



UDK 541.183

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9828-9679>

MODIFIKATSIYALANGAN BENTONIT YORDAMIDA IFLOSLANGAN SUVDAN GUMIN KISLOTASINI ADSORBSIYALANISH TERMODINAMIKASI

Xandamova Dilnoza Kenjayevna

*Toshkent kimyo-texnologiyainstituti, katta o'qituvchisi, PhD,
Email: dilnozaxandamova3@gmail.com. Tel.: +998976161908*

Annotatsiya: Sanoat oqova suvlari tarkibida gumin kislotasining miqdori oshganida ifloslangan suv tarkibini pH ko'rsatkichi pasayib, kislotali muhit yaratilishi mumkin. Bu jarayon suv ekotizimlari uchun noqulay va potentsial xavfli bo'lib, undan suvda yashovchi organizmlar jiddiy ta'sirlanishi kuzatiladi. Kislotalanish natijasida suv organizmlarining fiziologik xususiyatlari, masalan, nafas olish, metabolism va minerallarning tanada saqlanishi kabi asosiy funksiyalarini buzilishi sodir bo'ladi. Tadqiqot ishida gumin kislota konsentratsiyasi 6 mg/L dan 90 mg/L gacha bo'lgan diapazonda, hajmi 0,1 g/L va harorat 293 K dan 313 K gacha oraliqda olib borildi va bu jarayonlarning samaradorligi va kinetik xususiyatlari baholandi. Tajribalar natijasida adsorbentlarning pH_{pzc} qiymatlari PBG uchun 6,28; TMAB uchun 6,56 va TEAB uchun 6,98 ga teng ekanligi aniqlandi. TEAB modifikatsiyalangan bentonit 313 K haroratda 73 mg gumin kislota adsorbsiyalanishi aniqlangan va bir xil 6 mg/L konsentratsiyada adsorbatni 89% gacha yo'qotilishini ko'rsatdi. Modifikatsiyalangan bentonitlar ustida gumin kislotaning maksimal adsorbsiyasi pH 3,5 da kuzatildi. Modifikatsiyalangan bentonitlarga gumin kislotasining adsorbsiyalanish termodinamik ko'rsatkichlari hisoblandi.

Kalit so'zlar: Gumin kislotasi, konsentratsiya, harorat, tajriba sharoiti, adsorbsiyalanish izotermasi, pH_{pzc}, termodinamik ko'rsatkichlar.

ТЕРМОДИНАМИКА АДСОРБЦИИ ГУМИНОВОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЫ МОДИФИЦИРОВАННЫМ БЕНТОНИТОМ

Аннотация: При увеличении количества гуминовых кислот в промышленных сточных водах показатель pH загрязненной воды может снизиться, создавая кислотную среду. Этот процесс является неблагоприятным и потенциально опасным для водных экосистем, и наблюдается серьезное воздействие на водные организмы. В результате закисления происходит нарушение основных физиологических функций водных организмов, таких как дыхание, метаболизм и удержание минералов в организме. В

исследовательской работе эксперименты проводились в диапазоне концентрации гуминовой кислоты от 6 мг/л до 90 мг/л, при объеме 0,1 г/л и температуре от 293 К до 313 К, и оценивались эффективность и кинетические свойства этих процессов. В результате экспериментов были определены значения pH_{pzc} адсорбентов: для PBG - 6,28; для ТМАВ - 6,56 и для ТЕАВ - 6,98. Было обнаружено, что модифицированный ТЭАБ бентонит адсорбирует 73 мг гуминовой кислоты при температуре 313 К и показывает, что при той же концентрации 6 мг/л адсорбат теряется до 89%. Максимальная адсорбция гуминовой кислоты на модифицированных бентонитах наблюдалась при pH 3,5. Рассчитаны термодинамические показатели адсорбции гуминовой кислоты на модифицированных бентонитах.

Ключевые слова: Гуминовая кислота, концентрация, температура, условия эксперимента, изотерма адсорбции, pH_{pzc} , термодинамические показатели.

THERMODYNAMICS OF HUMIC ACID ADSORPTION FROM CONTAMINATED WATER USING MODIFIED BENTONITE

Abstract: When the amount of humic acids in industrial wastewater increases, the pH of the contaminated water may decrease, creating an acidic environment. This process is unfavorable and potentially dangerous for aquatic ecosystems, and a serious impact on aquatic organisms is observed. As a result of oxidation, the main physiological functions of aquatic organisms, such as respiration, metabolism, and the retention of minerals in the body, are disrupted. In the research work, experiments were conducted in the humic acid concentration range from 6 mg/l to 90 mg/l, at a volume of 0.1 g/l and a temperature of 293 K to 313 K, and the effectiveness and kinetic properties of these processes were evaluated. As a result of the experiments, the pH values of the adsorbents were determined: for PBG - 6.28; for TMAB - 6.56 and for TEAB - 6.98. It was established that at a temperature of 313 K, 73 mg of humic acid is adsorbed on the bentonite modified by TEAB, and at the same concentration of 6 mg/L, up to 89% of the adsorbate is lost. The maximum adsorption of humic acid on modified bentonites was observed at a pH of 3.5. The thermodynamic indicators of humic acid adsorption on modified bentonites were calculated.

Keywords: Humic acid, concentration, temperature, experimental conditions, adsorption isotherm, pH, thermodynamic parameters.

KIRISH. So'nggi yillarda suv resurslarining yetishmovchiligi va sifatining pasayishi sezilarli darajada kuchaymoqda. Bu jarayon asosan sanoatlashuvning jadallashishi va aholi sonining oshishi bilan bog'liq [1]. Yuzaga kelayotgan vaziyatlar unga o'zaro bog'liq ekologik xavfsizlik muommolarini keltiribchiqarayapdi va ulardan eng jiddiylaridan biri suvni ifloslanishidir. Ushbu muammo zich aholi yashaydigan hududlarda ayniqsa dolzarb bo'lib, mahalliy sanoatning tezkor rivojlanishi atrof-muhitga salbiy ta'sir ko'rsatmoqda [2]. Xususan, intensiv ravishdagi sanoat faoliyati natijasida gumin kislotasi bilan bog'liq og'ir ekologik

muammolarga duch kelmoqda [3]. Ekologik buzilish jarayonida sezilmaydigan, biroq kuchli ta'sir ko'rsatadigan moddalardan biri gumin kislota. Uning nisbatan zararsiz ko'rinadigan nomi aslida suv ekotizimlariga kirganda yuzaga keladigan potensial xavflarni yashiradi. Gumin kislota asosan sanoat faoliyati, qishloq xo'jaligi drenaj suvlari va hatto maishiy chiqindilar orqali suv havzalariga tushadi. Natijada, suvning fizik-kimyoviy xususiyatlari o'zgarib, ekotizim barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin [4]. Gumin kislota suv havzalariga tushgach, ekologik tizimlarga sezilarli, ammo nozik ta'sir ko'rsatishni boshlaydi. U suvning pH muvozanatini buzib, muhitning kislotali tomonga siljishiga sabab bo'ladi. Bundan tashqari, gumin kislota suv ekotizimida allaqachon mavjud bo'lgan boshqa toksik moddalar ta'sirini kuchaytirishi va ularning zaharlilik darajasini oshirishi mumkin. Bu esa suv sifati va undagi organizmlar hayotiga salbiy ta'sir ko'rsatadi [5]. Mana shunday vaziyat mavjudligi sababli ushbu tadqiqotda modifikatsiyalangan bentonitlardan foydalanib, ifloslangan suvdan gumin kislota olib tashlash jarayonining termodinamik xususiyatlari o'rganildi. Adsorbsiyalanish jarayonining tabiati chuqur tahlil qilinib, asosiy termodinamik ko'rsatkichlar: entalpiya o'zgarishi (ΔH), entropiya o'zgarishi (ΔS) va Gibbs energiyasi (ΔG) hamda adsorbsiyalanish jarayonini aktivlanish energiyasi (E_a) hisoblandi. Shuningdek, adsorbent tomonidan gumin kislota adsorbsiyalanish mexanizmi ham izohlab berildi. Tadqiqot ekologik toza mahalliy bentonit asosidagi alkilammoniyli gil adsorbentlari yordamida suvdan gumin kislota samarali olib tashlashga qaratilgan ilmiy yondashuvlarni ishlab chiqishni maqsad qilgan.

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODLAR. Gumin kislota bilan bog'liq ifloslanishning salbiy ta'siri suv ekotizimiga cheklanmagan holda, hayotning boshqa o'zaro bog'liq tarmoqlariga ham tarqaladi. Bu jarayon, trofik zanjirlar orqali yirtqichlar va nihoyat, inson aholisining sog'lig'i va faoliyatiga ham muhim ta'sir o'tkazishi mumkin. Shuning uchun, gumin kislota tabiiy muhitga ta'sirini kamaytirish va uni samarali ravishda neytrallash yoki olib tashlash uchun ilg'or texnologiyalar va yangi materiallarni ishlab chiqish dolzarb masala sifatida qolmoqda [6]. Gumin kislota noto'g'ri boshqarilganda yoki to'g'ri zararsizlantirilmaganda inson salomatligiga jiddiy zarar yetkazishi mumkin. U teri, ko'z va nafas yo'llariga kuchli ta'sir ko'rsatib, allergik reaksiyalar va yallig'lanish jarayonlarini keltirib chiqarishi mumkin. Ayniqsa, uning bug'larini nafas orqali qabul qilish yoki konsentrlangan eritmalar bilan bevosita aloqa qilish nafas yo'llari, shilliq qavatlar va hatto ichki organlarga zarar yetkazishi ehtimoli yuqori. Bundan tashqari, uzoq muddatli ta'sir organizmning immun tizimiga bosim o'tkazishi va surunkali kasalliklarning rivojlanishiga sabab bo'lishi mumkin. Shu bois, gumin kislota foydalanishda xavfsizlik choralariga qat'iy rioya qilish va maxsus himoya vositalaridan foydalanish zarur [7]. Yuqori konsentratsiyadagi gumin kislota organizmlarda o'tkir toksiklik belgilari keltirib chiqarishi mumkin. Bunga qorin og'rig'i, qaytish, nafas olish qiyinlashuvi, metabolik asidoz va organlarning ishdan chiqishi kiradi [8]. Oqova suvlar va umuman suv resurslari tarkibidagi gumin kislota ajratib olishda tabiiy bioko'mirlar va yangi gil adsorbentlarni sintez qilish imkoniyatlari muhim ahamiyatga egadir. Bentonitlar geologik kelib chiqishiga ko'ra kimyoviy va mineralogik tarkibiga ko'ra turlicha

bo‘ladi. Ushbu tadqiqotda ishida adsorbent sifatida Navbahor gili (Navoiy, O‘zbekiston) ishlatilgan. Uning kimyoviy tarkibi 1-jadvalda keltirilgan, yonishdagi yo‘qotishning massa ulushi 14,06%. Bentonitning asosiy komponentini (70%miqdorda) montmorillonit minerali $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ tashkil etadi

1-jadval.

Bentonit kimyoviy tarkibi

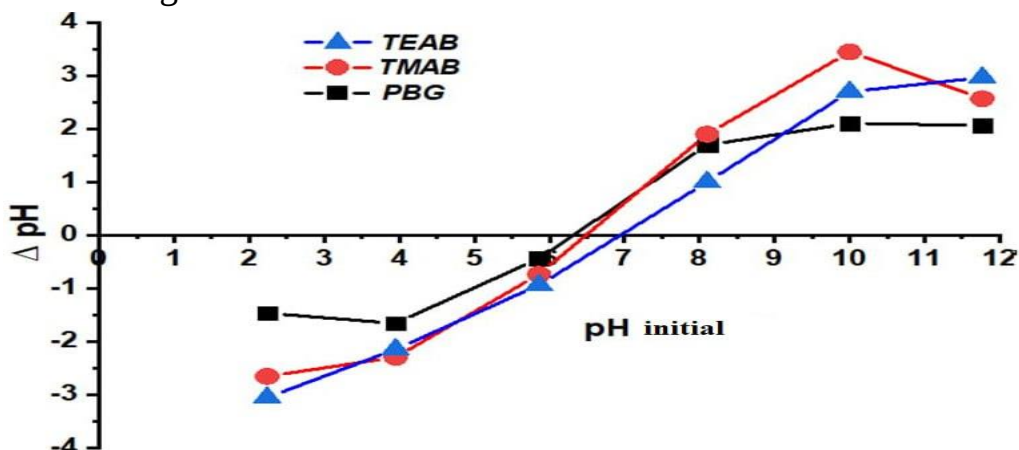
Element	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Miqdori (%)	13.56	6.5	56.3	0.61	3.76	0.69	0.98	0.98

Tadqiqot tajribalarini olib borishda toza reagentlardan foydalanildi. Eritma pH ni rostlash uchun tozaligi $\geq 99,6\%$ bo‘lgan NaOH eritmasi, adsorbat sifatida esa molekulyar massasi 226,14 g/mol va zichligi $d=1,049 \text{ g/sm}^3$ bo‘lgan gumin kislotasi ishlatildi. Gumin kislotasi 0,0001 dan 0,0015 M gacha bo‘lgan oldindan belgilangan konsentratsiyalarda olindi.

Tabiiy holatda Navbahor bentonitining adsorbsiya xossalari faol emas. Shuning uchun bentonitning adsorbsiya xususiyatlarini oshirish maqsadida uni kimyoviy jihatdan alkilammoniy kationlari bilan modifikatsiya qilindi. Modifikatsiyadan oldin bentonit xona haroratida quritiladi, so‘ngra distillangan suvda 24 soat davomida cho‘ktiriladi Hosil bo‘lgan suspenziya sentrifugallash orqali ajratiladi, ya’ni dispers fazasi (bentonit) disperslash muhitidan (suv) ajratib olinadi. Sinovlar uch marta takrorlanadi. Bentonit 105°C haroratda 8 soat quritiladi, maydalab 100-mesh o‘lchamli elakdan o‘tkaziladi. Bentonitning ion almashinish sig‘imi (CEC) 73,02 mg•ekv/100g ga teng. Alkilammoniyli bentonitlarni sintez qilishda 500 ml distillangan suvga 10 g bentonite qo‘shilgan va 2 soat aralashtirgich yordamida aralashtirilib suspenziya hosil qilindin. Bentonit suspenziyasiga trimetilammoniy gidrokslorid $(\text{CH}_3)_3\text{N}\cdot\text{HCl}$ va tretilammoniy gidrokslorid $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}\cdot\text{HCl}$ tuzlarining 0,03 N (100 ml distillangan suvda eritilgan) konsentratsiyali eritmalaridan qo‘shildi. So‘ng suv hammomida 60°C (333K) da 4 soat davomida 250 aylanish/daqiqada tezlikda doimiy aralashtirishirildi. Alkilammoniyli bentonitlar dispers muhitidan sentrifuga yordamida (harakat tezligi 1500 aylanish/daqiqa 10 daqiqada) ajratildi. Dastlab 24 soat davomida xona haroratida (293K), keyin esa 2 soat davomida 105°C (378K) haroratda mufel pechida quritilgan. Modifikatsiyalashda $(\text{CH}_3)_3\text{N}\cdot\text{HCl}$ va $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}\cdot\text{HCl}$ tuzlari bilan ishlov berilgan bentonitlar mos ravishda TMAB va TEAB deb nomlandi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA. Alkilammoniy bentonitlarning nol zaryad nuqtasini aniqlash va baholash. Adsorbent sirtidagi zaryad adsorbsiya sig‘imiga ionlar va zaryadlangan molekulalar uchun ta’sir qiladi. Alkilammoniy adsorbentlarning sirt zaryadini aniqlash uchun pH-metrik titrlash usuli qo‘llandi. Taxminan 100 mg alkilammoniy adsorbent 100 mL 0,1 M NaNO_3 eritmasida disperslanib, suspenziya hosil qilindi. Suspenziyaning pH qiymati 0,1 M HCl va 0,1 M NaOH eritmalaridan foydalanib sozlandi. Nol zaryad nuqtasi (pHpzc) adsorbentlar uchun, ayniqsa adsorbsiya va sirt kimyoviy jarayonlari kontekstida juda

muhim xossadir. Adsorbsiya jarayonlari materialning eritmadagi zaryadlangan moddalar bilan o‘zaro ta’sirini aniqlaydi. Adsorbentlarning nol zaryad nuqtasini (pHpzc) aniqlash ularning suvli eritmalar ichidagi ionlar, molekulalar va kolloidlar bilan o‘zaro ta’sirini hamda sirt zaryad xossalarini tushunish uchun muhimdir. pHpzc qiymati adsorbent sirtining qanday zaryadga ega ekanligi haqida asosiy ma’lumot beradi. Ushbu tadqiqotda PBG, TMAB va TEAB bentonitlarining nol zaryad nuqtasi baholandi. PBG, TMAB va TEAB adsorbentlarining pHpzc nuqtalari 1-rasmda keltirilgan.



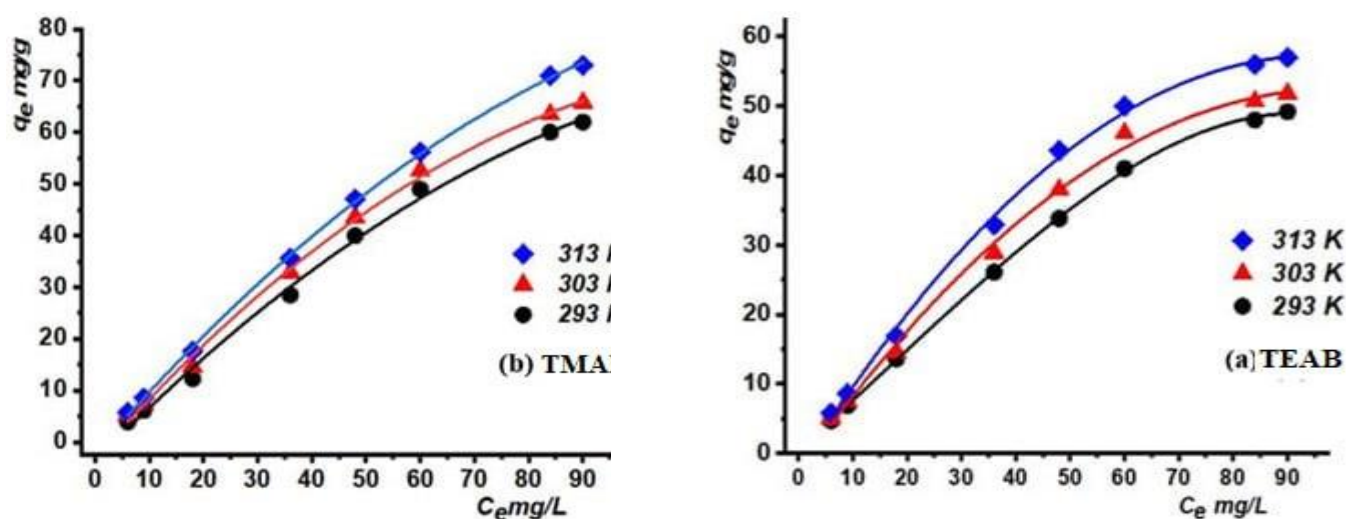
1-rasm. PBG, TMAB va TEAB adsorbentlarining nol zaryad nuqtasi pHpzc grafigi

Tajribalar natijasida adsorbentlarning nol zaryad nuqtasi (pHpzc) qiymatlari quyidagicha aniqlandi: PBG uchun 6.28, TMAB uchun 6.56 va TEAB uchun 6.98. Bu qiymatlar adsorbentlarning sirt zaryadining musbat ekanligini ko‘rsatadi, bu esa eritmadagi maqsadli moddalarning, jumladan metall ionlarining, samarali adsorbsiyasini ta’minlaydi. Shu bilan birga, trimetilammoniy (TMAB) va trietilammoniy (TEAB) kationlarining mavjudligi adsorbentlarning sirt zaryadini o‘zgartirib, ularning adsorbsiya xossalariga sezilarli ta’sir etganligi aniqlandi. Nol zaryad nuqtasi (pHpzc) materiallarning turli pH muhitidagi sirt zaryad xossalarini aniqlaydigan asosiy parametr hisoblanadi. Adsorbsiya jarayonining samaradorligini optimallashtirish uchun nol zaryad nuqtasini tushunish va uni to‘g‘ri aniqlash juda muhim ahamiyatga ega, chunki bu adsorbentning ishlash samaradorligi va uning maqsadli moddalarga bo‘lgan selektivligini baholashda asosiy rol o‘ynaydi.

Gumin kislotaning alkilammoniy bentonitlarga adsorbsiyasiga haroratning ta'siri.

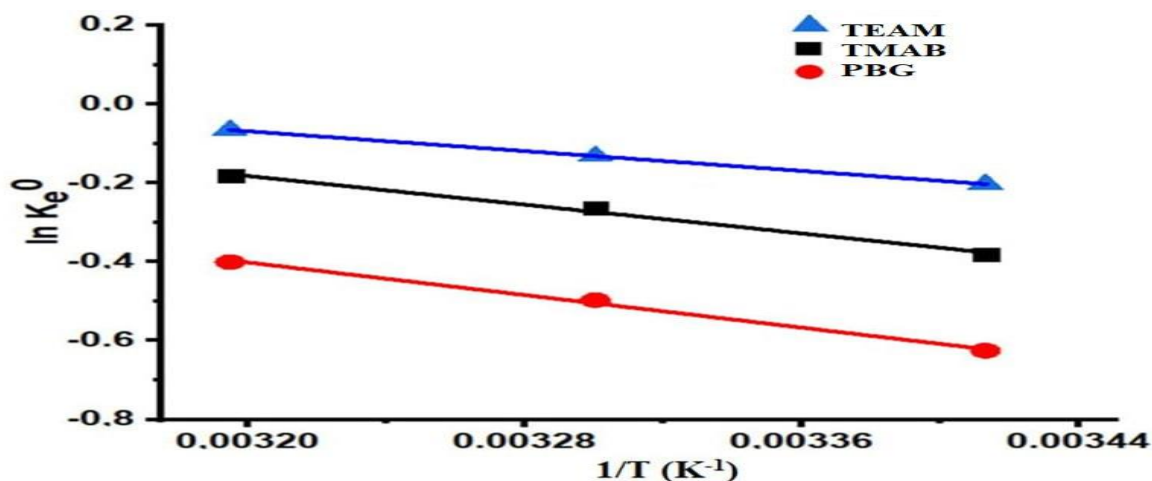
Gumin kislotaning modifikatsiyalangan bentonitlarga turli temperaturalarda adsorbsiya izotermsi 2-rasmda keltirilgan. Modifikatsiyalangan adsorbentlar ustida olib borilgan tajribalar natijasida, gumin kislotaning adsorbsiyalanishi haroratning oshishi bilan yaxshilangani aniqlandi. TEAB adsorbenti tomonidan adsorbsiyalanadigan gumin kislotaning miqdori 293 K da 62 mg/g dan 313 K da 73 mg/g ga oshdi. Bu holat, haroratni oshirish bilan adsorbent poralariga zarrachalar diffuziyasi tezligining ortganligini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, bu gumin kislotaning bentonit tomonidan adsorbsiyalanishi endotermik jarayon ekanligini tasdiqlaydi, ya’ni jarayon uchun issiqlik energiyasining sarflanishini talab qiladi [9]. Turli haroratlarda olib borilgan tadqiqot natijalariga ko‘ra, bentonitlarga gumin kislotaning adsorbsiyalanishi jarayonida sezilarli o‘zgarishlar kuzatilmadi ($p > 0,05$; t-test). Bentonitning asosiy kimyoviy

formulasi $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ko‘rinishida bo‘lib, u kengayadigan strukturaviy silikat turiga mansubdir. Faol adsorbsiya markazlarining kuchi va tabiati esa O–H guruhidagi kislorod atomining umumlashtirilmagan elektron juftlari orqali kislotali moddalar bilan o‘zaro ta’sirlashuv natijasida o‘zgaradi [10]. Olib borilgan tajriba natijasida 6 mg/L gumin kislota konsentratsiyasida TEAB tomonidan 89%, TMAB tomonidan 79% va PBG tomonidan 68% gumin kislota adsorbsiyalanishi aniqlandi. Gumin kislota konsentratsiyasi oshganda, adsorbentlarning faol markazlari to‘yinganlikka erishganligi sababli adsorbsiyalanish miqdori kamayadi. Bu holat, tekshirilgan adsorbentlar uchun past konsentratsiyadagi gumin kislotaning adsorbsiyalanish darajasining yuqori bo‘lishini ko‘rsatadi [11].



2-rasm. Turli haroratlarda TMAB va TEAB bentonitlariga gumin kislotasining adsorbsiyalanish izotermasi

Tadqiqot natijalari asosida modifikatsiyalangan bentonitlarga gumin kislotaning adsorbsiyasining aktivlanish energiyasi (E_a) aniqlandi va TMAB hamda TEAB adsorbentlari uchun aktivlanish energiyalari qiymati mos ravishda 17,44 kJ/mol va 12,03 kJ/mol ga teng ekanligi topildi. Bu aktivlanish energiyasi qiymatlari adsorbsiyalanish jarayonining fizik tabiatga ega ekanligini ko‘rsatadi. E_a ning musbat qiymatlari esa temperaturani oshirish bilan adsorbsiya reaksiyasining tezlashganligini tasdiqlaydi, bu holat adsorbsiyaning endotermik jarayon ekanligini anglatadi [12]. Agar aktivlanish energiyasi (E_a) ning qiymati $E_a < 40$ kJ/mol bo‘lsa, bu fizik adsorbsiya sodir bo‘layotganligini ko‘rsatadi. Agar $E_a > 40$ kJ/mol bo‘lsa, jarayon asosan kimyoviy adsorbsiyaga xos bo‘ladi. Ion almashinish orqali sodir bo‘ladigan adsorbsiya esa odatda 24 dan 40 kJ/mol gacha bo‘lgan E_a oralig‘ida kuzatiladi [13]. E_a ning manfiy qiymatlari esa adsorbsiya reaksiyasining endotermik xarakterga ega ekanligini anglatadi.



3-rasm. PBG, TMAB, TEAB adsorbentlariga gumin kislotasining adsorbsiyalanishida $\ln K_{e0}$ va $1/T$ ning bog‘liqligi

PBG, TMB va TEB bentonitlarida gumin kislotasining adsorbsiyalanish $\ln K_{e0}$ ni $1/T$ ga bog‘liqligi 3-rasmida keltirilgan. Adsorbsiyalanish jarayonining termodinamik kattaliklari 2-jadvalda keltirilgan bo‘lib, adsorbsiyalanish uchun Gibbs energiyasining o‘zgarishi (ΔG°) manfiy qiymatga ega. Bu holat adsorbsiya jarayonining spontan tabiatga ega ekanligini ifodalaydi.

2-jadval

Alkilammoniyli adsorbentlarga gumin kislotasining adsorbsiyalanish termodinamik kattaliklari

Adsorbents	Temperature(K)	K_L	ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/molK)	E_a (kJ/mol)	R^2
PBG	293	0.535	-1.52				
	303	0.608	-1.25	8.588	0.0241	19.78	0.992
	313	0.671	-1.04				
TMAB	293	0.683	-0.93				
	303	0.768	-0.66	7.577	0.0227	17.44	0.984
	313	0.833	-0.47				
TEAB	293	0.816	-0.49				
	303	0.876	-0.33	5.226	0.0161	12.03	0.996
	313	0.936	-0.17				

Adsorbsiyalanish jarayonining entalpiyasi (ΔH°) jarayon davomida ajralib chiqadigan yoki yutiladigan energiya miqdorini aks ettiradi. Termodinamik ko‘rsatkichlar esa adsorbsiya jarayonining turli haroratlarda spontan yoki spontan emasligini aniqlash imkonini beradi. Gibbs erkin energiyasining (ΔG°) manfiy qiymatlari gumin kislotaning adsorbentlarga o‘z-o‘zidan

o‘tishini va jarayon davomida erkin energiyaning kamayishini bildiradi. Adsorbent va adsorbat o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir qanchalik kuchli bo‘lsa, ΔG° ning qiymati manfiy bo‘ladi. Adsorbsiyalanish entalpiyasi (ΔH°) adsorbent va adsorbat o‘rtasidagi o‘zaro ta’sir jarayonida adsorbat molekulalarining engishi lozim bo‘lgan energiya farqini ifodalaydi. O‘rganilgan adsorbentlar uchun gumin kislotaning adsorbsiyasi bo‘yicha entalpiyaviy qiymatlar quyidagicha aniqlangan: PBG uchun 8,588 kJ/mol, TMAB uchun 7,577 kJ/mol va TEAB uchun 5,226 kJ/mol. ΔH° ning kamayish tartibiga muvofiq, gumin kislotaning adsorbsiyasi ortib borgan. Adsorbsiya entropiyasining (ΔS°) musbat qiymati adsorbent-adsorbat sistemasining moslashuvchanligini va jarayon davomida tizimdagi tasodifiylik darajasining ortishini ko‘rsatadi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, o‘rganilgan sistemalarning ΔS° qiymatlari quyidagicha aniqlangan: PBG uchun 0,0241 kJ/mol·K⁻¹, TMAB uchun 0,0227 kJ/mol·K⁻¹ va TEAB uchun 0,0161 kJ/mol·K⁻¹. Ushbu qiymatlar qattiq-suyuq fazalar orasidagi o‘zaro ta’sir natijasida tizimning tartibsizligi oshganligini ifodalaydi.

XULOSA. Olib borilgan tadqiqotda gumin kislotasini suv tarkibidan samarali adsorbsiyalash uchun modifikatsiyalangan bentonitlardan foydalanish imkoniyati mavjudligi aniqlandi. Tadqiqotlar kinetik va termodinamik jihatdan optimal sharoitlarda o‘tkazilib bunda, adsorbentning dozasi 0,1 g/L, reaksiyani olib borish vaqti 40 daqiqa va harorati 313K ga teng bo‘ldi. Natijalarga ko‘ra, TEAB adsorbenti 73 mg/g gacha gumin kislotasini adsorbsiya qila olishi va boshlang‘ich gumin kislotasi konsentratsiyasi 6 mg/L bo‘lganda adsorbsiyalanish 89,4% ni tashkil etishi aniqlandi. Tadqiqot davomida adsorbentlarning pH_{pzc} qiymatlari quyidagicha aniqlangan: PBG uchun 6,28, TMAB uchun 6,56 va TEAB uchun 6,98. Adsorbsiya samaradorligi bo‘yicha optimal aralashtirish tezligi 150 rpm deb topildi. Shuningdek, adsorbent miqdorini 0,25 dan 2,5 g/L gacha oshirish orqali gumin kislotaning adsorbsiya samaradorligini 80% dan 97% gacha oshirish mumkinligi topildi. Biroq, adsorbent massasining ortishi bilan birlik massa hisobiga adsorbsiya qilingan gumin kislotaning miqdori kamayishi kuzatildi, bu adsorbsiya sig‘imining adsorbent konsentratsiyasiga bog‘liqligini ko‘rsatadi. Gumin kislotasini suv tarkibidan adsorbentlar yordamida ajratib olishni aktivlanish energiyalari PBG uchun 19,78 kJ/mol, TMAB uchun 17,44 kJ/mol va TEAB uchun 12,03 kJ/mol ekanligi aniqlandi, bu esa adsorbsiyalanishning fizik tabiatga ega ekanligini ko‘rsatadi. Gibbs energiyasining (ΔG°) qiymatlari 293, 303 va 313 K haroratlarda mos ravishda quyidagicha bo‘ldi: PBG uchun -1,52, -1,25 va -1,04 kJ/mol; TMAB uchun -0,93, -0,66 va -0,47 kJ/mol; TEAB uchun -0,49, -0,33 va -0,17 kJ/molga tengligi topildi. ΔG° ning manfiy qiymatlari adsorbsiya jarayonining spontan holatda borishi va endotermik ekanligini tasdiqlaydi. Bundan tashqari, ishlatilgan adsorbentlarning tiklanish darajasi ham baholandi. Birinchi siklda tiklanish samaradorligi TMAB uchun 93% va TEAB uchun 95% ni tashkil etdi, bu esa adsorbentlarning qayta ishlatish imkoniyatini ko‘rsatadi. Umuman olganda, modifikatsiyalangan bentonitlar organik kislotalarga boy ifloslangan suvlarni samarali tozalash uchun istiqbolli yechim sifatida baholanmoqda.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Khelifi O, Djadallah A, Khalili K, Khanfoussi F, Laksaci H, Nacef M, Chelaghmia ML; Affoune AM. Adsorption of humic acid from aqueous solutions by using tea waste as low-cost biosorbent: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Algerian J Environ Sci Technol* 2023, 9 ISSN: 2437-1114.
2. Khanzada AK, Al-Hazmi HE, Joseph TM, Śniatała B, Majtacz J, Abdulrahman SAM, Kurniawan TA, Saeb MR, Maqinia J. Hydrochar-nanoparticle integration for arsenic removal from wastewater: Challenges, possible solutions, and future horizon. *Environ Res* 2023, 238, 117162. Doi: 10.1016/j.envres.2023.117164
3. Sakr F; Sennaoui A; Elouardi M; Tamimi M; Assabbane A. Adsorption study of methylene blue on biomaterial using cactus. *J Mater Environ Sci* 2015, 6, 397-406. Doi:10.14419/ijet.v7i4.32.23240.
4. Huang R; Moreira A; Notarfonzo R; Xu YF. Pervaporation separation of Humic acid-water mixture using modified membranes blended polyacrylic-acid (Paa)-nylon 6 membranes, *J Appl Polym Sci* 1988, 35, 1191-1200. Doi:10.1016/S0376-7388(00)85093-0.
5. Dimian AC, Kiss AA. Enhancing separation efficiency in the Humic acid manufacturing by methanol carbonylation. *Chem Eng Technol* 2021, 44, 1792-1802. Doi: 10.1002/ceat.202100230
6. Güler X. Removal of Humic acid from dilute aqueous solutions using zeolite 13X. *J. Turkish Chem Soc* 2017, 1, 159-190.
7. Saleh TA, Mustaqeem M, Khaled M. Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environ Nanotechnol, Monitoring Manag* 2022, 17, 100617. Doi:10.1016/j.enmm.2021.100617.
8. Maleki A, Pajootan E, Hayati B, 2015. Ethyl acrylate grafted chitosan for heavy metal removal from wastewater: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *J Taiwan Inst Chem Eng* 2015, 51, 127-134. Doi:10.1016/j.jtice.2015.01.004.
9. Chengxia J, Chun Y, Gang P. Effect of temperature on the sorption and desorption of perfluorooctane sulfonate on humic acid, *Journal of Environmental Sciences*, 22, 3, 2010, Pages 355-361, doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60115-7.
10. Ofudje EA, Sodiya EF, Olanrele OS, Akinwunm F. Adsorption of Cd²⁺ onto apatite surface: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Heliyon* 2023, 9, e12971. Doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12971.
11. Resende R, Leal PVB, Pereyra DH, Papini RM, Magriotis ZM. Removal of fatty acid by natural and modified bentonites: Elucidation of adsorption mechanism. *Coll. Surf. A: Physicochem Eng Aspects* 2020, 605, 125340. Doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.125340.
12. Hasdemir IM, Yilmazoglu E, Güngör S, Hasdemir B. Adsorption of Humic acid onto activated carbons produced from hazelnut shell, orange peel, and melon seeds. *Appl Water Sci* 2022, 12, 271 Doi: 10.1007/s13201-022-01797-y.
13. Njewa JB, Biswick TT, Vunain E, Lagat CS, Lugasi SO. Synthesis and characterization of activated carbon from agrowastes for the removal of Humic acid from an aqueous solution. *Adsorption Sci & Technol* 2022, 7701128, Doi:10.1155/2022/7701128.