

Toni-Pekka Iisakkala

AKTIIVIHIILEN ADSORPTIOKYKY

Tekniikka Pori
Kemiantekniikan Koulutusohjelma

2011



AKTIIVIHIILEN ADSORPTIOKYKY

Iisakkala Toni-Pekka
Satakunnan Ammattikorkeakoulu
Tekniikan Porin Yksikkö
Kemiantekniikan Koulutusohjelma
Joulukuu 2010
Työn ohjaaja: Lehtori, Hannelius Timo DI, SAMK
38 Sivua

Asiasanat: Aktiivihiili, Adsorptio, Desorptio, Pintajännitys, Johtokyky, Taitekerroin

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin, miten tehokkaasti aktiivihiili adsorboi erilaisia orgaanisia liuottimia sekä epäorgaanisia elektrolyyttejä vesifaasista. Lisäksi tutkittiin aktiivihiilen adsorptiokinetiikkaa sekä regeneroitumiskykyä. Kokeet suoritettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin yksikön kemian laboratoriossa.

Omaan työhöni kuului näytteiden valmistus ja analysointi ohjeiden mukaisesti. Arvioin saamiani tuloksia ja tavoitteenani oli selvittää voidaanko aktiivihiiltä käyttää orgaanisten liuottimien ja epäorgaanisten elektrolyyttien adsorboimiseen vesifaasista. Tämän lisäksi tutkin onko mahdollista elvyttää jo kerran käytettyä aktiivihiiltä pesemällä sitä ja miten elvytys vaikuttaa aktiivihiilen adsorptionopeuteen.

Orgaaniset yhdisteet alensivat pintajännitystä yleisesti jo hyvin pienissä pitoisuuksissa; poikkeuksena oli kuitenkin kloroformi. Moottoriöljy laski aluksi pintajännitystä, joka kuitenkin nousi selvästi öljypitoisuuden kasvaessa. Taitekerroinmittausten mukaan sekä sakkaroosi että glukoosi adsorboituivat aktiivihiileen vain hyvin pienissä määrin. Johtokykymittaukset osoittivat, että etikkahappo ja myös suolahappo adsorboituivat jossain määrin aktiivihiileen. Sen sijaan ammoniakkin ja muiden epäorgaanisten yhdisteiden adsorptiota ei havaittu.

Todettiin myös, että etikkahapon täydellinen adsorptio vaati huoneen lämpötilassa vähintään 25 min aikaa. Ensimmäisten 10 minuutin aikana ei tapahtunut adsorptiota juuri lainkaan. Aktiivihiili voitiin regeneroida lähes täydellisesti vesipesulla ja kuivaamalla hiili uunissa tunnin ajan 105 C-asteen lämpötilassa.

ADSORPTION CHARACTERISTICS OF CHARCOAL

Toni-Pekka Iisakkala
Satakunta University of Applied Sciences
Faculty of Technology, Pori
Degree programme in Chemical Engineering
December 2010
Supervisor: Lecturer, Hannelius Timo, (M.Sc.Chem.Eng), SAMK
38 pages

Key words: Charcoal, Adsorption, Desorption, Liquid tension, Conductivity, Refraction factor

ABSTRACT

Adsorption characteristics of activated carbon was studied in the laboratory by testing different organic substances and inorganic electrolytes. Adsorption kinetics and regeneration of charcoal were studied as well. Surface tension, electrical conductivity and refraction index were used as analysis methods to define concentration differences of substances.

According to the results retention of organic substances, e.g. ethanol, chloroform and carbon tetrachloride, were much higher compared to inorganic compounds, e.g. ammonia (NH₃), as expected. Ammonia didn't adsorb practically at all on charcoal. Sugar (glucose and saccharose) and carbon tetrachloride gave the best relative adsorption yields.

Surface tension measurement gives a rough estimation of amount of dissolved compound in water. It was also noticed that charcoal can be effectively regenerated by washing with water and heated in oven at 105 C.

SISÄLLYSLUETTELO	s.
1. TYÖN TARKOITUS	1
2. HIILI	1
2.1. Esiintyminen	1
2.2. Aktiivihiili	2
3. ADSORPTIO	5
3.1. Adsorptio isotermit	6
3.2. Adsorptioon vaikuttavat tekijät	8
3.3. Adsorbentit	10
3.4. Adsorption teknisiä sovelluksia	11
3.5. Desorptio	11
4. PINTAJÄNNITYS	11
4.1. Pintajännityksen mittaaminen	13
5. JOHTOKYKY	14
6. TAITEKERROIN	15
7. TYÖN SUORITUS	17
7.1. Näytteiden analysointi	17
7.2. Liuosten adsorbointi	18
7.3. Etikkahapon adsorptio	18
7.4. Epäorgaanisten yhdisteiden adsorptio	19
7.5. Adsorptionopeus	20
7.6. Aktiivihiilen regenerointi	20
7.7. Sokeriliuosten adsorptio	21

8. TULOKSET	22
8.1. Orgaanisten yhdisteiden adsorptio	22
8.2. Etikkahapon adsorptio	26
8.3. Epäorgaanisten yhdisteiden adsorptio	26
8.4. Adsorptionopeus	28
8.5. Aktiivihiilen regenerointi	29
8.6. Sokeriliuosten adsorptio	29
9. TULOSTEN ARVIOINTI	30
9.1. Orgaanisten yhdisteiden adsorptio	30
9.2. Etikkahapon adsorptio	33
9.3. Epäorgaanisten yhdisteiden adsorptio	34
9.4. Adsorptionopeus	35
9.5. Aktiivihiilen regenerointi	36
9.6. Sokeriliuosten adsorptio	36
10. LÄHTEET	37

1. TYÖN TARKOITUS

Työn tarkoituksena oli tutkia, miten tehokkaasti aktiivihiili adsorboi erilaisia orgaanisia liuottimia sekä epäorgaanisia elektrolyyttejä vesifaasista. Lisäksi tutkittiin aktiivihiilen adsorptionopeutta sekä regeneroitumiskykyä. Kokeet suoritettiin Satakunnan ammattikorkeakoulun Porin yksikön analyttisen kemian laboratoriossa.

2. HIILI

Hiili on yleinen epämetalli, neliarvoinen alkuaine, jolla on myös useita allotrooppisia muotoja. Sanaa *hiili* käytetään puheessa myös, kun tarkoitetaan kivi- tai puuhiiltä. Hiili esiintyy yhdisteissään neliarvoisena paitsi hiilimonoksidissa (CO), jossa sen hapetusluku on +II. Hiilen muodostamat sidokset ovat kovalenttisia, koska hiilen elektronegatiivisuus on 2,5. Hiiliketjuissa hiilten välinen kulma on 109 astetta, minkä vuoksi hiiliketju on polvekkeinen./1/

2.1. Esiintyminen

Hiiltä esiintyy kaikkialla, missä on elämää ja orgaanisia yhdisteitä. Hiilen kiertokulku on eräs elämälle keskeinen luonnon kiertokulku. Hiilellä on myös kemiallisesti mielenkiintoinen kyky sitoutua itseensä ja laajoin eri muodoin muihin alkuaineisiin muodostaen lähes 10 miljoonaa tunnettua yhdistettä. Kun hiili yhdistyy happeen, muodostuu hiilidioksidia, joka on äärimmäisen tärkeää kasveille. Riittämättömässä hapessa muodostuu hiilimonoksidia eli häkää. Kun hiili yhdistyy vetyyn, saadaan hiilivetyjä, jotka ovat oleellisia teollisuudelle fossiilisten polttoaineiden muodossa./1/

Monet tärkeät orgaaniset yhdisteet koostuvat hiilestä, vedystä ja hapesta. Sellaisia ovat esimerkiksi hiilihydraatit ja rasvahapot, jotka ovat oleellisia elämälle, sekä monet esterit, jotka antavat aromit monille hedelmille. Elävissä olennoissa esiintyy lukemattomia muitakin erilaisia hiilen yhdisteitä, joista monet sisältävät vielä muitakin alkuaineita, esimerkiksi typpeä tai fosforia. Hiili siis muodostaa maan elämän perustan./1/

Hiiltä esiintyy maapallolla myös kallioperässä etenkin karbonaatteina kuten kalsiumkarbonaattina eli kalkkikivenä (CaCO₃)./1/

Vapaana alkuaineena hiiltä esiintyy luonnossa ruskohiilenä, kivihiihenä, antrasiittina ja grafiittina, jonkin verran myös timantteina. Koksi on pyrolysoitua kivihiihtä. Puuta pyrolysoimalla (esim. tervanpolton yhteydessä) saadaan puuhiiltä eli *sysiä*, jota on vuosisatojen ajan käytetty sepäntyössä ja raudan valmistuksessa masuunissa, ja nykypäivänä grillihiilenä./1/

Hiiltä ei syntynyt alkuräjähdyksessä, koska sen synty tarvitsee kolmen alfahiukkasen (heliumytimen) törmäyksen, mikä on äärimmäisen epätodennäköistä ja universumi laajeni ja jäähdytti nopeasti. Sitä kuitenkin syntyy tähtien sisuksissa kolmi-alfa-prosessilla./1/

2.2. Aktiivihiihi

Aktiivihiihi on vedenpuhdistuksessa yleisin adsorbentti. Sitä on käytetty 1800-luvulta saakka, joten sen ominaisuudet tunnetaan hyvin, ja se on edullinen muihin adsorbenttimateriaaleihin verrattuna. /7/

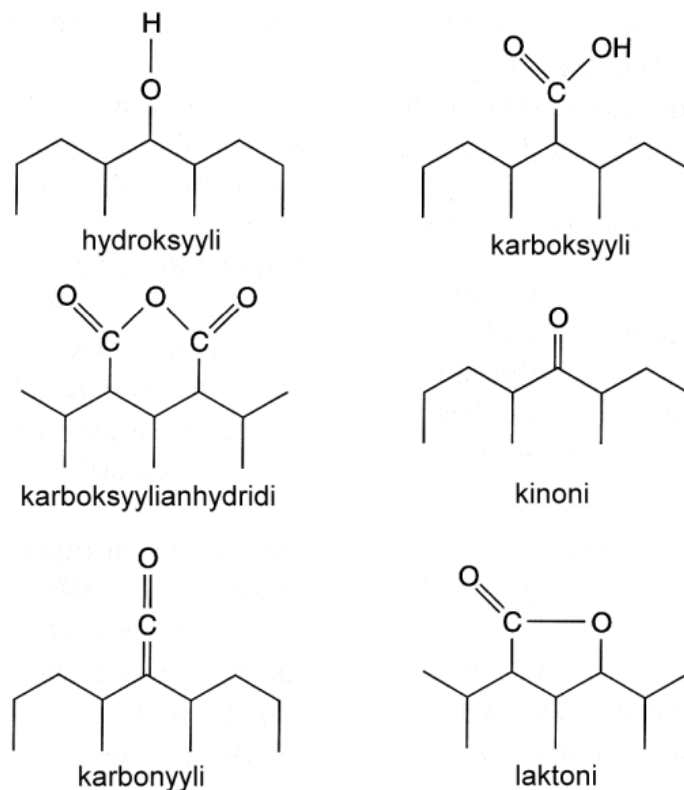
Aktiivihiihtä valmistetaan hiiltä sisältävästä materiaalista, kuten kivihiihestä, sahajauhosta tai pähkinänkuorista. Eri raaka-aineesta valmistetun aktiivihiihen adsorptio-ominaisuudet vaihtelevat. Esimerkiksi kivihiihestä valmistetun GAC:n huokoskoko on suurempi kuin kookospähkinän kuorista valmistetun, minkä seurauksena sen adsorptiokyky tetrasykliinien poistossa on parempi. /7/

Aktiivihiihen valmistusprosessi on kaksivaiheinen. Ensimmäinen vaihe on pyrolyysi. Pyrolyysissä hiiltä lukuun ottamatta kaikki muu materiaali palaa pois. Pyrolyysivaiheessa voidaan käyttää metallioksiedeja lisäämään huokosten muodostusta. Pyrolyysin jälkeen hiili yleensä vielä aktivoidaan hapettavan kaasun, esimerkiksi vesihöyryn avulla. Aktivoinnissa hiili hapettuu osittain, jolloin muodostuva hiilimonoksidikaasu synnyttää huokosia. Aktivointiaika vaikuttaa lopputuotteen huokoskokoon. Aktiivihiihen saanto raaka-aineesta on yleensä alle 50 %, joskus jopa alle 10 % . /7/

Kaupallisessa käytössä aktiivihiihi on yleensä joko puuteri- (PAC) tai rakeisessa muodossa (GAC). Panosadsorptiossa käytetään tavallisesti PAC:ta ja kiintopetikononissa GAC:ta. PAC on yleensä valmistettu sahanpurusta. /7/

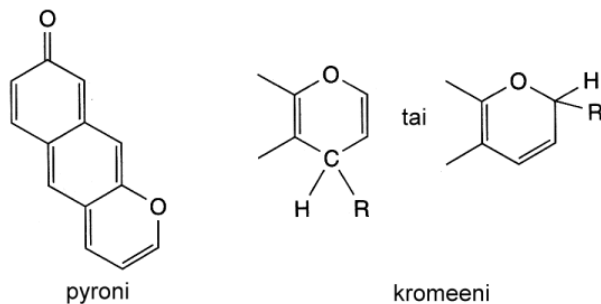
Aktiivihiilen erityispiirre muihin sorbentteihin verrattuna on, että sen pinta on pooliton tai vain hyvin heikosti polaarinen. Adsorptio tapahtuu pääasiassa van der Waals -voimien vaikutuksesta. Muodostuvat sidokset ovat heikkoja, ja siksi adsorboituneen aineen erotus aktiivihiilestä on helppoa eikä vaadi paljon energiaa. Aktiivihiili ei poolittomuudestaan huolimatta ole hydrofobinen, mutta heikosti polaariset tai poolittomat orgaaniset molekyylit adsorboituvat kuitenkin sen pinnalle huomattavasti tehokkaammin kuin vesi. /7/

Aktiivihiilen adsorptiokyky ei perustu yksin heikkoihin van der Waals -voimiin. Aktiivihiilen pinnalla esiintyy happamia ja emäksisiä ryhmiä. Näistä ryhmistä johtuen aktiivihiilen pinta ei ole täysin neutraali vaan voi varautua pH:n vaihdella. Ryhmien määrään voidaan vaikuttaa käsittelemällä aktiivihiiltä esimerkiksi hapolla. Happamia ryhmiä ovat eräät happea sisältävät ryhmät, esimerkiksi kuvassa 4 esitetyt karboksyyli-, kinoni-, hydroksyyli-, karbonyyli-, karboksyylianhydridi- ja laktoniryhmät. Hydroksyyli on näistä vahvin happo. /7/



Kuva1. Aktiivihiilen pinnan happamia kerroksia /7/

Siinä missä happamat ryhmät toimivat kationinvaihtimina, emäksiset ryhmät voivat osallistua anioninvaihtoreaktioihin. Aktiivihiilen emäksisiä ominaisuuksia ei vielä täysin tunneta. Mahdollisiksi emäksisiksi ryhmiksi on ehdotettu pyroni- ja kromeeni- eli bentsopyraani-ryhmiä, jotka on esitetty kuvassa 5. Vesiliuoksessa pyroniryhmän kinonihappiatomi voi protonoitua hydroksyyliksi. Happiatomi saa tällöin positiivisen varauksen. Pyronin rakenne mahdollistaa varauksen resonanssistabiloitumisen. Kromeeni vaatii protonin lisäksi happea muuttuakseen emäksiseen muotoonsa. Myös aktiivihiilen aromaattisten renkaiden Lewisemäsluonnetta on arveltu yhdeksi pinnan emäksisyyden aiheuttajaksi. Happea sisältäviin ryhmiin verrattuna aromaattiset renkaat ovat kuitenkin hyvin heikkoja emäksiä, eivätkä ne siten voi vaikuttaa kovin merkittävästi pinnan emäksisyyteen. Myös tyypeä sisältävät ryhmät ovat emäksisiä, mutta niiden muodostaminen aktiivihiileen ei ole lainkaan yhtä helppoa kuin happea sisältävien ryhmien. /7/



Kuva 2. Aktiivihiilen pinnan emäksisiä ryhmiä /7/

Aktiivihiilen ongelma on sen heikko regeneroitavuus. Adsorptiokyky ei täysin palaudu regeneroitaessa, joten koko adsorbentti on vaihdettava 15–20 regeneroinnin jälkeen [32]. Aktiivihiilen käyttöaika muihin adsorbentteihin verrattuna on siis lyhyt. Aktiivihiili voidaan regeneroida esimerkiksi pyrolyysillä. /7/



Kuva 3. Aktiivihiili/2/

3. ADSORPTIO

Adsorptiolla tarkoitetaan aineensiirtoprosessia, jossa kaasu- tai nestekomponentit erotetaan toisistaan saattamalla ne kosketuksiin jonkin kiinteän aineen pinnan kanssa. Adsorptio perustuu joidenkin kiinteiden aineiden (adsorbenttien) kykyyn ottaa pinnalleen (adsorboida) kaasuja ja nesteitä (adsorbaatteja). Adsorptiota käytetään useimmiten silloin kun adsorboitavan aineen pitoisuus kaasussa tai nesteessä on pieni./4/

Adsorptio voidaan ymmärtää niin, että kiinteän aineen pinnassa olevilla molekyyileillä on käyttämättömiä valenssi- tai muita vetovoimia, joilla ne voivat kiinnittää vieraita molekyyliä. Adsorption edellytyksenä on yleensä adsorboivan aineen suuri ominaispinta-ala. Kun paine ja lämpötila kasvavat, myös adsorptio kiinteän aineen pintaan kasvaa./4/

Kiintoaineen pinnalle tapahtuva adsorptio jaetaan kahteen ryhmään adsorboituvan aineen sitoutumistavan perusteella. Fysikaalisessa adsorptiossa eli fysiorptiossa adsorbaattimolekyylit sitoutuvat kiinteän aineen molekyyliin suhteellisen heikoilla van der Waalsin voimilla. Kemiaalisessa adsorptiossa eli kemisorptiossa adsorboitunut aine reagoi pinnan molekyylien kanssa. sitoutuminen tapahtuu siis kemiallisen sidoksen välityksellä./5/

3.1. Adsorptioisotermit

Tutkittaessa kaasun adsorptiota kiintoaineen pinnalle on tullut tavaksi kuvata adsorptioilmion kokeellisia tuloksia ns. adsorptiofunktiolla $v=v(T,p)$, jossa v on adsorboituneen kaasun tilavuus adsorboivan aineen massayksikköä kohti useimmiten 1 atm paineessa ja 0°C lämpötilassa riippumatta siitä missä lämpötilassa ja paineessa kokeet on suoritettu. Kun mittauksessa tutkitaan adsorption riippuvuutta paineesta tai konsentraatiosta vakiolämpötilassa, saadaan tulokseksi adsorptioisotermi $v=v(p)$, T vakio. Liuoksesta tapahtuvassa adsorptiossa puolestaan isotermi ilmoittaa adsorbaatin ainemäärän riippuvuuden liuoksen sisäkonsentraation c vakiolämpötilassa./5/

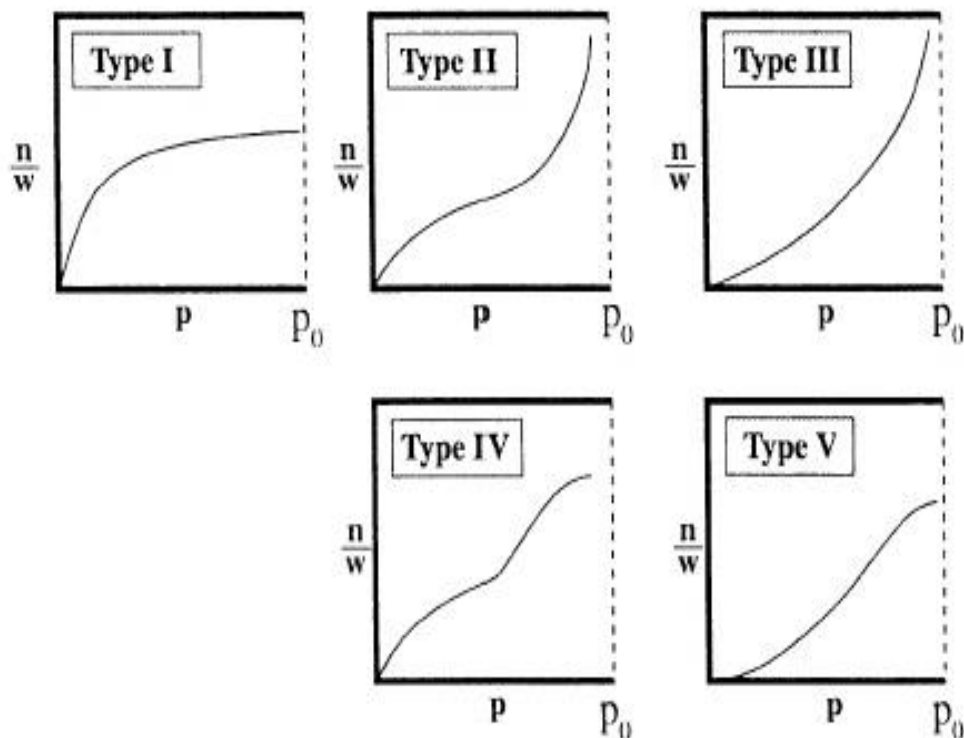
Adsorptioisotermit jaetaan viiteen ominaiseen ryhmään, jotka on esitetty kuvassa 4. Isotermityyppi I saadaan, kun kaasun adsorptio on kemisorptiota kiinteän aineen pinnalle. Isotermi kuvaa lähinnä monomolekulaarisen adsorbaattikerroksen muodostumista. Isotermiä kutsutaan Langmuir-tyyppiseksi isotermiksi. Se soveltuu myös kriittisen lämpötilan yläpuolella olevan kaasun fysisorptioon. Esimerkiksi typen adsorptio mikrohuokoiseen hiileen 77K lämpötilassa noudattaa tyyppiä I olevaa isotermiä. Isotermiin I tasanneosa kuvaa tasapainoa, jossa kiintoaineen mikrohuokokset ovat täydellisesti täyttyneet adsorboituvalla kaasulla, jolloin adsorption kasvu tulee vähäiseksi paineen kasvaessa. /5/

Kuvan 4 isotermityyppi II, joka usein on s-kirjaimen muotoinen, esittää fysikaalista monikerrosadsorptiota ei-huokoiseen adsorbenttiin. On huomattava, että ensin muodostuu kemisorptiolla tai fysisorptiolla ensimmäinen kerros ja vasta sen jälkeen pisteestä B alkaen tapahtuu adsorptio toiseen, kolmanteen jne. molekyylikerrokseen. Tämä isotermityyppi tapahtuu myös huokoiselle adsorboivalle aineelle, jos huokokset ovat kooltaan suuria verrattuna adsorbaattiin. Esimerkkinä isotermistä II on typen adsorptio 77K lämpötilassa alumiinioksidiin $Al_2O_3(s)$./5/

Isotermityypillä III näyttää monikerrosadsorptiota esiintyvän huomattavasti ennen kuin monomolekulaarinen kerros on täyttynyt. Adsorptiota monomolekulaarisessa kerroksessa ylläpitävät voimat ovat heikkoja. Esimerkkinä tyypistä III on bromikaasun $Br_2(g)$ adsorptio silikageelille 25...80°C lämpötiloissa./5/

Isotermit IV ja V ovat voimassa kaasuilla, jotka kondensoituvat helposti ja kun adsorbentti on melko huokoista. molemmat isotermit ovat irreversiibeilejä siinä mielessä, että isotermit, joka määritetään desorptiolle, on jonkin verran saman kaasun kokeellisen adsorptioisotermin yläpuolella vastaavassa paineessa. Ilmiötä kutsutaan adsorptiohysteriseksi. Sen otaksutaan johtuvan adsorbenttien huokosissa tapahtuvasta kapillaarikondensaatiosta. Tämä johtuu siitä, että kaasun kondensoituminen nestemäiseen tilaan tapahtuu huokosissa alemmassa kuin normaalipaineessa. Isotermin IV on havaittu pätevän mm. systeemeissä, joissa bentseenihöyry adsorboituu rauta(III)oksidigeeliin 50°C lämpötilassa. Esimerkkinä isotermin V tapauksesta on vesihöyryn adsorptio puuhiileen 100°C lämpötilassa. /5/

Adsorption tapahtuminen liuksesta kiintoaasiin esitetään usein käyttämällä samoja malleja kuin adsorptiossa kaasu/kiintoaasi. /5/



Kuva 4. Adsorptioisotermit I= Langmuir II= Freudlich III= BET IV= Kisliuk V= Henderson-Kisliuk /5/

3.2. Adsorptioon vaikuttavat tekijät

Adsorptiossa on kyse vuorovaikutusvoimista adsorbentin ja adsorbaatin välillä. Siksi merkittävin adsorption tehokkuuteen vaikuttava tekijä on näiden aineiden kemialliset luonteet, esimerkiksi polaarisuus. Kun adsorbenttina on aktiivihiili, pätee erilaisten aineiden adsorptiolle seuraavat pääsäännöt: /7/

- heikosti veteen liukeneva adsorboituu hyvin
- suurikokoiset molekyylit adsorboituvat paremmin kuin pienet, ellei
- huokoskoko rajoittaa adsorptiota
- hydroksyyli ryhmä heikentää adsorptiota
- aminoryhmä heikentää adsorptiota voimakkaasti
- sulfoniryhmä yleensä heikentää adsorptiota
- nitroryhmä parantaa adsorptiota
- aromaattiset yhdisteet yleensä adsorboituvat paremmin kuin
- alifaattiset
- ketjurakenne haaroittuneisuus tehostaa yleensä adsorptiota
- substituentin vaikutus riippuu sen asemasta (orto-, para-, meta-...)
- ionisoituva molekyyli adsorboituu hyvin heikosti.

Myös liuotin, johon adsorbaatti on liuenneena, vaikuttaa adsorptiotehokkuuteen. Mitä enemmän liuenneen aineen ja liuottimen kemialliset ominaisuuden muistuttavat toisiaan, sitä vaikeampaa erotus on. Esimerkiksi orgaanisen aineen poistaminen vesiliuoksesta on helpompaa kuin orgaanisesta liuottimesta. Toisaalta taas hydrofiilisten molekyylien poisto vesiliuoksesta on hankalaa. Kilpailevat adsorbaatit miehittävät adsorptiopaikkoja ja heikentävät siten halutun adsorbaatin kiinnittymismahdollisuuksia. Jätevesi voi monimutkaisena seoksena sisältää hyvin monia adsorptiopaikoista kilpailevia komponentteja. /7/

Koska adsorptio tapahtuu adsorbentin pinnalla, suuri ominaispinta-ala on edullinen adsorptiolle. Ominaispinta-alaa kasvattaa adsorbentin huokoisuus. Aktiivisesta pinta-alasta vain hyvin pieni osa on varsinaisesti ulkopinnalla, ja siksi huokoisuus vaikuttaa enemmän ominaispinta-alaan kuin esimerkiksi partikkelikoko. Esimerkiksi aktiivihiilen aktiivisista adsorptiopaikoista yli 99 % on partikkelin sisäosissa. /7/

Mikäli adsorboitavat molekyylit ovat suuria, adsorbentin huokoskoko on hyvin merkittävä. Suuret molekyylit eivät mahdu pieniin huokosiin, jolloin adsorptio rajoittuu vain adsorbentin pinnalle eikä ole tällöin kovin tehokasta. Toisaalta pienille adsorbaattimolekyyleille kannattaa valita adsorbentti, jonka huokoskoko on pieni. Tällöin adsorption selektiivisyys on korkea, sillä ainoastaan toivotut adsorbaattimolekyylit pääsevät kiinnittymään adsorptiopaikkoihin. /7/

Mikäli pH:n muutos saa adsorbaatin ionisoitumaan, pH vaikuttaa adsorptioon. Tämä on yleinen tilanne monilla antibiooteilla. Ionimuodossa adsorbaatit eivät miehitä adsorptiopaikkoja yhtä tiiviisti kuin sähköisesti neutraalissa muodossa, koska samanmerkkiset ionit hylkivät toisiaan. /7/

Myös adsorbentin pinnan varaus voi muuttua pH:n vaihdellessa. Jos adsorbaatti-ionien ja adsorbentin pinnan varaukset ovat erimerkkiset, on niiden välillä voimakas sähköinen vetovoima, joka tehostaa adsorptiota. Hyvin happamissa olosuhteissa on myös mahdollista, että adsorbentti hajoaa. /7/

Adsorptioon vaikuttaa myös operointilämpötila. Reaktionopeuden lämpötilariippuvuus noudattaa yleisesti Arrheniuksen yhtälöä. Lämpötilan nosto nopeuttaa desorptiota, sillä lämpötilan noustessa adsorboituneiden molekyylien värähtelyliike kiihtyy. Toisaalta myös adsorptionopeus kasvaa, sillä adsorbaattimolekyylit törmäävät todennäköisemmin kiintoaineen pintaan, kun niiden liike nestefaasissa kiihtyy. Veden puhdistuksessa lämpötila on yleensä alhainen ja pysyy melko vakiona, joten lämpötilan vaikutus voidaan jättää huomioimatta. /7/

Myös liuoksen ionivahvuus vaikuttaa adsorptioon. Liuoksen ionivahvuutta voidaan kasvattaa lisäämällä elektrolyyttejä. Esimerkiksi epäorgaanisia suoloja voidaan käyttää. Ionivahvuuden ollessa suuri antibioottien väliset hydrofobiset vuorovaikutukset voivat

kumota elektrostaattiset repulsiiviset voimat, jolloin antibiootit muodostavat aggregaatteja. Suuret aggregaatit eivät välttämättä mahdu adsorbenttien huokosiin, jolloin adsorptiokyky alenee. Toisaalta, jos aggregoituminen tapahtuu huokosissa, adsorptio voi nopeutua ja tehostua. Jos adsorboitava aine on ionimuodossa, vierekkäiset adsorboituneet ionit hylkivät toisiaan. Tätä hylkimisvoimaa voidaan heikentää liuoksen ionivahvuutta kasvattamalla. Liuoksen ionit, joilla on vastakkainen varaus, asettuvat adsorboituneiden ionien väliin, jolloin adsorbenttien pinta saadaan tiiviimmin täytettyä. /7/

3.3. Adsorbentit

Adsorbenttien valinnalla on suuri vaikutus adsorptioprosessin tehokkuuteen. Adsorbenttien tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa ominaispinta-ala, huokoisuus, huokoskoko, selektiivisyys ja kestävyys. Myös hinta on olennainen tekijä adsorbenttien valinnassa erityisesti silloin, kun adsorptio on osa vedenpuhdistusprosessia, jossa käsiteltävät virtausmäärät ovat hyvin suuria. Käyttökustannuksiin vaikuttaa myös adsorbenttien regeneroitavuus. Hankintahinnaltaan kallis mutta helposti regeneroitava, kestävä adsorbentti voi olla kokonaiskustannuksiltaan edullisin pitkän käyttöikänsä ansiosta. Adsorbenttien selektiivisyyteen vaikuttaa sen vapait, reaktiiviset ryhmät ja niiden taipumus muodostaa sidoksia halutun adsorbaatin kanssa. Lisäksi selektiivisyyteen vaikuttaa huokoskoko. /7/

Adsorbentti voi olla kemialliselta luonteeltaan poolinen tai pooliton. Voimakkaasti pooliset adsorbentit ovat hydrofiilisiä, eli ne sitovat yleensä enemmän vettä kuin poolittomia orgaanisia aineita, eikä niitä siksi voida soveltaa laajasti vedenkäsittelyssä. Poolisia adsorbentteja ovat useimmat zeoliitit, silikageeli ja aktivoitu alumiinioksidi. Poolittomista adsorbenteista yleisimmät ovat aktiivihiili ja piikalsiitti. Adsorptio poolittomalle pinnalle johtuu pääasiassa van der Waals -voimista. Sidosenergia on tällöin pieni, ja muodostuvat sidokset ovat heikkoja. /7/

Amorfisia adsorbentteja ovat mm. aktiivihiili, aktivoitu alumiinioksidi ja silikageeli. Amorfisten adsorbenttien ominaispinta-ala on tyypillisesti 200–1 000 m²/g. Aktiivihiilen ominaispinta-ala voi olla jopa 1 500 m²/g. Näin suuri ominaispinta-ala tarkoittaa kuitenkin, että fysikaalinen kestävyys on heikko. /7/

3.4. Adsorption teknisiä sovelluksia

- Adsorbaattina neste: Esimerkiksi orgaanisten aineiden värinpoisto ja kuivaus, raakavesien hajun-, maun- ja värinpoisto.
- Adsorbaattina kaasu: Esimerkiksi liuotinhöyryjen talteenotto, kuivaus, hajuja aiheuttavien kaasujen poisto./4/

3.5. Desorptio

Teollisesti suoritettava adsorptioprosessi muodostuu kahdesta vaiheesta: adsorptiosta ja desorptiosta. Desorptio on adsorptiolle käänteinen prosessi ja sitä voidaan sanoa myös adsorboivan aineen elvytykseksi, regeneroinniksi. Desorptiossa adsorboitunut aine poistetaan adsorboivan aineen pinnalta, jolloin adsorbaatti voidaan käyttää yhä uudelleen ja uudelleen./4/

Regenerointi voidaan suorittaa esimerkiksi

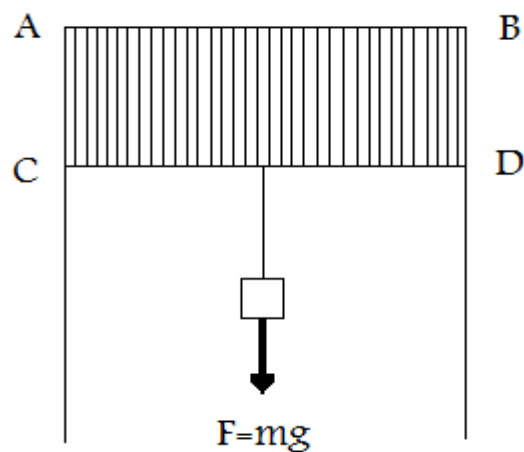
- kuumentamalla adsorbenttiä
- laskemalla systeemin painetta
- johtamalla inerttiä kaasua adsorbentin läpi
- johtamalla adsorbentin läpi helposti lauhtuvaa höyryä esimerkiksi vesihöyryä./4/

4. PINTAJÄNNITYS

Molekyylien välillä on vaikuttamassa lyhyen kantaman voimia, jotka molekyylien keskimääräisellä etäisyydellä ovat molekyyliä yhteen vetäviä. Liuoksessa jokaisen molekyylin ympärillä on naapurimolekyyliä molekyylien välisten voimien kantaman alueella keskimäärin pallosymmetrisesti, joten nettovoima molekyyliä kohti kumoutuu. Sen sijaan molekyylit, jotka ovat rajapinnalla, kokevat epäsymmetristen voimien nettovaikutuksen. Tämä epäsymmetrisyys voimatasapainossa aiheuttaa rajapinnalla oleviin molekyyliin vetoa liuoksen sisään. Näin tietty määrä molekyyliä poistuu pintafaasista liuokseen. /5/

Faasien välinen rajapinta pyrkii siis vetäytymään kokoon, ja siksi esimerkiksi nestepisarat tai kaasukuplat nesteessä pyrkivät pallon muotoisiksi. Pallon muoto edustaa tietyllä ainemäärällä minimipinta-alaa. Voidaan siis sanoa, että nesteen pinta käyttäytyy kuin jännitetty kalvo pyrkien tasapainossa pinta-alaltaan mahdollisimman pieneksi. Tätä nesteen ominaisuutta kutsutaan pintajännitykseksi./5/

Pintajännityksen käsitettä ja suuruutta neste/ilma rajapinnalla voidaan havainnollistaa kuvan 3 mukaisella laitteistolla. Kuvan metallikehys upotetaan pesuaineliuokseen, jolloin koe on helppo suorittaa. Lankakehikkoon muodostuva kalvo pyrkii vetäytymään kokoon, joten liikkuvaan lankaan CD on asetettava vastavoima $F=mg$, jotta se pysyisi paikallaan. Jos vastavoima tehdään tasapainovoimaa suuremmaksi, liikkuu lanka CD jatkuvasti alaspäin kunnes kalvo repeytyy. Jos vastavoima on tasapainovoimaa pienempi, vetäytyy kalvo kokoon häviten lopulta kokonaan. Tasapainoasema ei täten riipu langan asemasta eikä myöskään kalvon pinta-alasta ABCD, toisin kuin esimerkiksi jousella, jonka tasapainovoima on verrannollinen sen kuormittamattomasta asemasta laskettuun venymään. /5/



Kuva 5. Nesteen pintajännityksen mittauksen periaate. CD on metallilanka, joka kulkee kehikossa sivuja AC ja BD pitkin, m on lankaan ripustettu massa. Alueessa ABCD on lanka kehikossa nestekalvo/5/

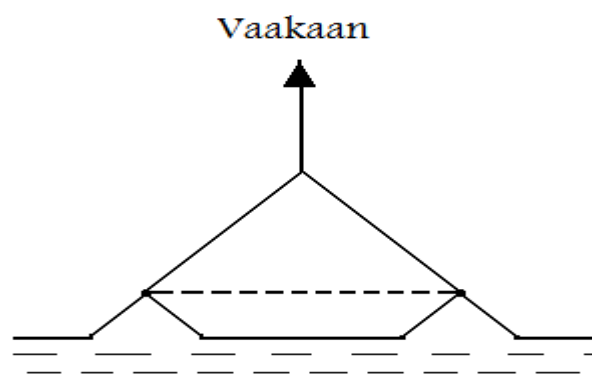
Myös neste/neste rajapinnalla on molekyylien välillä tietty voimavaikutusten epäsymmetrisyys, joka kuitenkin on huomattavasti heikompi kuin edellä kaasu/neste rajapinnalla. Kiinteällä aineella on pintajännitys mekaanisena voimana ongelmallinen. Sen mittaaminen ei ole suoraan mahdollista, mikäli pinnan molekyylit ovat täysin liikkumattomia./5/

4.1. Pintajännityksen mittaaminen

Pintajännityksen mittaamiseksi on useita erilaisia menetelmiä. Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat mm. mittausten tarkkuusvaatimus ja käytettävissä olevan aineen määrä. Tarkka lämpötilan säätö ja suurin mahdollinen puhtaus mittavälineiden ja kemikaalien osalta ovat ehdottomia vaatimuksia./5/

Tärkeimmät mittaussuunnitelmät ovat maksimikuplan painemenetelmä, liuoksen nousukorkeus kapillaariputkessa, ns. tippamenetelmä eli stalagmometrinen menetelmä sekä du Noüy'n tensiometri./5/

du Noüy'n Tensiometri on erikoisesti pintajännityksen mittaamiseen konstruoitu vaaka, jolla mitataan voima, joka tarvitaan nostamaan r-säteinen platinalangasta tehty rengas pois nestepinnalta. Rengasta ylösnostettaessa muodostuu sen pinnalle nestekalvo sekä sisä- että ulkoreunalle. Tämä kerros aiheuttaa renkaan painon kanssa samansuuntaisen ylimääräisen voiman. Renkaan irtoamishetkellä ovat voimat tasapainossa./5/

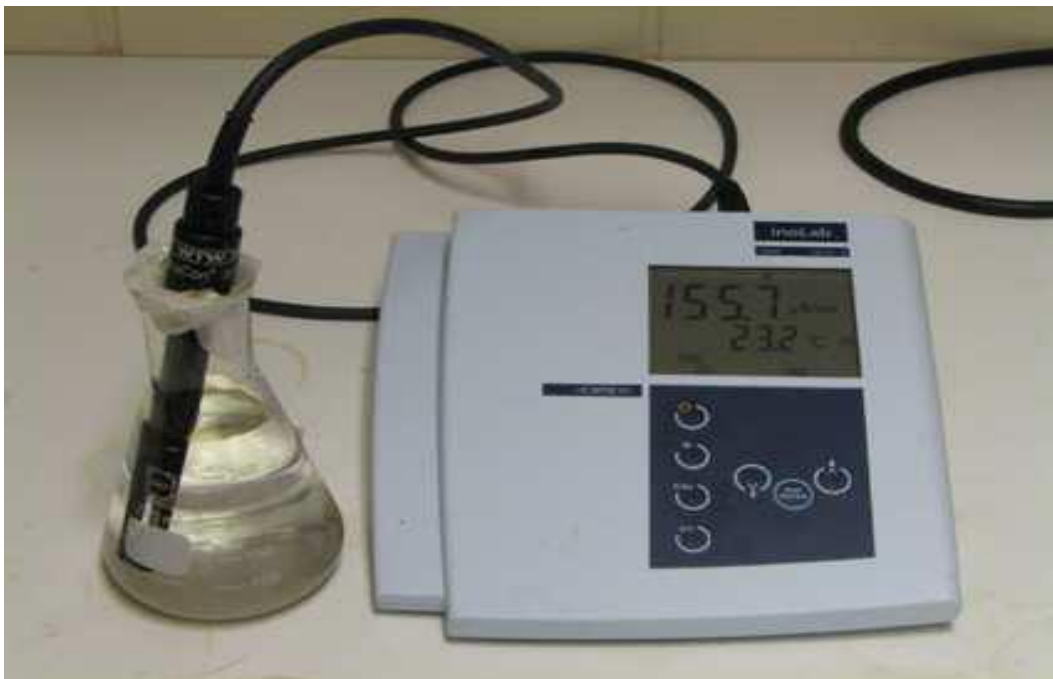


Kuva 6. Pintajännityksen mittaaminen du Noüy'n tensiometrillä, jossa platinarengas nostetaan nestepinnasta/5/

5. JOHTOKYKY

Liuksen kyky johtaa sähköä kuvaa sen sisältämien varauksellisten hiukkasten eli ionien määrää. Mitä enemmän ioneja on, sitä suurempi on myös sen johtokyky. Johtokyvyn yksikkönä on tavallisesti mikrosiemensää senttimetriä kohti ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Siemens puolestaan on konduktanssin yksikkö. Konduktanssi puolestaan on resistanssin käänteisarvo. Johtokyky on siis liuksen sähkövirralle aiheuttaman vastuksen käänteisarvo pituuden yksikköä kohti./6/

Tähän perustuu myös johtokykymittarin toiminta. Johtokykymittari on periaatteeltaan vastusmittari. Siinä on kaksi elektrodia, joiden välillä kulkee sähkövirta. Mitattavassa liuksessa olevat ionit vastustavat virran kulkua. Mitä enemmän liuksessa on ioneja, sitä suurempi on vastus. Johtokykymittari mittaa tämän vastuksen ja muuttaa tuloksen ohjelmallaan johtokykyarvoksi. Elektronien täytyy siis mittauksen aikana olla kokonaan mitattavassa liuksessa./6/



Kuva 7. Johtokykymittari/6/

Liuoksen johtokyky voidaan laskea, kun tunnetaan kyseisen liuoksen sisältämien ionien molaariset johtokyvyt (λ_m) ja konsentraatiot (c)./6/

Johtokyky saadaan tällöin kaavalla

$$K_{\text{liuos}} = \sum \lambda_{m,i} C_i \quad (1)$$

Liuoksen kokonaisjohtokyky on siis liuenneiden ionien molaaristen johtokykyjen ja konsentraatioiden tulojen summa.

Pienillä pitoisuuksilla mitattu johtokyky on moninkertainen laskettuun verrattuna. Tämä johtuu liuottimena käytetyn veden sisältämistä ioneista. Suurilla pitoisuuksilla tilanne on päinvastainen. Tämä johtuu analysoinnin yhteydessä tapahtuneista häviöistä sekä mahdollisesti myös siitä ettei ihan kaikki natriumkloridi liennut veteen./6/

6. TAITEKERROIN

Taitekerroin kuvaa sitä, miten aine vaikuttaa sähkömagneettiseen säteilyyn, toisin sanoen se kuvaa aineen optista tiheyttä. Taitekerroin riippuu materiaalista ja hieman myös sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudesta. /8/

Tyhjiön taitekerroin on yksi ja ilman taitekerroin on hieman yli yhden (noin 1,0003 normaaliolosuhteissa). /8/

Valon etenemisnopeus väliaineessa on kääntäen verrannollinen taitekertoimen reaaliinosaan. Taitekertoimen imaginääriosaa kertoo miten valo absorboituu eli muuttuu lämmöksi aineessa. Häviöttömän aineen taitekerroin on reaalinen. /8/

Kahden aineen rajapinnalla valon nopeus muuttuu, mistä johtuu myös valon taittuminen. Valon taittuminen riippuu väliaineiden taitekertoimista Snellin lain mukaisesti: tulo- ja

taitekulmien (α_1 ja α_2) sinien suhde on sama kuin aineiden taitekerrointen (r_1 ja r_2) suhteen käänteisarvo: /8/

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

Osa valosta kuitenkin aina myös heijastuu takaisin. Heijastuminen on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi taitekerroinmuutos rajapinnassa on. Kun valonsäde tulee optisesti tiheämmästä aineesta harvempaan tietyillä edellytyksillä tapahtuu kokonaisheijastus, jolloin kaikki valo heijastuu. Tämä tapahtuu sitä pienemmillä tulokulmilla, mitä suurempi on sen aineen taitekerroin, josta valo tulee rajapinnalle. /8/

Tavallisen ikkunalasin taitekerroin on 1,5, veden noin 1,3 ja eräiden raskaiden metallioksidien 2. Jalokivien taitekerroin on erityisen suuri, minkä vuoksi ne välkehtivät voimakkaasti. Useimmilla muilla kuin ferromagneettisilla aineiden aineella taitekerroin on suhteellisen permittiivisyyden neliöjuuri. Permittiivisyys on mitta aineen sähköiselle polarisoituvuudelle sähkökentässä. Tämä ei kuitenkaan päde aineille, joiden molekyylit ovat vahvasti poolisia kuten vesi, jonka suhteellinen permittiivisyys on noin 81, mutta taitekerroin 1,3. /8/

7. TYÖN SUORITUS

7.1. Näytteiden analysointi

Ensimmäiseksi tutkittiin, miten näytteitä voi analysoida luotettavasti.

Aluksi valmistettiin 1p-% perusliuokset litran mittapulloihin (liuottimena vesi) seuraaville yhdisteille:

- asetoni
- kloroformi
- hiilitetrakloridi
- metanoli
- etanoli
- tolueni
- moottoriöljy

Perusliuoksista tehtiin seuraavat laimennukset:

- 0.5 p-%
- 0.1 p-%
- 0.05 p-%
- 0.01 p-%

Kunkin yhdisteen laimennussarjoista analysoitiin pintajännitys ja taitekerroin. Kaikkiaan tehtiin määritykset $7 \cdot 5 = 35$ näytteelle. Jokaisesta mittauksesta suoritettiin toistot, eli yhteensä 70 mittausta/menetelmä.

7.2. Liuosten adsorptio

Seuraavaksi adsorboitiin ym. orgaanisten yhdisteiden vesiliuokset (1.0, 0.5, 0.1, 0.05, 0.01 p-%) aktiivihiileen.

1g aktiivihiiltä lisättiin Erlenmeyer-astiaan, jonka jälkeen lisättiin 50ml tutkittavaa liuosta. Astia suljettiin ja ravisteltiin aika ajoin 15 min ajan, jonka jälkeen annettiin seistä pöydällä 5 min. Tämän jälkeen näyte suodatettiin imusuppilolla ja saadusta suodoksesta mitattiin pintajännitys ja taitekerroin.

7.3. Etikkahapon adsorptio

Valmistettiin 100ml seuraavia etikkahappoliuoksia käyttämällä laimennusvetenä ionivaihdettua vettä

- 1 M
- 0.5 M
- 0.3 M
- 0.2 M
- 0.1 M
- 0.05M

Jonka jälkeen kustakin liuoksesta erotettiin 20ml ja laimennettiin ionivaihdetulla vedellä 100ml:aan. Laimennetuista liuoksista mitattiin johtokyvyt.

Tämän jälkeen erotettiin kutakin liuosta 50ml Erlenmeyer-astiaan ja lisättiin 1g aktiivihiiltä. Ravistelut ja toimenpiteet toistettiin, kuten kohdassa 6.2. Suodoksista erotettiin 20ml:n näytteet, jotka laimennettiin 100ml:aan ionivaihdetulla vedellä, jonka jälkeen näytteistä mitattiin johtokyvyt. Tämän jälkeen näytteet titrattiin NaOH-liuoksella käyttämällä fenolftaleiinia indikaattorina. Näytteille 1 M, 0.5 M ja 0.3 M käytettiin 1 M NaOH-liuosta ja muille 0.1 M NaOH-liuosta.



Kuva 8. Titrauksessa käytetty digitaalibyyretti, jonka tarkkuus on 0.01ml /6/

7.4. Epäorgaanisten yhdisteiden adsorptio

Valmistettiin 10g/l perusliuokset litran mittapulloihin (liuottimena vesi) seuraaville epäorgaanisille yhdisteille:

- NaCl
- Na₂SO₄
- HCl
- NH₃

Perusliuoksista tehtiin seuraavat laimennukset:

- 5 g/l
- 1 g/l
- 0.5 g/l
- 0.1 g/l

Tämän jälkeen kustakin liuoksesta erotettiin 20ml ja laimennettiin ionivaihdetulla vedellä 100ml:aan. Laimennetuista liuoksista mitattiin johtokyvyt.

Tämän jälkeen erotettiin kutakin liuosta 50ml Erlenmeyer-astiaan ja lisättiin 1g aktiivihiiltä. Ravistelut ja toimenpiteet kuten kohdassa 6.2. Suodoksista erotettiin tarkat 20ml:n näytteet, jotka laimennettiin 100ml:aan ionivaihdetulla vedellä, jonka jälkeen näytteistä mitattiin johtokyvyt.

Tässä kokeessa myös ionivaihdetulle vedelle tehtiin yllä olevat toimenpiteet.

7.5. Adsorptionopeus

Viiteen Erlenmeyer-astiaan lisättiin 1g aktiivihiiltä ja kaadettiin 50ml 0.5 M:sta etikkahappoliuosta päälle. Kutakin liuosta sekoitettiin magneettisekoittimella seuraavasti:

- liuos 1: 3min
- liuos 2: 5min
- liuos 3: 10min
- liuos 4: 15min
- liuos 5: 25min

Jonka jälkeen liuokset suodatettiin imusuppilolla. Suodoksista erotettiin 20ml:n määrät suodosta, jotka laimennettiin vesijohtovedellä 100ml:aan. Tämän jälkeen liuokset titrattiin 0.1 M NaOH-liuoksella fenolftaeinin värinmuutospisteeseen.

7.6. Aktiivihiilen regenerointi

Kaikki edellisessä kokeessa saadut ”kontaminoidut” aktiivihiilet kaadettiin astiaan, johon lisättiin 250ml puhdasta vesijohtovettä ja sekoitettiin magneettisekoittimella 15 min. Tämän jälkeen erotettiin vesi pois hiili-vesisuspensiosta suodattamalla imusuodattimella. Märkä suodatinpaperi + sen päällä oleva hiiliaines punnittiin tarkasti suodatuksen jälkeen. Tämän jälkeen kuivattiin uunissa (105°C, 1h), jonka jälkeen suoritettiin samanlaiset kokeet kuin kohdassa 6.5 aika-arvoilla 5min, 10min ja 15min.

7.7 Sokeriliuosten adsorptio

Valmistettiin 50g/l perusliuokset litran mittapulloihin seuraaville sokereille:

- sakkarooosi
- glukoosi

Perusliuoksista tehtiin seuraavat laimennokset:

- 30 g/l
- 20 g/l
- 10 g/l
- 5 g/l
- 1 g/l

Kummankin liuoksen laimennossarjoista mitattiin taitekertoimet.

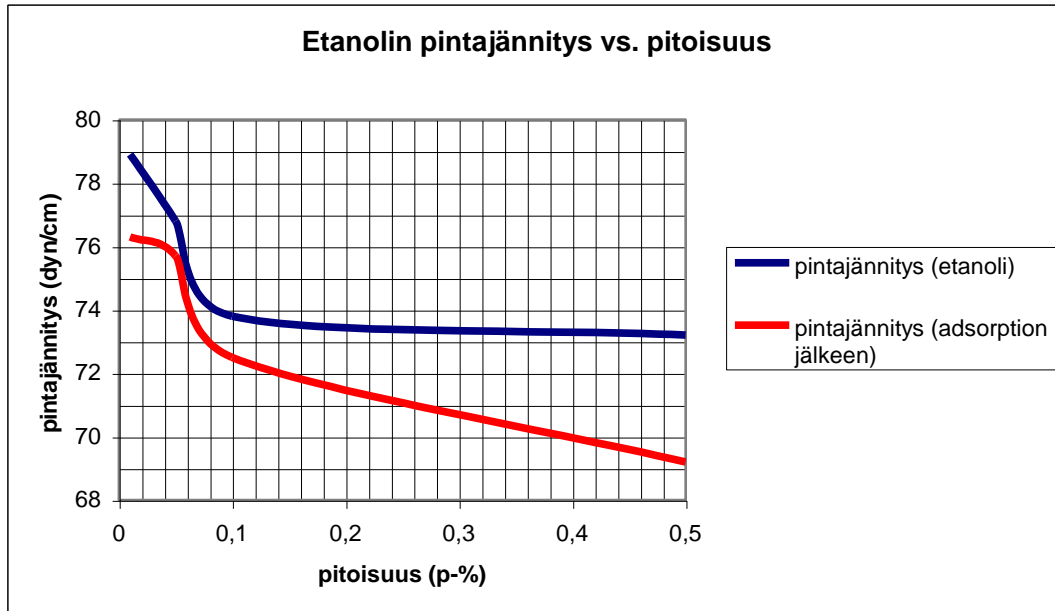
Tämän jälkeen erotettiin kutakin liuosta 50ml Erlenmeyer-astiaan ja lisättiin 1g aktiivihiihtä. Ravistelut ja toimenpiteet kuten kohdassa 6.2. Tämän jälkeen suodoksista mitattiin taitekertoimet.

8. MITTAUSTULOKSET

Kokeelliset tulokset nähdään kuvista 9...25.

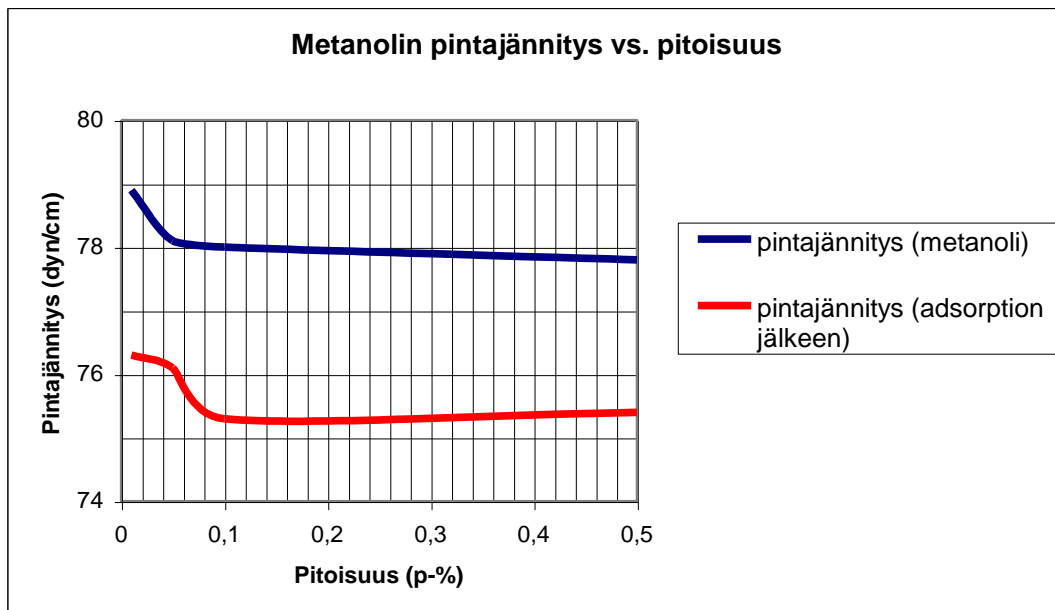
8.1. Orgaanisten yhdisteiden adsorptio

8.1.1. Etanolin adsorptio



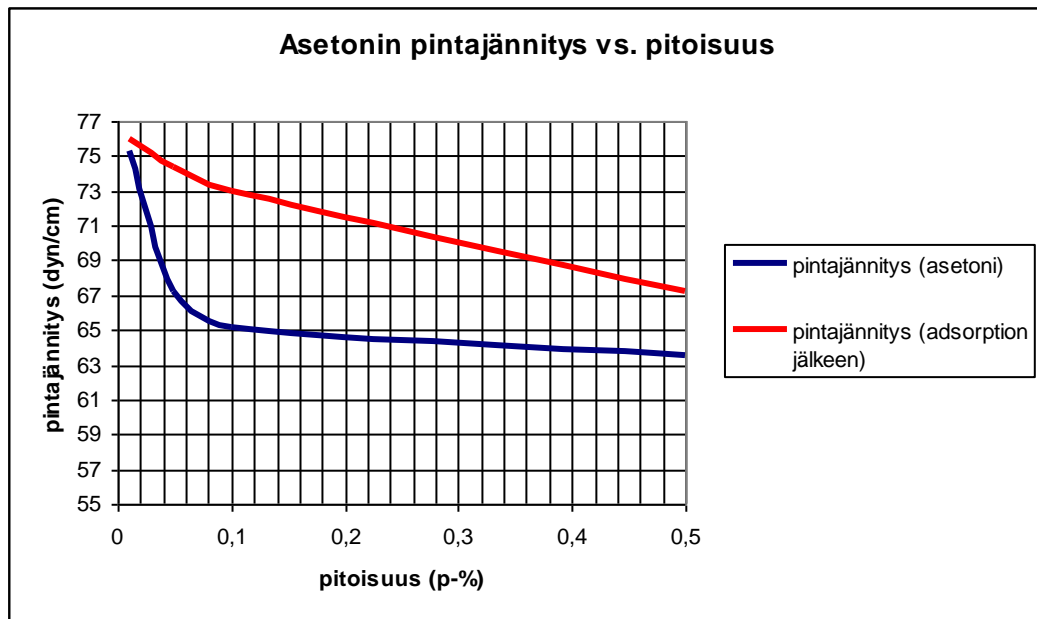
Kuva 9. Etanolin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.2. Metanolin adsorptio



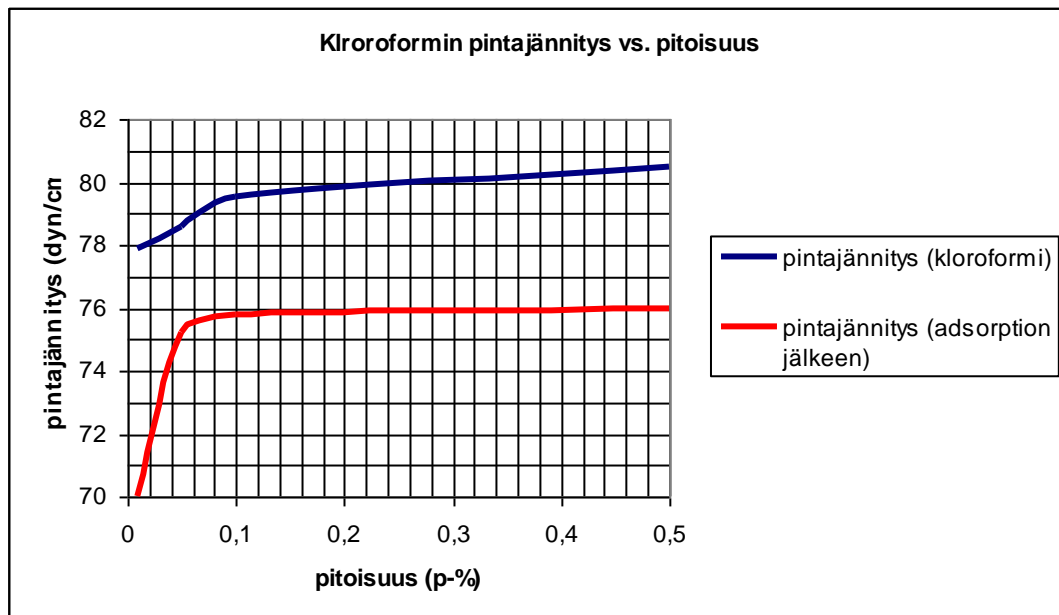
Kuva 10. Metanolin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.3. Asetonin adsorptio



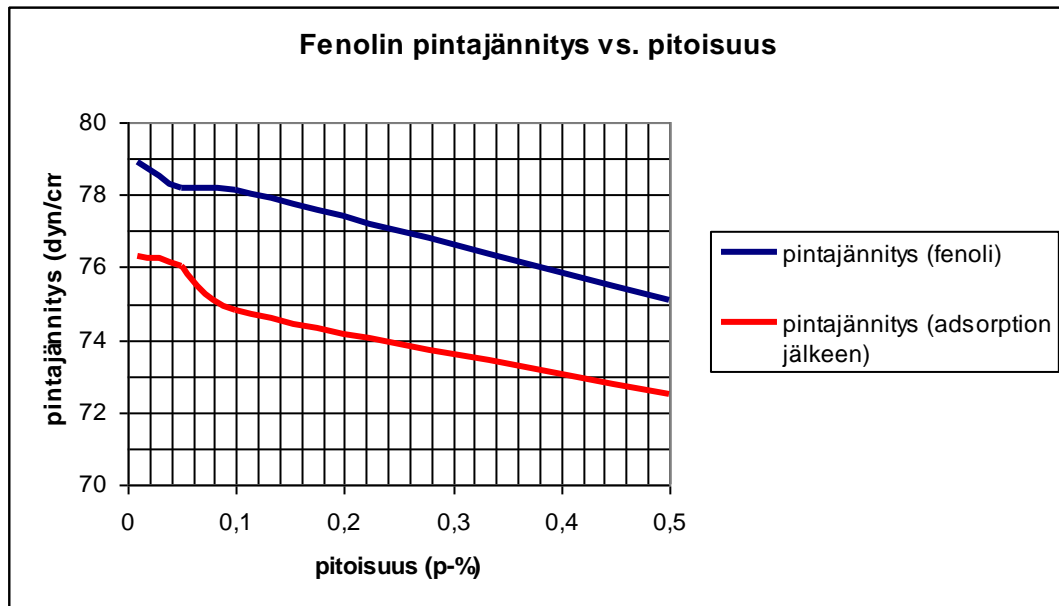
Kuva 11. Asetonin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.4. Kloroformin adsorptio



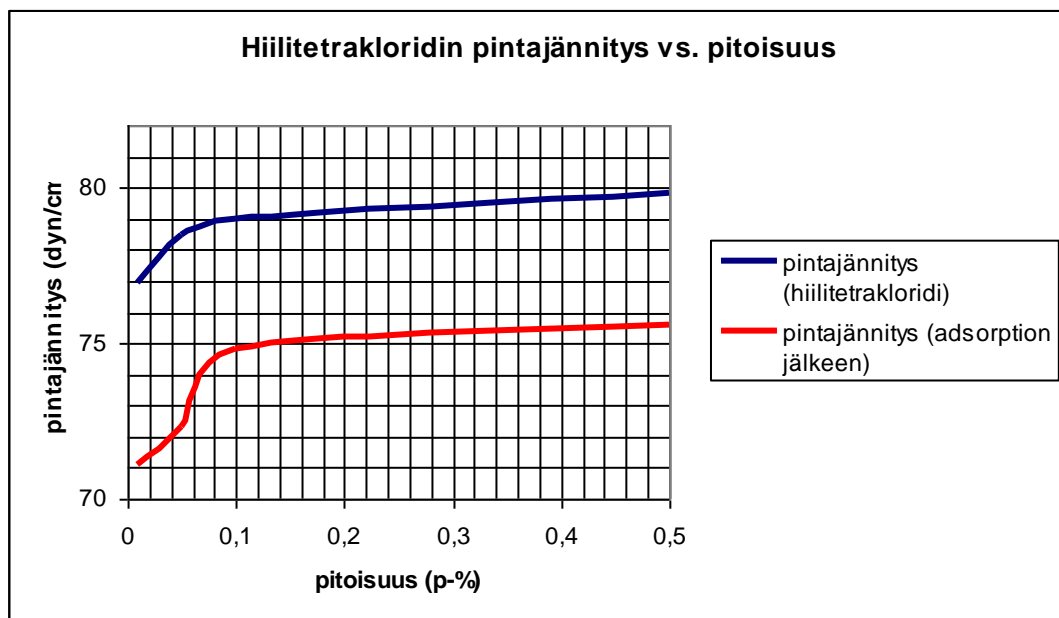
Kuva 12. Kloroformin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.5. Fenolin adsorptio



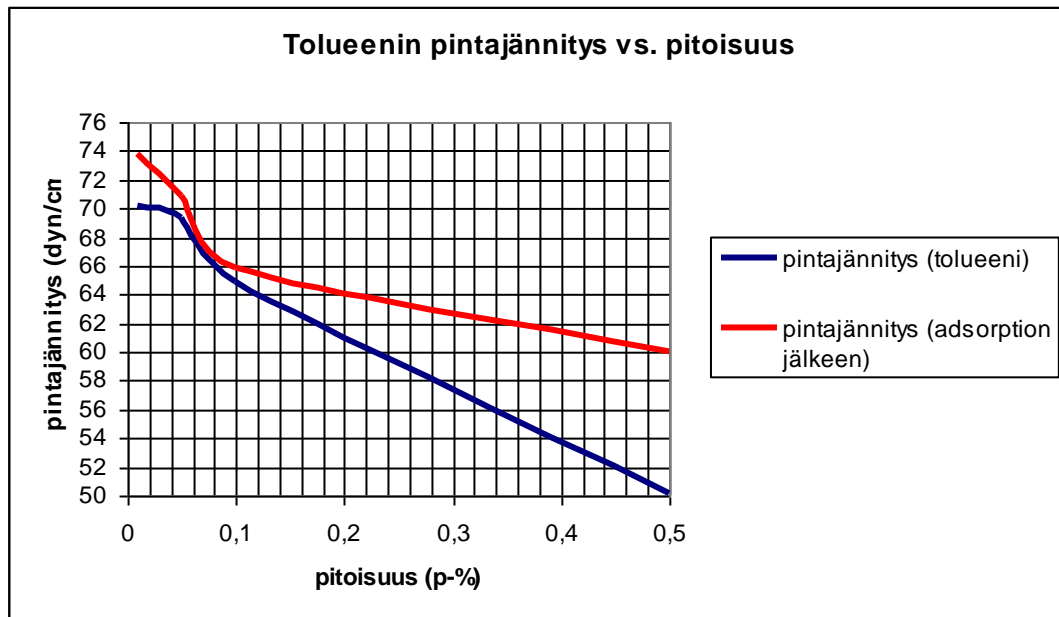
Kuva 13. Fenolin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.6. Hiilitetrakloridin adsorptio



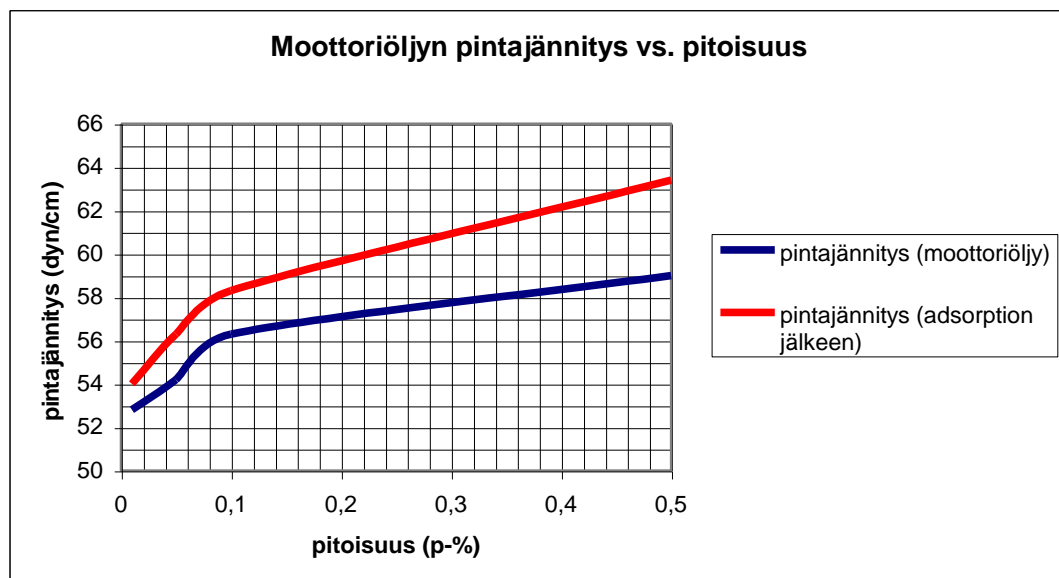
Kuva 14. Hiilitetrakloridin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.7. Tolueenin adsorptio



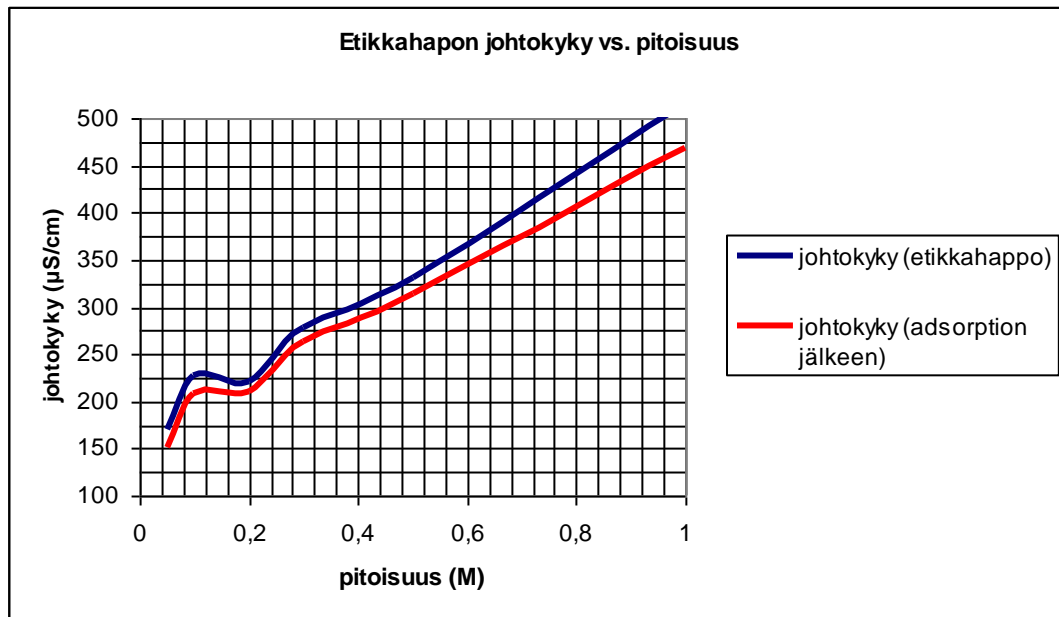
Kuva 15. Tolueenin vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.1.8. Moottoriöljyn adsorptio



Kuva 16. Moottoriöljyn vesiliuosten pintajännitykset pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

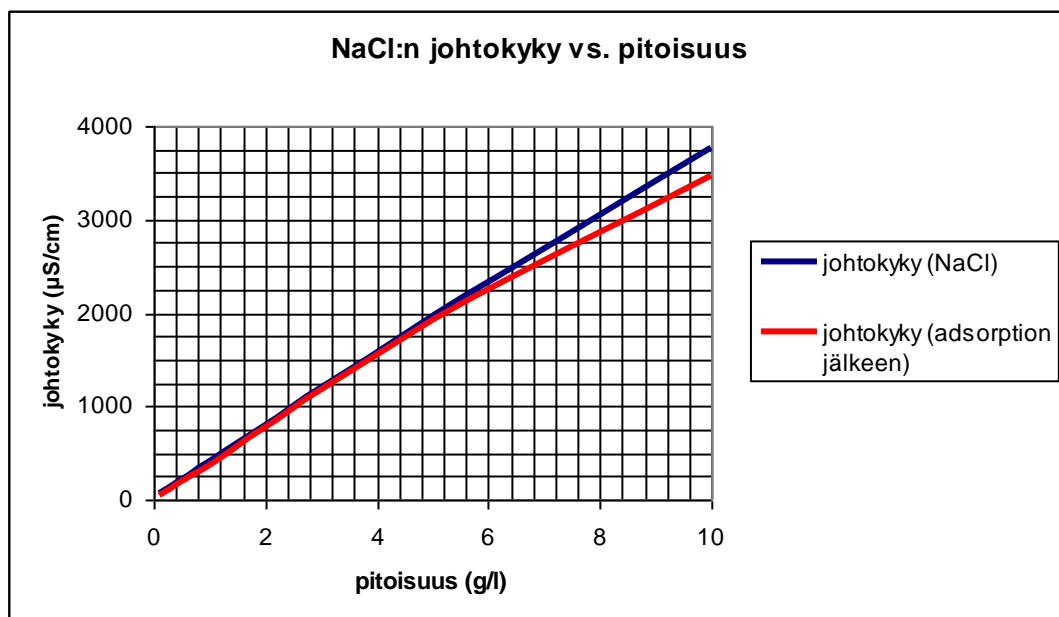
8.2. Etikkahapon adsorptio



Kuva 17. Etikkahapon vesiliuosten johtokyvyt pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

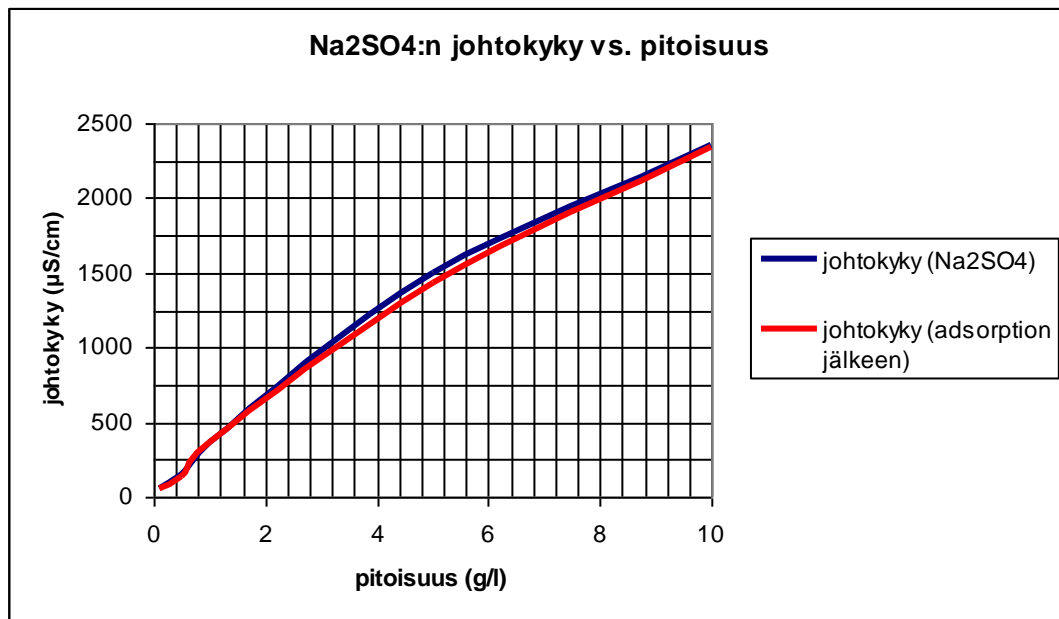
8.3. Epäorgaanisten yhdisteiden adsorptio

8.3.1. NaCl:n adsorptio



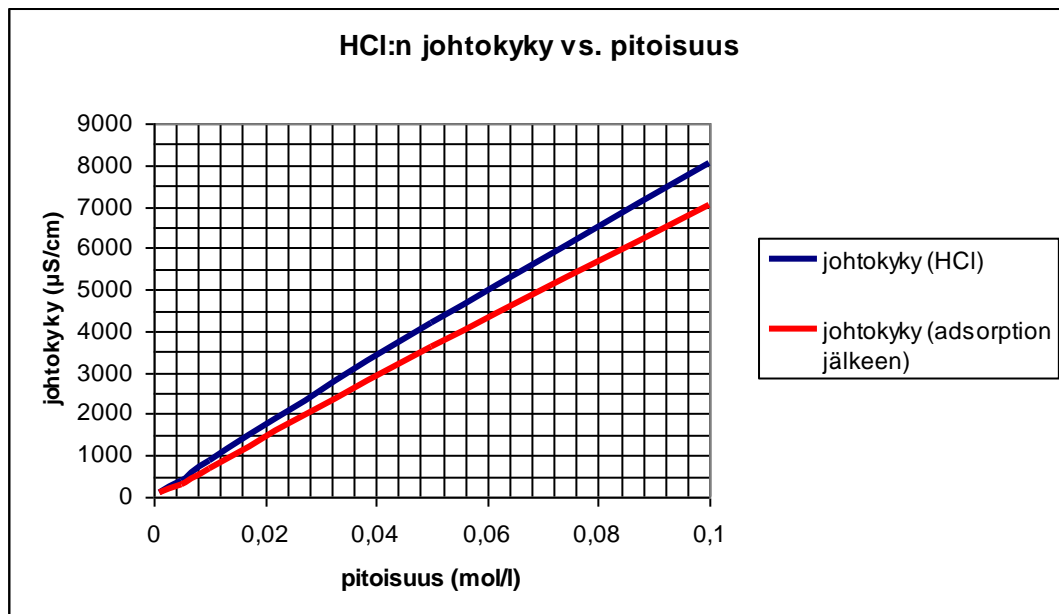
Kuva 18. NaCl:n vesiliuosten johtokyvyt pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.3.2. Na₂SO₄ :n adsorptio



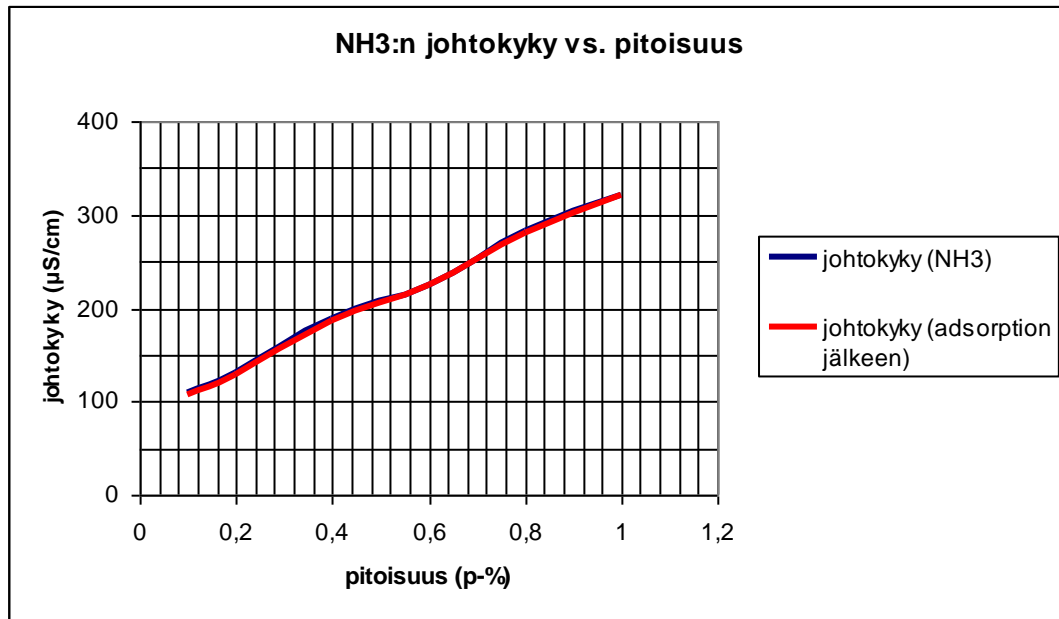
Kuva. 19 Na₂SO₄ :n vesiliuosten johtokyvyt pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.3.3. HCL:n adsorptio



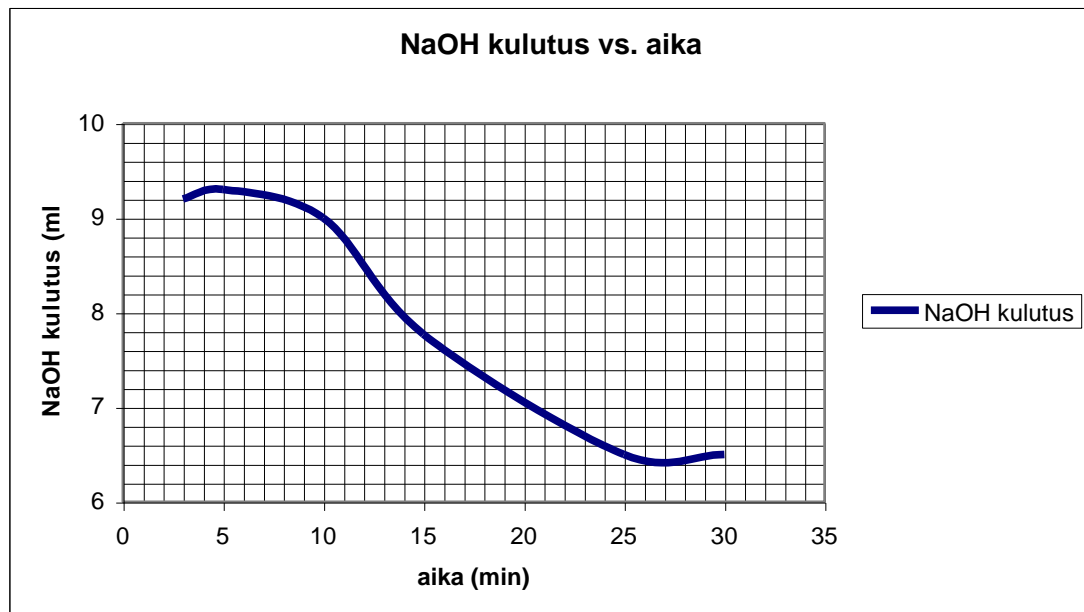
Kuva 20. HCL:n vesiliuosten johtokyvyt pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.3.4. NH₃:n adsorptio



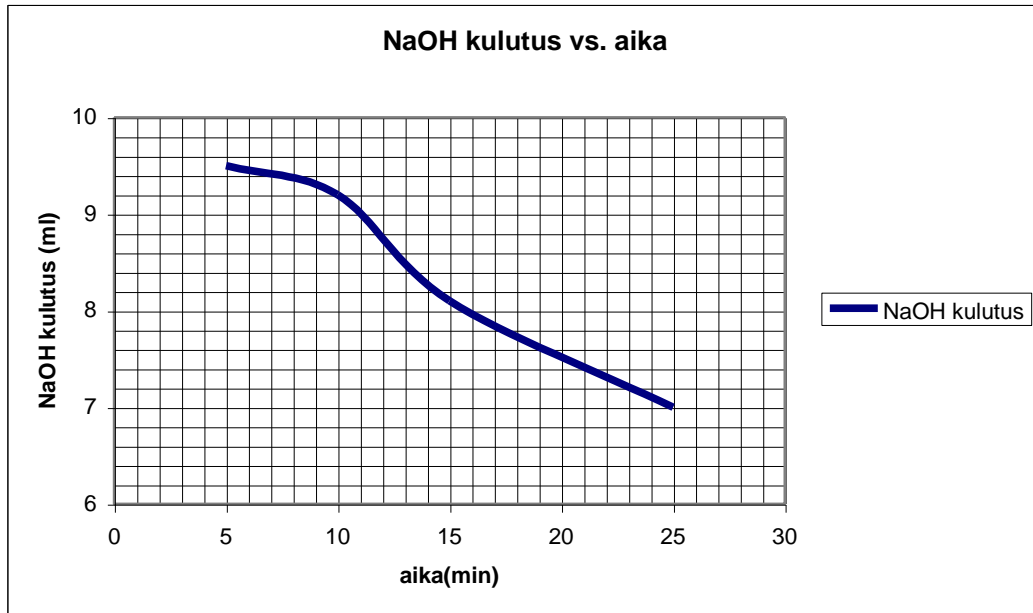
Kuva 21. NH₃ :n vesiliuosten johtokyvyt pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiliadsorption lämpötilassa 20 C.

8.4 Etikkahapon adsorptionopeus



Kuva 22. NaOH:n kulutus ajan funktiona

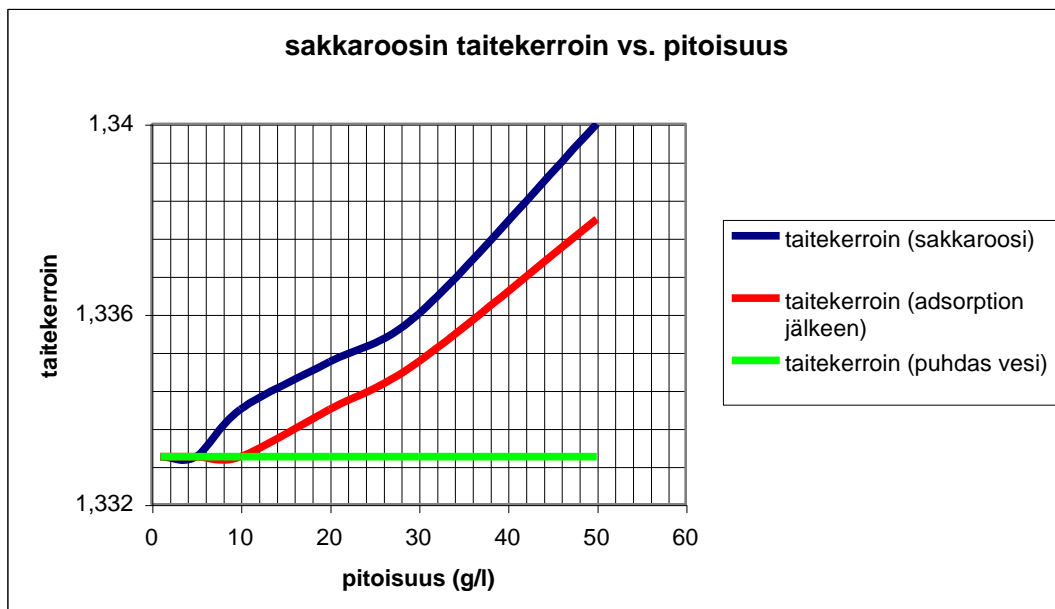
8.5. Aktiivihiilen regenerointi (vesipesu + uunikuivaus)



Kuva 23. NaOH:n kulutus ajan funktiona

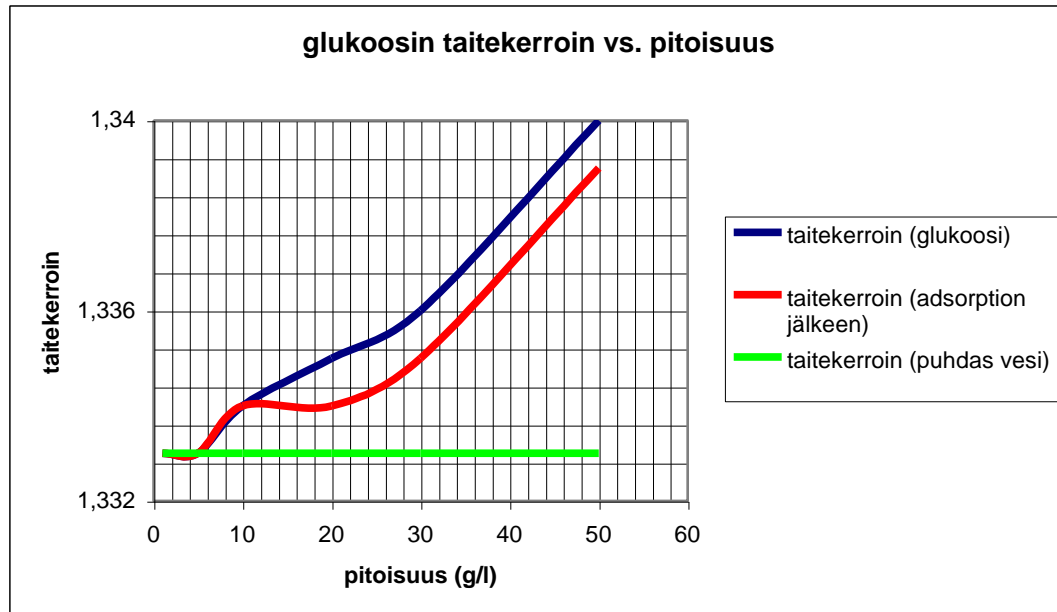
8.6. Sokeriliuosten adsorptio

8.6.1. Sakkaroosin adsorptio



Kuva 24. Sakkaroosin vesiliuosten taitekertoimet pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiiliadsorption lämpötilassa 20 C

8.6.2. Glukoosin adsorptio



Kuva 25. Glukoosin vesiliuosten taitekertoimet pitoisuuden funktiona ennen ja jälkeen aktiivihiliadsorption lämpötilassa 20 C

9. TULOSTEN ARVIONTI

9.1. Orgaanisten yhdisteiden adsorptio

Orgaanisten yhdisteiden adsorptiossa tuloksia verrataan puhtaan veden pintajännitykseen, jonka pintajännitys on 73dyn/cm.

9.1.1. Etanolin adsorptio

Tuloksista nähdään, että jo pieni määrä etanolia vedessä alentaa selvästi liuoksen pintajännitystä, mutta suuremmissa pitoisuuksissa pintajännitys vakioituu.

Adsorption jälkeen liuoksen pintajännitys laskee pienissä pitoisuuksissa melko maltillisesti, mutta suurimmissa pitoisuuksissa liuoksen pintajännitys laskee jopa alle puhtaan veden pintajännityksen, joten tulosta ei voida pitää kovin luotettavana.

9.1.2. Metanolin adsorptio

Tuloksista nähdään, että pieni pitoisuus metanolia nostaa melko paljon liuoksen pintajännitystä, mutta suuremmilla pitoisuuksilla pintajännitys tasaantuu n. 78 dyn/cm:n.

Adsorption jälkeen liuoksen pintajännitys laskee lähes veden pintajännityksen tasolle, joten voidaan olettaa, että adsorptio on ollut melko tehokas. Voidaan siis olettaa, että aktiivihiiliadsorptio metanoli/vesiliuokselle toimii, kun pitoisuus on alle 0,5 p-%.

9.1.3. Asetonin adsorptio

Tuloksista nähdään, että pieni määrä asetonia ei juurikaan vaikuta liuoksen pintajännitykseen, mutta suuremmat pitoisuudet laskevat liuoksen pintajännitystä melko paljon. Pienimmillään pintajännitys on 0,5p-%:ssa (n. 63dyn/cm) ja suurimmillaan 0,01p-%:ssa (n. 75dyn/cm)

Adsorption jälkeen huomataan, että pienimmissä pitoisuuksissa pintajännitys on noussut paikoin lähelle veden pintajännitystä, mutta suuremmissa pitoisuuksissa pintajännitys ei nouse yhtä paljon, joten tästä voidaan päätellä, että aktiivihiiliadsorptio asetoni/vesiliuoksessa toimii kun asetonin määrä vedessä on vähemmän kuin 0,2 p-%.

9.1.4. Kloroformin adsorptio

Tuloksista nähdään, että kloroformin lisäys veteen nostaa liuoksen pintajännitystä tasaisesti ylöspäin. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 78dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 80,5dyn/cm)

Adsorption jälkeen huomataan, että liuoksen pintajännitys on laskenut, eli adsorptiota on tapahtunut. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 70dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 76dyn/cm). Kaikkea kloroformia aktiivihiili ei saa adsorboitua pois, muuta kuin aivan pienimmissä pitoisuuksissa, mutta adsorboitumista tapahtuu kuitenkin melko hyvin vielä 0,5 p-% pitoisuudessa.

9.1.5. Fenolin adsorptio

Tuloksista nähdään, että pienillä pitoisuuksilla liuoksen pintajännitys on suurimmillaan (n.79 dyn/cm) ja, että pintajännitys lähtee laskemaan tasaisesti pitoisuutta lisättäessä (0,5 p-%:ssä pintajännitys n. 75 dyn/cm)

Adsorption jälkeen huomataan, että pintajännitys on laskenut. Pienimmillään pintajännitys on 0,5p-%:ssa (n. 73dyn/cm) ja suurimmillaan 0,01p-%:ssa (n. 76dyn/cm). Tuloksista huomataan, että adsorptiota tapahtuu melko tasaisesti kaikilla pitoisuuksilla.

9.1.6. Hiilitetrakloridin adsorptio

Tuloksista nähdään, että hiilitetrakloridin lisäys veteen nostaa liuoksen pintajännitystä. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 76dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 80dyn/cm).

Adsorption jälkeen huomataan, että pintajännitys on laskenut. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 70dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 76dyn/cm). Tuloksista huomataan, että aktiivihiiliadsorptio sopii hiilitetrakloridiliuokseen kun pitoisuus kun pitoisuus on alle 0,1p-%, mutta myös suuremmissa pitoisuuksissa aktiivihiiliadsorptio toimii melko hyvin.

9.1.7. Tolueenin adsorptio

Tuloksista nähdään, että tolueeni laskee veden pintajännitystä todella paljon. Pienimmillään pintajännitys on 0,5p-%:ssa (n. 50dyn/cm) ja suurimmillaan 0,01p-%:ssa (n. 70dyn/cm).

Adsorption jälkeen nähdään, että pienimmillä pitoisuuksilla ei paljoa tapahdu pintajännityksen muutosta, joten ei myöskään tapahdu adsorptiota, mutta suuremmilla pitoisuuksilla pintajännitys muuttuu todella paljon. Pienimmillään pintajännitys on 0,5p-%:ssa (n. 60dyn/cm) ja suurimmillaan 0,01p-%:ssa (n. 74dyn/cm). Tästä voidaan

päätellä, että tolueenin poisto vedestä aktiivihiiliadsorptiolla kannattaa kun tolueenin määrä vedessä on suuri.

9.1.8. Moottoriöljyn adsorptio

Tuloksista nähdään, että moottoriöljy laskee veden pintajännitystä todella paljon. Jo 0,01p-%:n lisäys laskee pintajännitystä todella paljon. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 53dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 80dyn/cm).

Adsorption jälkeen nähdään, että pienimmillä pitoisuuksilla ei paljoa tapahdu pintajännityksen muutosta, joten ei myöskään tapahdu adsorptiota, mutta suuremmilla pitoisuuksilla pintajännitys muuttuu melko paljon. Pienimmillään pintajännitys on 0,01p-%:ssa (n. 54dyn/cm) ja suurimmillaan 0,5p-%:ssa (n. 63dyn/cm). Tästä voidaan päätellä, että moottoriöljyn poisto vedestä aktiivihiiliadsorptiolla kannattaa kun moottoriöljyn määrä vedessä on suuri.

9.2. Etikkahapon adsorptio

Tuloksia verrataan puhtaan veden johtokykyyn joka on 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Tuloksista nähdään, että etikkahappo lisäämällä veden johtokyky nousee hieman. Pienimmillään johtokyky on 175 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0,1 g/l liuos) ja suurimmillaan 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (10 g/l liuos).

Adsorption jälkeen liuoksen johtokyky ei juurikaan muutu. Pienimmillään johtokyky on 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0,1 g/l liuos) ja suurimmillaan 475 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (10 g/l liuos), joten voidaan arvioida, että adsorptiota ei juurikaan tapahdu.

9.3. Epäorgaanisten aineiden adsorptio

Tuloksia verrataan ionivaihdetun veden johtokykyyn, joka on $0 \mu\text{S}/\text{cm}$.

9.3.1. NaCl:n adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään NaCl:ää, sen johtokyky kasvaa reilusti. Pienimmillään johtokyky on $55,6 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ g/l}$ liuos) ja suurimmillaan $3760 \mu\text{S}/\text{cm}$ (10 g/l liuos).

Adsorption jälkeen nähdään, että liuoksen johtokyvyille ei ole tapahtunut juuri mitään. Suurimmassa pitoisuudessa on tapahtunut hiukan muutosta, mutta kuitenkin niin vähän, että ei voida puhua vielä varsinaisesta adsorboitumista. Pienimmillään johtokyky on $50,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ g/l}$ liuos) ja suurimmillaan $3460 \mu\text{S}/\text{cm}$ (10 g/l liuos).

9.3.2. Na₂SO₄:n adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään Na₂SO₄:ää, sen johtokyky kasvaa reilusti. Pienimmillään johtokyky on $55,6 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ g/l}$ liuos) ja suurimmillaan $2350 \mu\text{S}/\text{cm}$ (10 g/l liuos).

Adsorption jälkeen nähdään, että liuoksen johtokyvyille ei ole tapahtunut mitään muutosta. Tulokset ovat käytännössä täysin samat kuin ennen adsobaatiota, joten voidaan sanoa, että adsorboitumista ei ole tapahtunut.

9.3.3. HCl:n adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään HCl:ää, sen johtokyky kasvaa reilusti. Pienimmillään johtokyky on $86 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,001 \text{ mol/l}$ liuos) ja suurimmillaan $8060 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ mol/l}$ liuos).

Adsorption jälkeen nähdään, että liuoksen johtokyvyille ei ole tapahtunut juuri mitään. Suurimmissa pitoisuuksissa on tapahtunut hiukan muutosta, mutta kuitenkin niin vähän, että ei voida puhua vielä varsinaisesta adsorboitumista. Pienimmillään johtokyky on $74,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,001 \text{ mol/l}$ liuos) ja suurimmillaan $7020 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ mol/l}$ liuos).

9.3.4. NH_3 :n adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään NH_3 :a, sen johtokyky kasvaa reilusti. Pienimmillään johtokyky on $108,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($0,1 \text{ p-}\%$ liuos) ja suurimmillaan $321 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($1 \text{ p-}\%$ liuos).

Adsorption jälkeen nähdään, että liuoksen johtokyvyille ei ole tapahtunut mitään muutosta. Tulokset ovat käytännössä täysin samat kuin ennen adsorboitumista, joten voidaan sanoa, että adsorboitumista ei ole tapahtunut.

9.4. Adsorptionopeus

Tuloksista nähdään, että ensimmäisessä kolmessa mittauspisteessä (3min, 5min ja 10min) ei tapahdu juuri minkäänlaista NaOH:n kulutuksen muutosta, joka tarkoittaa sitä, että adsorboitumista ei ole vielä näissä kohdissa tapahtunut.

Mittauspisteessä 15min huomataan, että NaOH:n kulutus on tapahtanut edellisestä mittauspisteestä, joten voidaan päätellä, että adsorptiota on tapahtunut.

Mittauspisteissä 25min ja 30 min ovat samat NaOH kulutukset, joten tästä voidaan päätellä, että adsorptiota ei enää tapahdu 25 minuutin jälkeen.

9.5. Aktiivihiilen regenerointi

Kun verrataan adsorptionopeus mittauksessa saatua käyrää aktiivihiilen regenerointi mittauksessa saatuun käyrään, huomataan, että tulokset ovat hyvin paljon samanlaiset. Regenerointikäyrässä on hieman suuremmat NaOH kulutukset, mutta kuitenkin niin lähellä adsorptionopeusmittauksen tuloksia, että voidaan sanoa, että aktiivihiilen voi regeneroida.

9.6. Sokeriliuosten adsorptio

Tuloksia verrataan ionivaihdetun veden taitekertoimeen, joka on 1,333

9.6.1. Sakkarosin adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään sakkaroosia, sen taitekerroin nousee. Suurimmillaan taitekerroin on pitoisuudessa 50g/l (1,340) ja pienimmillään pitoisuuksissa 1g/l ja 5g/l (1,333). Tuloksista nähdään myös, että pienimmät pitoisuudet (1g/l ja 5g/l) eivät vaikuta taitekertoimeen millään tavalla.

Adsorption jälkeen nähdään, että taitekerroin on laskenut hieman eli adsorptiota on siis tapahtunut. Suurimmillaan taitekerroin on pitoisuudessa 50g/l (1,338) ja pienimmillään pitoisuuksissa 1g/l, 5g/l ja 10g/l (1,333). Voidaan siis sanoa, että aktiivihiiliadsorptio toimii sakkaroosi/vesiliuokseen jonka pitoisuus on 10g/l tai vähemmän.

9.6.2. Glukoosin adsorptio

Tuloksista nähdään, että kun veteen lisätään glukoosia, sen taitekerroin nousee. Suurimmillaan taitekerroin on pitoisuudessa 50g/l (1,340) ja pienimmillään pitoisuuksissa 1g/l ja 5g/l (1,333). Tuloksista nähdään myös, että pienimmät pitoisuudet (1g/l ja 5g/l) eivät vaikuta taitekertoimeen millään tavalla.

Adsorption jälkeen nähdään, että taitekerroin on laskenut hieman eli adsorptiota on siis tapahtunut, mutta ei kuitenkaan yhtä paljon kuin sakkaroosi/vesiliuokselle. Suurimmillaan taitekerroin on pitoisuudessa 50g/l (1,339) ja pienimmillään pitoisuuksissa 1g/l ja 5g/l (1,333).

10. LÄHTEET

Lähteet

1. Wikipedian www-sivu [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.7.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Hiili>
2. Wikipedian www-sivu [verkkodokumentti]. [Viitattu 14.7.2009]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Aktiivihiili>
3. Anttila, A-M., Karppinen, M., Leskelä, M., Mölsä, H., Pohjakallio, M., Tekniikan kemia. 7.-8. painos. Helsinki: EDITA, 2005. 303s. ISBN 951-37-3738-1.
4. Pihkala, J., Prosessitekniikan yksikköprosessit. 3. tarkistettu painos. Helsinki: Hakapaino Oy 2003. 120s. ISBN 952-13-1820-1.
5. Kalliorinne, K., Kankaanperä, A., Kivinen, A., Liukkonen, S., Fysikaalinen kemia 3. Rauma: Oy Länsi-Suomi 1990. 189s. ISBN 951-26-3502-x

6. Järvinen, A. 2008. Voimalaitoksen prosessiveden analysointi [Verkkodokumentti]. Pori: Satakunnan ammattikorkeakoulu. [Viitattu 4.5.2010]. Opinnäytetyö, Satakunnan ammattikorkeakoulu, Tekniikka Pori, kemiantekniikan koulutusohjelma. 30 s. Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/696/Jarvinen%20Aki.pdf?sequence=1>
7. Ojanen, S. 2008. Antibioottien poisto vedestä adsorptiolla [verkkodokumentti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Viitattu 4.5.2010]. Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Kemiantekniikan koulutusohjelma. 58 s. Saatavissa: <https://oa.doria.fi/bitstream/handle/10024/38442/nbnfi-fe200805221434.pdf?sequence=3>
8. Wikipedian [www-sivu](http://fi.wikipedia.org/wiki/Taitekerroin). [Viitattu 4.5.2010]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Taitekerroin>