,524, za koncentraciju 1,0 mol dm⁻³ iznosi 0,640, a za koncentraciju 2,0 mol dm⁻³ 0,805. Za koncentraciju 0,5 mol dm⁻³, vrijednost c/c_0 iznosi 0,975 pri volumenu od 1500 mL, za koncentraciju 1,0 mol dm⁻³ vrijednost c/c_0 iznosi 0,954 pri volumenu od 1000 mL, a za koncentraciju 2,0 mol dm⁻³ vrijednost c/c_0 iznosi 0,949 pri volumenu od 800 mL. Može se primijetiti da porastom koncentracije mravlje kiseline raste i brzina zasićenja. Što znači da većom koncentracijom kiseline uočiti će se početak potpunog zasićenja pri nižim volumenima obrađene otopine.



Slika 24. Usporedba krivulja proboja mravlje kiseline pri koncentracijama: 0,5, 1,0 i 2,0 mol dm⁻³

5. ZAKLJUČCI

U ovom radu ispitivana je adsorpcija mravlje kiseline na granuliranom aktivnom ugljenu u koloni. U šaržnom postupku, adsorpcijom pri temperaturi od 25,4 °C, određena je adsorpcijska ravnoteža mravlje kiseline metodom Freundlich-ove izoterme. U kolonskom postupku, određene su krivulje proboja mravlje kiseline pri različitoj visini GAC-a, pri različitom promjeru kolone te pri različitim koncentracijama.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti:

- ❖ Adsorpcijska izoterma za mravlju kiselinu odgovara Tipu I.
- ❖ Iz Freundlich-ove izoterme vrijednosti K_f i $1/n$ pokazuju dobar afinitet za adsorpciju.
- ❖ Povećanjem visine GAC-a u koloni, veći je volumen fiksnog sloja, što rezultira i boljom adsorpcijom zbog povećanja ukupne aktivne površine unutar čvrste faze na koje se vežu molekule adsorbata.
- ❖ Adsorpcija će biti bolja i brža kod kolone većeg promjera jer će pri manjim vrijednostima c/c_0 doći do potpunog zasićenja.
- ❖ Povećanjem koncentracije otopine povećava se i brzina adsorpcije.

6. POPIS SIMBOLA I KRATICA

Simboli

| | |
|---------|---|
| a | Količina adsorbirane kiseline po masi aktivnog ugljena (mmol g^{-1}) |
| c | Koncentracija (mol dm^{-3}) |
| c/c_0 | Omjer izlazne i ulazne koncentracije otopine |
| c_0 | Početna koncentracija (mol dm^{-3}) |
| c_1 | Koncentracija otopine kiseline prije adsorpcije (mol dm^{-3}) |
| c_2 | Koncentracija otopine kiseline nakon adsorpcije (mol dm^{-3}) |
| c_b | Koncentracija izlazne otopine (mol dm^{-3}) |
| c_s | Koncentracija izlazne otopine u točki potpunog zasićenja (mol dm^{-3}) |
| K_f | Kapacitet adsorpcije |
| $1/n$ | Intenzitet adsorpcije |
| R^2 | Linearni korelacijski koeficijent |
| T_k | Kritična temperatura (K) |
| t_b | Vrijeme proboja (s) |
| t_s | Vrijeme potpunog zasićenja (s) |
| V | Volumen (mL) |
| Z | Visina kolone (cm) |

Kratice

| | |
|-----------------|----------------------------------|
| B.E.T. izoterma | Brunauer, Emmet, Teller izoterma |
| GAC | Granulirani aktivni ugljen |
| PAC | Ugljen u prahu |

7. LITERATURA

- [1] Holclajtner-Antunović, I., *Opšti Kurs Fizičke Hemije* (Zavod za udžbenike i nastavna sredstva), Beograd, 2000.
- [2] Seader, J.D. i Henley, E.J., *Separation Process Principles*, John Wiley & Sons Inc., Danvers, 2006.
- [3] Bansal, R.C. i Goyal, M., *Activated Carbon Adsorption*, Taylor and Francis group, Boca Raton, 2005.
- [4] Ivošević, I., *Utjecaj Vrste aktivnog ugljena pri kondicioniranju vode za piće*, diplomski rad, Građevinski fakultet u Osijeku, 2015.
- [5] Inglezakis, V.J. i Pouloupoulos, S.G., *Adsorption, ion exchange and catalysis: design of operations and environmental applications*, Elsevier, Oxford, 2006.
- [6] Evangelou, V.P., *Environmental Soil and Water Chemistry*, New York, 1998.
- [7] Moreno-Castilla, C., *Adsorption of Organic Molecules from Aqueous Solutions on Carbon Materials*, *Carbon*, **42** (2004) 83-94.
- [8] Kinniburgh, D.G., *General Purpose Adsorption Isotherms*, *Environ. Sci. Technol.*, **20** (1986) 895-904.
- [9] Katić, L., *Adsorpcijske izoterme*, Završni rad, Prehrambeno – tehnološki Fakultet, Osijek, 2016.
- [10] Ho, Y. S., Porter, J. F. i McKay, G., *Equilibrium isotherm studies for the sorption of divalent metal ions onto peat: copper, nickel and lead single component systems*, *Water Air Soil Poll.*, **141** (2002) 1-33.
- [11] Atkins, P. i de Paula, J., *Atkins Physical Chemistry*, 8th Ed. Oxford University Press, W. H. Freeman and Company, Oxford, 2006., str.1052.

- [12] Yang, R.T., Adsorbents–Fundamentals and Applications, A John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003., str.410.
- [13] Dabrowski, A., Adsorption - from Theory to Practice, Adv. Colloid. Interfac., **93** (2001) 135-224.
- [14] <http://mojavoda.hr/trgovina/aktivni-ugljen-filtraciju-vode/> (pristup 21. kolovoz 2019.)
- [15] <https://www.posta.com.mx/bienestar/cientifico-crea-sustancia-con-zeolita-para-tratar-diabetes> (pristup 21. kolovoz 2019.)
- [16] <http://hr.welldesiccant.com/desiccant/silica-gel-desiccant/silica-gel-with-moisture-indicator.html> (pristup 21. kolovoz 2019.)
- [17] <http://ba.chemxin-ar.com/activated-alumina/activated-alumina-adsorbent/white-5-7mm-adsorbent-granule-activated.html> (pristup 21. kolovoz 2019.)
- [18] Mohanty, K., Das, D. i Biswas, M. N., Preparation and Characterization of Activated Carbons from *Sterculia alata* Nutshell by Chemical Activation with Zinc Chloride to Remove Phenol from Wastewater, Adsorption, **12** (2006) 119–132.
- [19] Nwabanne, J.T. i Igbokwe, P.K., Application of Response Surface Methodology for Preparation of Activated Carbon from Palmyra Palm Nut, International Journal of Applied Science and Technology, **5** (9) (2012) 18-25.
- [20] Menéndez-Díaz, J.A. i Martín-Gullón, I., Types of Carbon Adsorbents and Their Production, Interface Sci. Technol., **7** (2006) 1-48.
- [21] https://www.aces.pl/hr/4,aktivni_ugljen , (pristup 21. kolovoz 2019.)
- [22] López-Velandia, C., Moreno-Barbosa, J.J., Sierra-Ramirez, R., Giraldo, L. i Moreno-Piraján, J.C., Adsorption of Volatile Carboxylic Acids on Activated Carbon Synthesized from Watermelon Shells, Adsorption Science & Technology, **32** (2014) 227-242.

[23] Barros, M.A.S.D., P. A, Arroyo, P.A., Silva, E.A., General Aspects of Aqueous Sorption Process in Fixed Beds, **14** (2013) 361-386.

[24] <https://www.intechopen.com/books/mass-transfer-advances-in-sustainable-energy-and-environment-oriented-numerical-modeling/general-aspects-of-aqueous-sorption-process-in-fixed-beds> , (pristup 27. kolovoz 2019.)

[25] Iqbal, Y., Alam, S. i Isahaq, M., Impact of Surface Functional Groups on the Adsorption of Aliphatic Organic Acids from Aqueous Solutions on Granular Activated Charcoal, Jour. Chem. Soc. Pak., **22** (2000) 281-291.

[26] Chaithra, P., Hemashree K. i Bhat, J.I., Acid Adsorption on the Activated Charcoal Synthesized from Low Cost Agricultural Waste under Varying Condition, Iranica Journal of Energy & Environment, **8** (2017) 36-43.

8. ŽIVOTOPIS

Osobni podatci: Ime: Ema
Prezime: Pollak
[REDACTED]
[REDACTED]

Obrazovanje:

| | |
|--------------|---|
| 2015 - danas | Sveučilišni preddiplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu |
| 2013 - 2015 | Sveučilišni preddiplomski studij Primijenjena kemija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu |
| 2009 - 2013 | Završeni kemijski tehničar, Prirodoslovna škola Vladimira Preloga, Zagreb |
| 2001 - 2009 | OŠ Pantovčak, Zagreb |

Jezici: Engleski - aktivno
Njemački - pasivno