



Н.Наранцогт

МУБИС-ийн МБУС-ийн Химийн тэнхимийн багш, доктор (Ph.D)

## ЦАХИУРОРГАНИК ПОЛИМЕРЫГ АШИГЛАН БОХИР УСАН ДАХЬ ХҮНД МЕТАЛЛЫН ИОНЫГ ШИНГЭЭН ЗАЙЛУУЛАХ ПРОЦЕССЫН ФИЗИК ХИМИЙН СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙН АСУУДАЛД

**Abstract:** Wastewater containing heavy metal ions is considered as the serious environmental problem in human society. Adsorption as the widely used method plays an important role in wastewater treatment, which is based on the physical and chemical interaction between metal ions and sorbents. Research synthesis methods are used as the sorbents in wastewater treatment; several researches have proved that silicon-organic materials are the effective sorbents for the removal of heavy metal ions from wastewater due to their unique structure properties and functional groups. All silicon-organic sorbents show high selectivity and adsorption capacities for heavy metal ions. Besides, the adsorption isotherm model and adsorption kinetics are introduced briefly to understand the adsorption procedure.

**Key words:** silicon-organic materials, wastewater containing heavy meta, isotherm and kinetic models

### Удиртгал

Дэлхийн улс орнуудын хурдацтай үйлдвэржилтийн улмаас бохир усанд маш олон төрлийн бохирдуулагчид агуулагдах болсон. Үүнд: хүний эрүүл мэндэд ноцтой аюул учруулдаг хортой, хүнд металлын ион, органик бодисууд, бактер, вирус зэрэг маш олон төрлийн зүйлс байдаг. Хаягдал усанд агуулагдах  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3,6+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3,5+}$   $\text{Hg}^{2+}$  гэх мэт хүнд металлын ионууд нь хоруу чанар ихтэй, задардаггүй шинж чанартай байдаг зэргээс мал, амьтан болон хүний эрүүл мэндэд нөлөөлж ноцтой аюул учруулдаг. Тухайлбал, хоруу чанартай кадми нь бөөрний гэмтэл, эмфизем, төмсөгний хатингаршил болон ургийн араг ясны гажиг зэрэг цочмог болон

архаг өвчлөлүүдийг үүсгэдэг [1, 2]. Химийн үйлдвэрлэл, зай боловсруулах, металлурги, арьс, шир боловсруулах, уул уурхай зэрэг олон үйлдвэрийн хаягдал усанд эдгээр хүнд металлын ионууд агуулагдаж байдаг [3]. Хаягдал усан дахь эдгээр хүнд металлын ионууд нь байгалийн усыг бохирдуулснаас усны амьтан, ургамалд нөлөөлөхөөс гадна тунадасжих, шингээгдэх замаар хүнс тэжээлийн эргэлтэд нөлөөлж хүний эрүүл мэндэд хор учруулдаг. Тиймээс бохир усан дахь хортой металлын ионуудыг зайлуулж усыг цэвэршүүлэх нь нэн даруй шийдвэрлэх тулгамдсан асуудал болж байна.

Хүнд металлын ионуудыг зайлуулах уламжлалт аргууд болох тундасжуулах [5], осмосыг эргүүлэх [6], цахилгаан химийн [7], ион солилцох [8], мембран шүүлтүүрээр шүүх [9], коагуляцид оруулах [10], хандлах [11], цацраг туяагаар шарах [12], шингээлт [13]-ийн зэрэг хэд хэдэн аргуудыг [4] ашигладаг. Дээрх аргуудаас бохир усан дахь хүнд металлын ионуудыг зайлуулах хамгийн тохиромжтой арга нь хүнд металлын ионуудыг шингээх арга [14] бөгөөд энэ нь зардал бага, үр дүн сайтай арга юм. Идэвхжүүлсэн нүүрс [15], шаварлаг ашигт малтмал [16], хялат үүсгэгч материал [17], байгалийн цеолит [18] зэрэг хэд хэдэн төрлийн материалуудыг усан уусмалаас металлын ионуудыг шингээн зайлуулах судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна. Гэхдээ эдгээр шингээгч нь хаягдал бохир уснаас хүнд металлын ионуудыг зайлуулж чадах боловч шингээлтийн багтаамж болоод үр ашиг харьцангуй бага, хэрэглэх хүрээ хязгаарлагдмал байдаг.

Иймд эдгээр дутагдлыг шийдвэрлэхийн тулд хаягдал усан дахь хүнд металлын ионуудыг

зайлуулахад нийлэг цахиурорганик полимерг хэрэглэж байна. Нийлэг цахиур органик шингээгчдийг гарган авах, хэрэглэх туршилт судалгааг хориод жил хийж байгаа бөгөөд улмаар усан дахь хортой, хүнд металлын ионыг сонгон шингээх чадвартай, хүчиллэг орчинд тэсвэртэй шингээгч материалуудыг шинээр нийлэгжүүлэн гарган авсаар байна. Уламжлалт шингээгч материалуудтай харьцуулахад цахиурорганик шингээгч нь усыг цэвэршүүлэхэд өндөр үр ашигтай, хурдан, дахин ашиглах боломжтой зэрэг давуу талуудтай [19, 20]. Бид энэхүү судалгаагаараа цахиур органик шингээгчийг хэрэглэн усыг цэвэрлэх арга аргачлалыг боловсруулахаас гадна тэнд явагдах процессын загварыг сонгон хэрэглэх арга зүйг тайлбарлахыг зорьсон.

### Судалгааны арга зүй

Цахиурорганик шингээгчийн хортой, хүнд металлын ионуудыг шингээх идэвхийг усан уусмалаас статик нөхцөлд дараах хүчин зүйлүүдээс хамааруулан судалсан. Үүнд:

- уусмалын рН, хатуу-шингэн фазын шүргэлцэх хугацаа, температур, уусмалын анхны концентрацаас хамаарах байдал
- шингээлтийн кинетикийг үзүүлэлтийг тодорхойлох
- шингээлтийн тэнцвэр (изотерм муруй)-ийг тогтоох

Шингээлт явуулахдаа 100 мл багтаамжтай шувтан колбонд тодорхой концентрацтай стандарт уусмалыг хүчиллэгжүүлээд (HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) цахиурорганик шингээгч (0.05 г)-ийг хольж, халаагчтай соронзон хутгууртай багажид тодорхой хугацаа болон температур (0-300 минут болон 25-90°C)-т хутгаж, дараа нь шингээгчийг шүүж, усаар угаан уусмалыг 100 мл болгон шингэрүүлээд уусмал дахь металлын ионы агуулгыг спектрофотометрийн аргаар тодорхойлно. Температур ба металл ионы концентрацыг хэмжихдээ хэмжилтийн нарийвчлалыг ±0.5°C ба ±0.02 ppm-аас ихгүй байна.

Шингээгчид шингээгдсэн металлын ионы хэмжээг тооцоолохдоо дараах тэгшитгэлийг ашиглана.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}; \quad q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (I)$$

Энд,  $q_t$  ба  $q_e$  –  $t$  хугацаа ба тэнцвэр тогтсон үеийн цахиурорганик полимер дээр шингээгдсэн металл ионы хэмжээ (мг/г);  $C_0$ ,  $C_t$  ба  $C_e$  –  $t$  хугацаа ба тэнцвэр тогтсон үеийн уусмал дахь металл ионы концентрац (мг/л);  $V$  – усан уусмалын эзлэхүүн (л);  $m$  – шингээгчийн хуурай жин (г);

$t$  – шингээлт явуулсан хугацаа (мин).

Спектрофотометрийн арга. Цахиурорганик полимер ашиглан шингээлт явуулсны дараах болон анхны уусмал дахь металлын агуулгыг тодорхойлоход энэхүү аргыг хэрэглэсэн. Уусмал дахь металлын ионыг тохирох урвалжийн тусламжтайгаар өнгөт нэгдэлд хувирган түүний дундуур тодорхой долгионы урттай гэрлээр үйлчлэх замаар гэрлийн эрчмийн бууралт буюу оптик нягтыг спектрофотометрийн тусламжтайгаар тодорхойлсон.

### Судалгааны үр дүн, хэлэлцүүлэг

Судалгаандаа цахиур органик полимер болох поли [N,N-бис (3-силсесквиоксанил-пропил) тиокарбамид] (ПСТМ-3Т) авч хортой, хүнд металлын ионыг шингээх тохиромжтой нөхцөлийг сонгож, улмаар тэнд шингээгдэх металл ионы шингээлтийн тэнцвэр, кинетик үзүүлэлтийг тодорхойлохын тулд дараах загваруудаар боловсруулалт хийлээ.

### Шингээлтийн изотермийн загвар

Шингээлт нь хүнд металлууд шингээгчийн хатуу гадаргуу дээр шингээгдэх үйл явц бөгөөд усанд шингээгдсэн хүнд металлын агуулга тогтворжих буюу тэнцвэрийн байдалд байхыг адсорбцын изотерм гэнэ [21]. Усанд болон шингээгдсэн хүнд металлын ионы тоо хэмжээ хооронд тогтох тэнцвэрийг адсорбцийн изотермээр илэрхийлдэг.

Бид шингээгчид хүнд металлын ион шингээгдэх тохиромжит тэнцвэр тогтох нөхцөлийг тодорхойлоход Лэнгмюрийн ба Фрейндлихийн изотермийн тэгшитгэлийг шугаман хэлбэрт хувирган тооцоололд хэрэглэдэг.

### Лэнгмюрийн загвар

Энэ загварт сорбентын идэвхтэй хэсэг дээрх нэгэн төрлийн шингээлт явагдах буюу идэвхтэй хэсгийн нэг нь адсорбатаар шингээгдэж, шингээлт энэ үеэр дуусна. Лэнгмюрийн тэгшитгэлийн шугаман бус хэлбэр нь [22, 23]:

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C}{1 + K_L C} \quad (II)$$

$K_L$  бол тэнцвэрийн тогтмол (л мг<sup>-1</sup>),  $q_{max}$  бол адсорбентын максимум шингээлтийн багтаамж (мг г<sup>-1</sup>),  $C$  бол тэнцвэрийн үеийн концентрац (мг л<sup>-1</sup>),  $q$  бол тэнцвэр тогтоход шингээгдсэн металлын хэмжээ (мг г<sup>-1</sup>)

Лэнгмюрийн загварыг шугаман хэлбэрт хувиргавал дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m b} + \frac{C_e}{q_m} \quad (III)$$

$q_m$  ба  $b$  – нэг үеэр ханасан шингээлтийн багтаамж ба шингээлтийн тэнцвэрийн тогтмол,  $C_e/q_e$  ийн утгыг  $C_e$ -тэй харьцуулахад шулуун



шугаман хамааралтай байх ба шулууны налуу өнцөг, огтлолцолоор хамгийн их шингээлтийн багтаамж, шингээгдсэн холбооны энергийг тооцоолж олно.

### Фрейндлихийн адсорбцын изотерм

Фрейндлихийн тэгшитгэл бол шингээгч дээр олон үеэр шингээхэд харгалзах эмпирик загвар юм. Фрейндлихийн загварын шугаман бус хэлбэр нь [24]:

$$q_e = K_f C_e \quad (IV)$$

Фрейндлихийн загварыг шугаман хэлбэрээр илэрхийлж болно

$$\ln q_e = \ln K_f + n \ln C_e \quad (V)$$

$q_e$  – тэнцвэрийн үеийн адсорбент дээр адсорбатаар ханах үе ( $\text{мг г}^{-1}$ );  $K_f$  – шингээлтийн багтаамжийн индикатор ( $\text{мг}^{1-n} \text{ л}^n \text{ г}^{-1}$ ),  $n$  – шингээлтийн эрчим,  $C_e$  – тэнцвэрийн үеийн адсорбатын усан уусмалын концентрац ( $\text{мг л}^{-1}$ ).

Дээрх шингээлтийн изотермийг тайлбарлахад түгээмэл хэрэглэгддэг Лэнгмюрийн загвар нь сорбент дээр нэг үеэр, харин Фрейндлихийн загвар шингээгч дээр олон давхаргаар шингээгддэг гэж үздэг [25]. Үүнээс гадна Tempkin [26], Frenkel-Holms-Hill [27], Henderson [28], Giles-Смит [29], Dubinin-Radushkevich [30], МТ [31], BET [32], BDST [33], Oswin [34], Ferro-Fintan [35], GAB [36] болон Peleg [37] зэрэг шингээлтийн судалгааны үр дүнг тайлбарлах хэд хэдэн төрлийн загвар байдаг. Эдгээр шингээлтийн загвар нь адсорбентын гадаргуу болон уусмал дахь адсорбатын хооронд шингээлтийн тэнцвэрийг илэрхийлдэг [38].

ПСТМ-ЗТ полимерын зэс (II), хром (VI)-ын шингээх туршилтын болон тооцооны үр дүнгээр байгуулсан изотерм муруй нь Лэнгмюрийн изотерм загвартай тохирч байна. Эндээс ПСТМ-ЗТ шингээгчийн гадаргуу гомоген шинж төрхтэй буюу шингээгдэх процесс зэс (II)-ийн моно молекулан үе үүсэж байгааг илтгэж байна.

### Адсорбцын кинетик загвар

Цахиур органик шингээгчид хортой хүнд металл шингээгдэх процессын механизмыг тайлбарлах, эрэмбийг тодорхойлох зорилгоор шингээлтийн кинетикийг зохицуулдаг гол параметрууд болон хэд хэдэн кинетик загвар санал болгож байна.

### Псевдо нэгдүгээр эрэмбийн кинетикийн загвар

Хатуу - шингэн систем дэх шингээх процессыг энгийн кинетик загвар болох псевдо нэгдүгээр эрэмбээр илэрхийлэх Lagergren санал болгосон [39]:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (VI)$$

$k_1$  – шингээх процессын хуурмаг 1-р эрэмбийн хурдны тогтмол ( $\text{мин}^{-1}$ ),  $q_e$  ба  $q_t$  тэнцвэрийн

ба  $t$  (мин) хугацаан дахь нэг грамм сорбент тутамд шингээгдсэн металлын ионы хэмжээ ( $\text{мг г}^{-1}$ ). Энэхүү кинетик тэгшитгэлийг  $q_t$ -ийн анхны нөхцөлд 0 тэнцүү хугацаа ( $t$ )-аар интеграцчилснаар тэгшитгэл шугаман хэлбэрээр илэрхийлэгдэнэ.

$$\ln(q_t - q_e) = \ln q_e - k_1 t \quad (VII)$$

$\ln(q_e - q_t)$ -ийн  $t$ -ээс хамаарсан хамаарал шулуун шугам байвал эндээс псевдо 1-р эрэмбийн хурдны тогтмол ( $k_1$ )-ыг шулууны налуу өнцгөөр тооцоолж олно.

### Псевдо хоёрдугаар эрэмбийн кинетикийн загвар

Кинетикийн өгөгдлөөр Но-ийн псевдо 2-р эрэмбийн кинетикийн загвараар анализ хийж болно. Энэ загвараас үндэслэн шингээлт 2-р эрэмбээр буюу хемосорбцийн явагдаж буйг төсөөлж болох ба илэрхийллийг шугаман хэлбэрт оруулан бичвэл [40]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (VIII)$$

$k_2$  – псевдо 2-р эрэмбийн адсорбцийн хурдны тогтмол ( $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ ).

Дээрх хоёр кинетик загвараас гадна өөр загварууд байдаг. Тухайлбал, Elovich-ийн тэгшитгэл [41], Weber-Morris-ийн диффузийн загвар [42] гэх мэт.

ПСТМ-ЗТ полимерын зэс (II)-ийн ионыг шингээх процесс псевдо нэгдүгээр эрэмбийн зүй тогтлоор явагдаж байгаа буюу шингээлтийн процессын хурд адсорбат болон хүчлийн устөрөгчийн ионы концентрацын аль нэгнээс хамаарах боломжтой. Харин усан уусмалаас Cr (VI) ионыг шингээх процесс псевдо-II эрэмбийн кинетик зүй тогтлоор явагдаж байгаа нь урвалын хурд тодорхойлох шатанд химийн шингээлт буюу сорбат, сорбентын хооронд электрон солилцол явагдаж буйг илэрхийлж байна.

### ДҮГНЭЛТ

Цахиурорганик полимер нь химийн шинжлэх ухаан, инженерчлэлийн ахисан түвшинд илүү үр ашигтай, байгаль орчинд ээлтэй ус цэвэрлэх технологийг хөгжүүлэх шинэ боломжийг олгож байгаа бөгөөд үүгээр бохир ус цэвэршүүлэх процессыг физик-химийн хэд хэдэн судалгаагаар баталгаажуулах нь ихээхэн анхаарал татаж байна. Сүүлийн үеийн судалгаагаар шингээгчээр цахиурорганик полимерыг ашиглах нь өвөрмөц бүтэц бүхий гадаргуугийн шинж чанараас шалтгаалан хүнд металл зайлуулах нь ашигтай аргад тооцоогдож байна. Учир нь энэхүү материалууд нь бага концентрацтай хүнд металлын ионуудыг зайлуулахад сонгомол чанар өндөр, шингээлтийн багтаамж ихтэй байдаг. Иймд цахиурорганик шингээгчид нь бохир ус цэвэрлэх технологийн хамгийн тохиромжтой

материал болж байгаа бөгөөд үүний шингээх процессын механизмыг тайлбарлахад хэрэглэгдэх шингээлтийн изотерм болон шингээлтийн кинетикийг тодорхойлох арга зүйг энэ өгүүлэлд тодруулж өглөө.

Цахиурорганик шингээгч болон бусад органик шингээгчдийг хаягдал усан дахь хүнд металлын ионуудыг зайлуулахад дахин ашиглаж болох боловч бохир усыг их хэмжээгээр боловсруулах буюу дахин ашиглах боломж хүндрэлтэй тул ус цэвэршүүлэх төгсгөлийн шат дамжлага байдлаар хэрэглэвэл зохистой. Үүнээс гадна байгаль орчинд ээлтэй, хямд, функциональ бүлэгтэй зарим нэг цахиурорганик шингээгчийг нийлэгжүүлэн хэрэглэх нь өнөө үеийн чухал асуудал юм. Мөн боловсруулсан цахиурорганик шингээгчдийг шинэ үр ашигтай шингээгч материал болгосноор бохир усан дахь хүнд металлын ионуудыг зайлуулахад хэрэглэх ирээдүй нь нэлээн тод харагдаж байгаа ч энэ судалгаа цаашид үргэлжлэх боломжтойг харуулж байна.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- Zhao, G., Li J, Ren, X., Chen, C., Wang, X., (2011). Few-layered graphene oxide nanosheets as superior sorbents for heavy metal ion pollution management. *Environ Sci Technol* 45,10454-10462.
- Moreno-Castilla, C., Ivarez-Merino, M.A., Lyppez-Ramyn, M.V., Rivera-Utrilla, J. (2004). Cadmium ion adsorption on different carbon adsorbents from aqueous solutions. Effect of surface chemistry, pore texture, ionic strength, and dissolved natural organic matter. *Langmuir* 20, 8142-8148.
- Chen, C., Wang, X. (2006). Adsorption of Ni(II) from aqueous solution using oxidized multi-wall carbon nanotubes. *Ind Eng Chem Res* 45, 9144-9149.
- Wang, LK., Vaccari, DA., Li, Y., Shammas, NK. (2005). Chemical Precipitation Physicochemical Treatment Processes. In Wang LK, Hung YT, Shammas NK, Eds. Humana Press 3141-197.
- Bydalo-Santoyo, A., Gymez-Carrasco, JL., Gymez-Gymez, E., Maximo-Martin, F., Hidalgo-Montesinos, AM. (2003). Application of reverse osmosis to reduce pollutants present in industrial wastewater. *Desalination*, 155, 101-108.
- Walsh, FC., Reade, GW. (1994). Electrochemical techniques for the treatment of dilute metal-ion solutions. *Studies in environmental science*, 59, 3-44.
- Xing, Y., Chen, X., Wang, D. (2007). Electrically regenerated ion exchange for removal and recovery of Cr (VI) from wastewater. *Environ Sci Technol*, 41,1439-1443.
- Ersahin, ME., Ozgun, H., Dereli, RK., Ozturk, I., Roest, K., et al. (2012). A review on dynamic membrane filtration: Materials, applications and future perspectives. *Bioresour Technol* (in press).
- Zhang, P., Hahn, HH., Hoffmann, E. (2003). Different behavior of iron(III) and aluminum(III) salts to coagulate silica particle suspension. *Acta hydroch hydrob*, 31, 145-151.
- Rykowska, I., Wasiak, W., Byra, J. (2008). Extraction of copper ions using silica gel with chemically modified surface. *Chem Pap*, 62, 255-259.
- Batley, GE., Farrar, YJ. (1978). Irradiation techniques for the release of bound heavy metals in natural waters and blood. *Anal Chim Acta*, 99, 283-292.
- Srivastava, V., Weng, CH., Singh, VK., Sharma, YC. (2011). Adsorption of nickel ions from aqueous solutions by nano alumina: Kinetic, mass transfer, and equilibrium studies. *J Chem Eng Data*, 56, 1414-1422.
- Fu, F., Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J Environ Manage*, 92, 407-418.
- Zamboulis, D., Peleka, EN., Lazaridis, NK., Matis, KA. (2011). Metal ion separation and recovery from environmental sources using various flotation and sorption techniques. *J Chem Technol Biotechnol*, 86, 335-344.
- Kobyas, M., Demirbas, E., Senturk, E., Ince, M. (2005). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone. *Bioresour Technol*, 96, 1518-1521.
- Oubagaranadin, JUK., Murthy, ZVP. (2009). Adsorption of divalent lead on a montmorillonite type of clay. *Ind Eng Chem Res*, 48, 10627-10636.
- Sun, S., Wang, L., Wang, A. (2006). Adsorption properties of crosslinked carboxymethyl-chitosan resin with Pb(II) as template ions. *J Hazard Mater*, 136,930-937.
- Wang, X., Zheng, Y., Wang, A. (2009). Fast removal of copper ions from aqueous solution by chitosan-g-poly(acrylic acid)/attapulgite composites. *J Hazard Mater*, 168, 970-977.
- Narantsogt, N., Burmaa, G., et al. (2011). Adsorption kinetics for the remove log Copper(II) from aqueous solution by adsorbent PSTM-3M. *Mong J Chem*, 12 (38)
- Burmaa, G., Narantsogt, N., Nasantogtokh, O.,



- Perlee-Oidov, A. (2012) Chromium (VI) sorption from aqueous solution by silicon-organic sorbent containing thiocarbamide groups. *Mong J Chem and Chem Eng*, 1(1), 7-12.
- Ali, I. (2012). New generation adsorbents for water treatment. *Chem Rev* (in press).
- Shen, W., Chen, S., Shi, S., Li, X., Zhang, X., et al. (2009). Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto diethylenetriamine-bacterial cellulose. *Carbohydr Polym*, 75, 110-114.
- Ho, YS., Chiu, WT., Wang, CC. (2005) Regression analysis for the sorption isotherms of basic dyes on sugarcane dust. *Bioresour Technol*, 96, 1285-1291.
- Rahmani, A., Mousavi, HZ., Fazli, M. (2010). Effect of nanostructure alumina on adsorption of heavy metals. *Desalination*, 253, 94-100.
- Ruparelia, JP., Duttagupta, SP., Chatterjee, AK., Mukherji, S. (2008). Potential of carbon nanomaterials for removal of heavy metals from water. *Desalination*, 232, 145-156.
- Wang, XS., Qin, Y. (2005). Equilibrium sorption isotherms for of  $Cu^{2+}$  on rice bran. *Process Biochem*, 40, 677-680.
- Pierce, C. (1960). The Frenkel-Halsey-Hill adsorption isotherm and capillary condensation. *J Phys Chem*, 64, 1184-1187.
- Henderson, D., Barojas, J., Blum, L. (1983). Anomalous adsorption of ions at an electrode. *J Phys Chem*, 87, 4544-4547.
- Cokelet, GR., Hollander, FJ., Smith, JH. (1969). Density and viscosity of mixtures of 1,1,2,2-tetrabromoethane and 1-bromododecane. *J Chem Eng Data*, 14, 470-473.
- Danish, M., Hashim, R., Mohamad Ibrahim. M.N., Rafatullah, M., Sulaiman, O., et al. (2011) Sorption of copper(II) and nickel(II) ions from aqueous solutions using calcium oxide activated date (phoenix dactylifera) stone carbon: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *J Chem Eng Data*, 56, 3607-3619.
- Redhead, PA. (1996). An empirical isotherm for multilayer physisorption. *Langmuir*, 12, 763-767.
- Onal, I., Soyer, S., Senkan, S. (2006). Adsorption of water and ammonia on  $TiO_2$ - anatase cluster models. *Surf Sci*, 600, 2457-2469.
- Goel, J., Kadirvelu, K., Rajagopal, C., Kumar Garg, V. (2005). Removal of lead(II) by adsorption using treated granular activated carbon: Batch and column studies. *J Hazard Mater*, 125, 211-220.
- Saha, D., Deng, S. (2011). Hydrogen adsorption on Pd- and Ru-doped  $C_{60}$  fullerene at an ambient temperature. *Langmuir*, 27, 6780-6786.
- Allegretti, F., O'Brien, S., Polcik, M., Sayago, DI., Woodruff DP. (2005). Adsorption bond length for  $H_2O$  on  $TiO_2(110)$ : A key parameter for theoretical understanding. *Phys Rev Lett*, 95, 226104.
- Wang, Y., Padua, GW. (2004). Water sorption properties of extruded zein films. *J Agric Food Chem*, 52, 3100-3105.
- Kammoun Bejar, A., Boudhrioua Mihoubi, N., Kechaou, N. (2012) . Moisture sorption isotherms-experimental and mathematical investigations of orange (citrus sinensis) peel and leaves. *Food Chem*, 132, 1728-1735.
- Arshadi, .M, Ghiaci, M., Gil, A. (2011). Schiff base ligands immobilized on a nanosized  $SiO_2-Al_2O_3$  mixed oxide as adsorbents for heavy metals. *Ind Eng Chem Res*, 50, 13628-13635.
- Çavus, S., Gürdag, Gl. (2009). Noncompetitive removal of heavy metal ions from aqueous solutions by poly [2-(acrylamido)-2-methyl-1-propanesulfonic acid-coitaconic acid] hydrogel. *Ind Eng Chem Res*, 48, 2652-2658.
- Fan, HT., Fan, X., Li, J., Guo, M., Zhang, D., et al. (2012) Selective removal of arsenic(V) from aqueous solution using a surface-ion-imprinted aminefunctionalized silica gel sorbent. *Ind Eng Chem Res*, 51, 5216-5223.
- Juang, RS., Chen, ML. (1997). Application of the elovich equation to the kinetics of metal sorption with solvent-impregnated resins. *Ind Eng Chem Res*, 36, 813-820.
- Malash, GF., El-Khaiary, MI. (2010). Piecewise linear regression: A statistical method for the analysis of experimental adsorption data by the intraparticlediffusion models. *Chem Eng J*, 163, 256-263.