

DEZVOLTAREA ȘI OPTIMIZAREA UNUI SISTEM INOVATIV FOTO-FENTON-PEROXON PENTRU DEGRADAREA MICROPOLUANȚILOR DIN APĂ

Sinteza raportului de cercetare PNII-RU-TE-2014-4-0405 Nr. 274/01.10.2015, Etapa 2016
Director de proiect Dr. ing. Marius Sebastian Secula

În cadrul etapei 2016 au fost sintetizate și caracterizate compozitele de cărbune activ cu fier imobilizat. Obiectivul etapei precedente a constatat în obținerea de compozite de cărbune activ cu conținut de Fe obținute prin impregnare umedă directă, acest obiectiv fiind completat în prezenta etapă prin obținerea de compozite de cărbune activ impregnate cu Fe prin oxidare cu permanganat și respectiv, prin obținerea de compozite de cărbune activ acoperite cu TiO_2 dopat cu Fe. Suplimentar, au fost preparate compozite bazate pe cărbune activ prin metoda coprecipitării de Fe în mediu alcalin.

Au fost obținute compozite tip monolit și particule de aerogel conținând grafen dopat cu TiO_2 . În acest scop, au fost preparate noi criogeluri polimerice cu porozitate ridicată, care pot fi încărcate cu macro sau nanoparticule cu activitate catalitică.

S-au studiat performanțele catalitice ale acestor materiale în privința degradării unor molecule model de micropoluanți, precum ibuprofen, diclofenac sau paraclorofenol. Aceste performanțe au fost comparate cu cele ale unor noi catalizatori Fenton de tip hidoxizi dublu lamelari.

Obiectiv 1. Sinteza și caracterizarea compozitelor de cărbune activ cu fier imobilizat (Activitățile aferente acestui obiectiv au fost derulate în cadrul Etapelor 1 și 2)

Matricele suport de cărbune activ L27, cu suprafață acidă, S21 și F22, cu suprafață neutră, precum și X17, cu suprafață bazică, au fost utilizate la prepararea de compozite cu Fe imobilizat. În cadrul etapei anterioare s-au preparat compozite de cărbune activ cu Fe imobilizat (*Fe-GAC*) prin metoda impregnării umede. Metoda impregnării umede directe a fost aplicată și în vederea obținerii unor compozite de Ti, Fe și Mn pe suport de cărbune activ folosind o baie de apă termostatăă cu mișcare orbitală (GFL 1092). Principalele materiale compozite preparate până în stadiul actual al proiectului sunt enumerate în Tabel 1.

Compozitele de Fe și Mn au fost preparate prin impregnarea în prealabil de oxizi de Mn pe suprafața matricei de cărbune activ, urmată de substituirea parțială a Mn de pe suprafață prin contactarea cu soluție de precursor de Fe. Filtratul a fost uscat la temperatura camerei, uscarea completă fiind realizată la etuvă (Shah, 2015).

A fost considerată, de asemenea, metoda coprecipitării în mediu alcalin în vederea obținerii de compozite magnetice pe baza matricelor suport de cărbune activ (*M-GAC*). În acest sens, cărbune netratat precum și cărbune oxidat cu HNO_3 concentrat au fost contactați cu soluții de Fe^{2+} și Fe^{3+} , amestecurile fiind supuse

ultrasonării și agitării intense. Prin ajustarea pH-ului peste 11 s-au obținut compozite de Fe_3O_4 (Bayazit, 2014).

Tabel 1 Compozite de cărbune activ

Nr.crt.	Compozit	Matrice suport	Precursori	Metodă preparare	Tratare termică
1	Fe-GAC	L27,X17,S21,F22	$\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$	Impregnare umedă directă	328-973 K, atmosferă de Ar
2	Fe-Mn-L27	L27	KMnO_4 , $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$	Impregnare Mn, substituție cu Fe	673-973, atmosferă de Ar
3	TiO_2 -L27	L27	TiO_2 anatase	Impregnare umedă	-
4	TiO_2 -Fe-L27	L27	TiO_2 anatase, $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	Impregnare umedă	673, atmosferă de Ar
5	TiO_2 -Fe-Mn-L27	L27	TiO_2 anatase, $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Impregnare umedă	673, atmosferă de Ar
6	M-GAC	L27,X17,S21	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Coprecipitare	328K

Metoda impregnării umede a fost aplicată și cazul preparării de cărbune activ impregnat cu TiO_2 -Fe și, respectiv, cu un nou compozit de TiO_2 -Fe-Mn. Folosind drept precursori TiO_2 anatase și nitrați de Fe și Mn, s-au preparat compozite de TiO_2 -Fe și, respectiv, TiO_2 -Fe-Mn. Compozitele astfel obținute au fost utilizate mai departe la impregnarea de cărbune activ pentru prepararea de TiO_2 -Fe-L27 și TiO_2 -Fe-Mn-L27. Pentru evidențierea performanțelor catalizatorilor de tip Fenton cu TiO_2 au fost preparate, de asemenea, compozite (TiO_2 -L27) pe bază de cărbune activ și TiO_2 (Barroso-Bogeat, 2014).

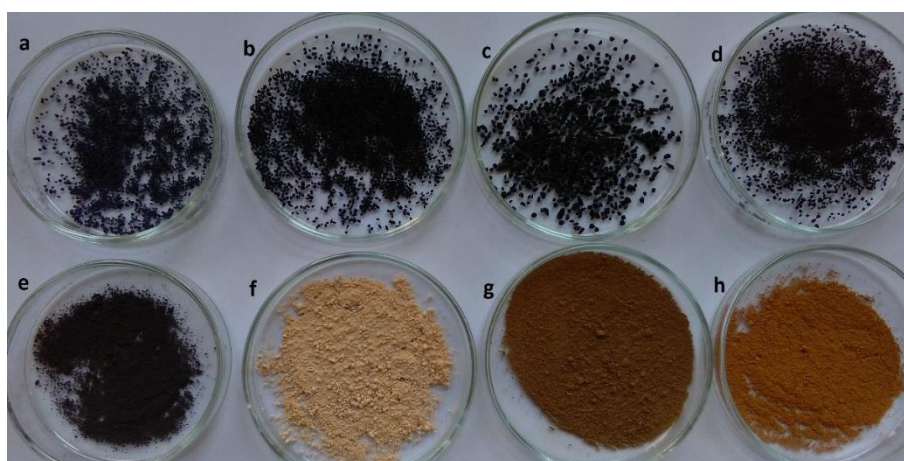


Fig. 1 Exemple de compozite sintetizate și/sau testate: (a) Ti-L27; (b) Fe-Mn-L27; (c) Fe-L27, 823 K; (d) M-L27; (e) TiO_2 -Fe-Mn, 823 K; (f) Ti-ZnFeAl 673 K; (g) Mn-ZnFeAl, 673 K; (h) Fe-ZnFeAl, 673K

În cadrul testelor experimentale privind fotodegradarea de micropoluanți model au fost considerate suplimentar o serie de noi foto-catalizatori și catalizatori de tip Fenton, cu performanță ridicată, nanocompozite pe bază de argile anionice, precum: Fe-ZnAl, Fe-ZnFeAl, Fe-ZnCr, Mn-ZnFeAl, Ti-ZnFeAl, Fe-Mn-ZnFeAl.

În Fig. 1 sunt prezentate câteva exemple de materiale sintetizate și/sau testate în cadrul acestei etape.

S-au stabilit influențele diferitor condiții de sinteză asupra proprietăților compozitelor Fenton. În acest sens au fost evaluate performanțele acestora în raport cu activitatea catalitică și capacitatea de adsorbție.

În cazul compozitelor Fe-AC obținute prin impregnare umedă directă au fost studiate efectele concentrației în ioni de Fe a soluției de impregnare, ale tipului de precursor, ale numărului de impregnări (Fig. 2), precum și cele ale temperaturii de tratare postimpregnare (Fig. 3).

Fig. 2 evidențiază faptul că reimpregnarea succesivă a matricei suport de L27 nu afectează semnificativ cinetica de adsorbție, în schimb ameliorează ușor cinetica fotodegradării moleculei de Ibuprofen. În Fig. 3 se prezintă modelarea cinetică de ordinul pseudo-II pentru procesul de adsorbție a Ibuprofenului din soluție apoasă pe compozit Fe-L27 la diferite valori ale temperaturii de tratare post-impregnare. Se observă creșterea constantei de viteză a procesului de adsorbție la valori superioare ale temperaturii de tratare a compozitelor Fe-L27 în atmosferă de Argon.

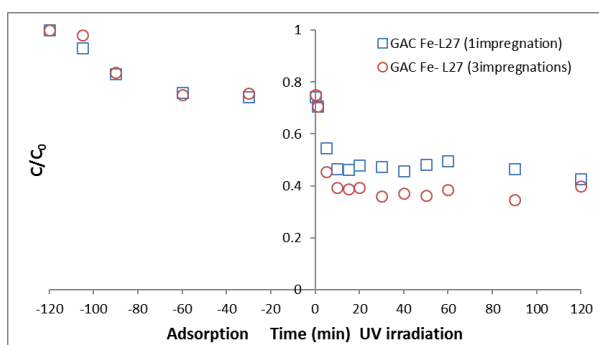


Fig. 2 Influența numărului de impregnări asupra performanțelor Fe-L27 privind fotodegradarea ibuprofenului folosind 0.4 g/L, în absența H_2O_2

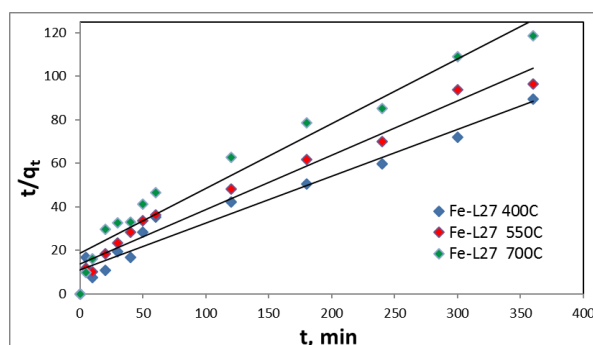


Fig. 3 Modelul cinetic de ordinul pseudo-II pentru adsorbția unei soluții de 100mg/L ibuprofen pe compozit Fe-L27 tratat termic la 400°C, 550°C și, respectiv, 700°C în atmosferă de Argon

Compozitele preparate și/sau testate au fost caracterizate prin analiză termogravimetrică în atmosferă de aer și, respectiv, argon (TG/DTG), spectroscopie în domeniul infraroșu cu transformată Fourier (FTIR), spectroscopie de fotoelectroni cu raze X (XPS), spectroscopie cu raze X (XRD), microscopie electronică prin transmisie (TEM), microscopie electronica de baleiaj cuplata cu spectroscopie dispersiva cu raze x (SEM-EDX), spectroscopie RAMAN, spectroscopie UV-VIS solid, analiză BET, izoterme de adsorbție-desorbție cu N_2 la 77K. Conținutul total de fier din compozitele Fenton preparate precum și pierderea de Fe în soluțiile tratate au fost determinate prin metoda spectrofotometrică cu fenantrolină.

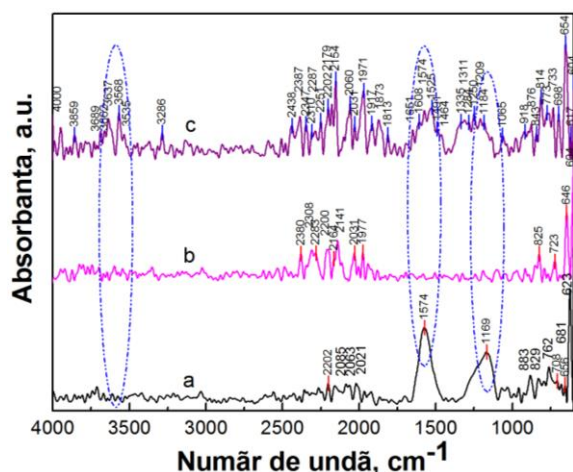


Fig. 4 Spectre FTIR pentru L27 (a), M-L27 (b) și M-L27/HNO₃ (c).

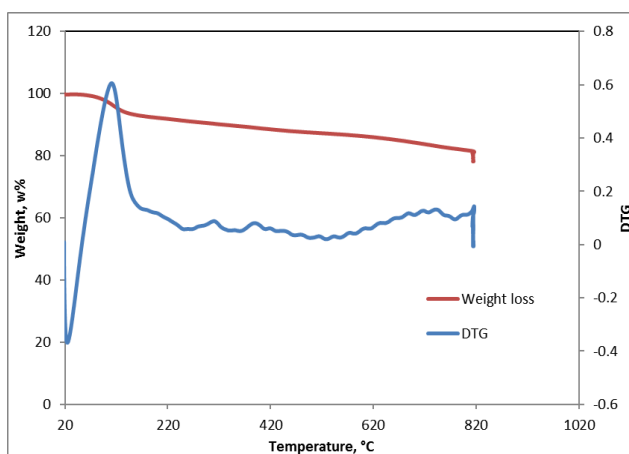


Fig. 5 Analizele TG și DTG în atmosferă de Argon pentru compozitul Fe-Mn-L27

Spectrele FTIR prezentate în Fig. 4 evidențiază că picurile corespunzătoare vibrațiilor de întindere ale C=O și grupelor fenolice situate la 1169 și, respectiv, 1590 cm⁻¹ dispar din cadrul spectrului corespunzător compozitului M-L27 susținând astfel concluzia că Fe impregnat este legat de aceste grupe funcționale. În cazul materialului M-L27 preoxidat cu HNO₃ se remarcă apariția unui număr însemnat de picuri noi corespunzătoare grupelor amino (1100-1335, 1490-1630, and 3286 cm⁻¹). S-a observat, de asemenea, faptul că degazeificarea M-L27/HNO₃ conduce la o creștere semnificativă a pierderii de masă, preoxidarea cu HNO₃ având drept rezultat creșterea hidrofilității compozitelor magnetice. Această concluzie este susținută de picurile apărute la 3568 și 3662 cm⁻¹.

Din analiza TG-DTG condusă în atmosferă de Argon prezentată în Fig. 5 se desprinde concluzia că, în comparație cu matricea suport, materialul compozit Fe-Mn-L27 dobândește un caracter ușor hidrofil, înregistrându-se 7wt% pierdere de masă până la 110 °C, 6wt% între 162-570 °C și 5wt% între 570-800 °C.

Pentru nanocompozitul TiO₂-Fe-Mn utilizat la impregnarea matricei suport L27 sunt exemplificate în Fig. 6 și Fig. 7 o imagine TEM și analiza EDX în care este evidențiată prezența elementelor Ti, Fe și Mn.

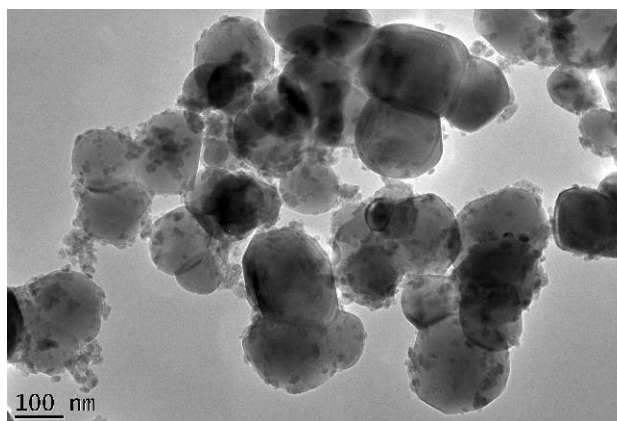


Fig. 6 Imagine TEM a nanocompozitului TiO₂-Fe-Mn

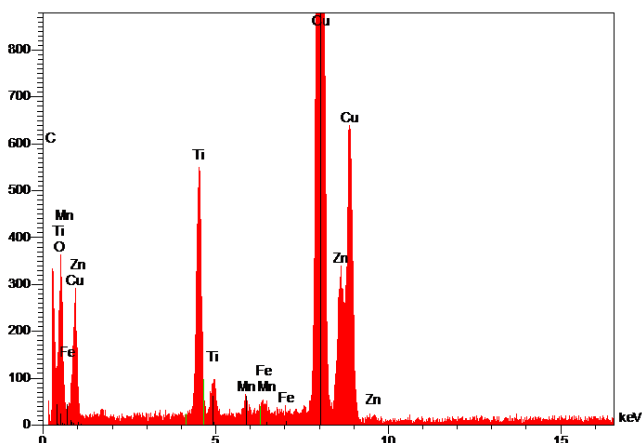


Fig. 7 Analiza EDX a nanocompozitului TiO₂-Fe-Mn

Cantitatea totală de fier din compozitele obținute a fost determinată prin metoda spectrofotometrică cu fenantrolină, în *Fig. 8* fiind exemplificate rezultatele obținute în cazul compozitelor magnetice M-GAC. Dintre compozitele magnetice analizate, M-L27 prezintă cel mai ridicat conținut total de fier (4,41%). S-a determinat un conținut de fier total mai mare la compozitele magnetice M-GAC decât la cele preoxidate cu HNO_3 (M-GAC/ HNO_3). Dintre matricile de cărbune activ studiate, matricea suport X17 prezintă cele mai defavorabile proprietăți în privința imobilizării de Fe_3O_4 , prezentând cea mai scăzută masă de Fe total.

Cu ajutorul izotermelor de adsorbție-desorbție cu N_2 înregistrate la 77K s-a determinat distribuția dimensiunii porilor pentru materialele studiate. După cum se observă în *Fig. 9* matricea S21 prezintă doar micropori, iar co-precipitarea Fe_3O_4 conduce la acoperirea suprafeței compozitului magnetic M-S21 determinând o scădere de peste 90% raportat la suprafața totală.

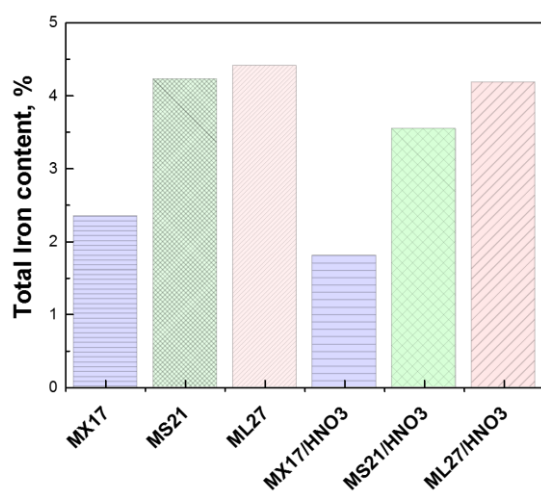


Fig. 8 Conținutul total de fier al compozitelor magnetice

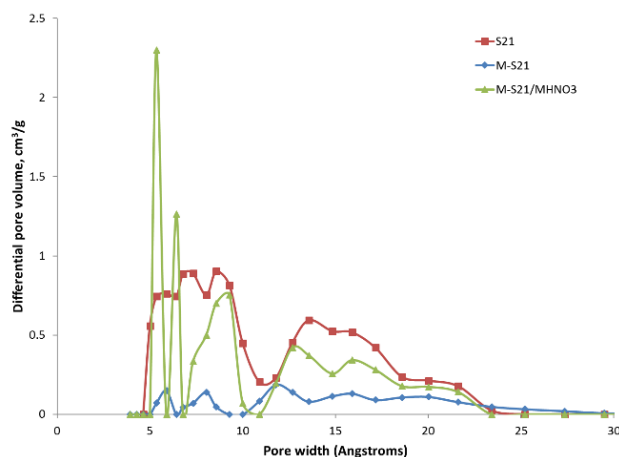


Fig. 9 Distribuția dimensiunii porilor pentru cărbunele activ S21, compozit magnetic S21 și, respectiv, compozit magnetic S21 pretratat cu HNO_3

Obiectiv 2. Selectarea celor mai adecvate compozite de cărbune activ cu Fe imobilizat pentru optimizarea sistemului de tratare (continuarea activităților conform planului din propunerea de proiect)

S-a avut în vedere testarea proprietăților adsorptive și evaluarea performanțelor catalitice în raport cu o serie de micropoluanți model. Dintre micropoluanții model considerați în cadrul acestei serii de teste se regăsesc molecule de ibuprofen, diclofenac și, respectiv, para-clorofenol.

Proprietățile adsorbtive ale compozitelor de cărbune activ au fost studiate comparativ cu cele ale matricelor suport, L27, X17 S21 și F22. În *Fig. 10* este prezentată modelarea grafică a difuziunii intra-particulă în cazul procesului de adsorbție a para-clorofenolului pe matricea L27. Mecanismul de adsorbție a 4-CP pe L27 este descris de trei etape distincte, adsorbția 4-CP în mezopori, urmată de adsorbția în micropori până la stabilirea unui cvasi-platou, în fapt a treia etapă a difuziei intra-particulă, mai evidentă în cazul concentrațiilor relativ scăzute de solut.

Pentru același solut este prezentată în Fig. 11 dependența capacității de adsorbție specifică de valoarea pH_{PZC} corespunzătoare matricei suport. Valoarea pH_{PZC} a matricei de cărbune activ prezintă o importanță critică în privința selectării adecvate a sorbentului. În cazul moleculei de 4-CP cea mai mare capacitate de adsorbție o prezintă matricele de AC având suprafață de pH neutru.

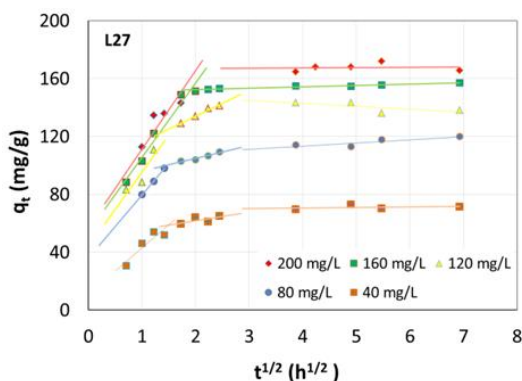


Fig. 10 Reprezentarea grafică a modelului Weber-Morris de difuzia intra-particulă pentru adsorbția 4-CP pe L27 GAC

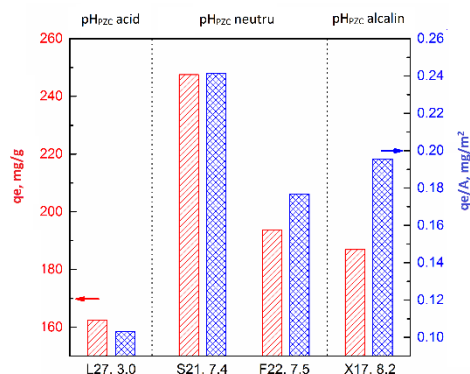


Fig. 11 Dependența capacității de adsorbție și a celei specifice de valoarea pH_{PZC}

Fig. 12 arată evoluția procesului de adsorbție a moleculei de ibuprofen pe trei matrici suport de AC distincte: L27, X17, S21. Dintre cele trei materiale considerate, L27 prezintă proprietățile chimice și texturale cele mai adecvate pentru adsorbția moleculei de ibuprofen, la pH apropiat de neutru capacitatea de adsorbție ajungând la 124,9 mg/L. În cazul compozitului Fe-L27 preparat prin impregnare umedă directă, raport L27:Fe de 5:1, capacitatea de adsorbție scade până la 94,3 mg/L. Totuși, se observă faptul că valorile capacității de adsorbție cresc pe măsură ce pH-ul se apropie de valoarea 3, valoare la care condițiile experimentale sunt cele mai favorabile.

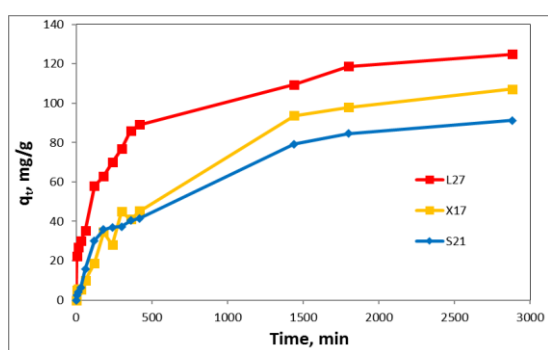


Fig. 12 Cinetica procesului de adsorbție a ibuprofenului (100mg/L) pe L27, X17, S21, pH 7

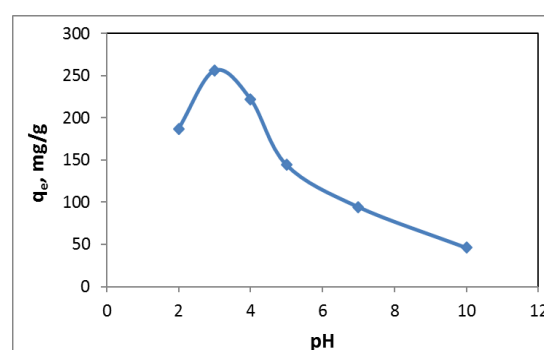


Fig. 13 Influența pH-ului asupra cantității de ibuprofen adsorbită la echilibru pe compozitul Fe-L27 la 25°C

Conținutul de fier total al compozitelor Fenton preparate pe bază de GAC L27 ajunge la 3 wt% în cazul Fe-L27, 4,5 wt% în cazul M-L27 și, respectiv, 6,7 wt% în cazul Fe-Mn-L27. Dintre aceste compozite, cele magnetice, M-L27, prezintă cel mai mare grad de uzură și cea mai mare pierdere de Fe.

Performanțele compozitelor de cărbune activ au fost evaluate, de asemenea, în procese de fotodegradare a unor micropoluhanți model, în regim discontinuu. În acest scop s-au efectuat studii utilizând montajele experimentale descrise în raportul etapei precedente. În plus, în această etapă a fost alcătuit un montaj experimental nou prevăzut cu un fotoreactor UV Peschl care permite realizarea de studii în absența ozonului (lampă UV cu emisie >200 nm), precum și cu generarea in-situ de ozon (lampă UV cu emisie <180 nm, tub cuarț care permite trecerea radiației UV <180 nm).

Fig. 14 prezintă evoluția procesului de degradare a moleculei de ibuprofen în prezența compozitului Fe-L27 GAC, cu sau fără adaos de H₂O₂, procesul de iradiere fiind pornit după stabilirea echilibrului de adsorbție. De asemenea, este evidențiată influența numărului de impregnări cu precursor de Fe a matricei suport L27 asupra procesului de fotodegradare. Se constată obținerea unui grad de degradare de peste 90% după 1 h de iradiere UV.

Evoluția spectrului UV în timpul procesului de fotodegradare Fenton în prezența de hidoxizi dublu lamelari Fe-ZnFeAl este exemplificată în *Fig. 15*. Etapa de adsorbție în absența radiației UV nu determină modificarea structurii electronice a moleculei. Prezența moleculei de Ibuprofen în soluție apoasă este caracterizată de trei picuri specifice, 195, 219 și 263 nm. După cum se poate observa, primele două picuri ale spectrului scad puternic în prima oră de iradiere UV. Cu toate acestea, intensitatea picului de la lungimea de undă de 263 nm crește gradual în primele 30 min de iradiere cel mai probabil datorită formării de compuși intermediari de degradare, complet degradați după 2 h de iradiere. *Fig. 16* prezintă comparativ valorile gradului de tratare în raport cu molecula de Ibuprofen obținute după 1h de iradiere UV în prezența compozitelor magnetice M-L27. Matricele suport preoxidate cu HNO₃ conduc la obținerea unor performanțe semnificativ inferioare, raportat la degradarea ibuprofenului. M-GAC pe bază de L27 și X17 permit obținerea unor valori de aproximativ 80% pentru gradul de tratare, în timp ce compozitele pe bază de matrice S21 prezintă randamente relativ scăzute.

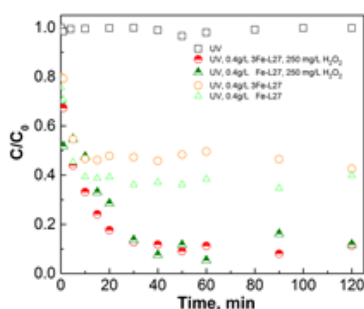


Fig. 14 Degradarea moleculei de Ibuprofen prin fotoliză, fotocataliză și, respectiv, cataliză foto-Fenton folosind Fe-L27 GAC.

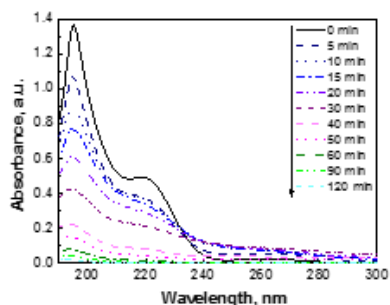


Fig. 15 Evoluția spectrului UV în timpul foto-degradării moleculei de Ibuprofen în prezența Fe(II)/ZnFeAl LDH

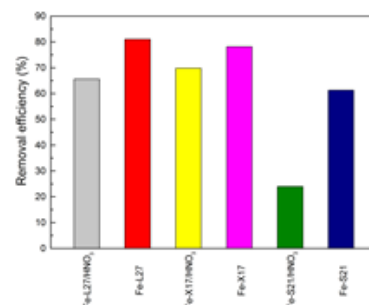


Fig. 16 Eficiența foto-degradării moleculei de ibuprofen după 1h de iradiere UV în prezență de M-GAC (diferite matrici suport de cărbune activ), pH 7

Tabel 2 prezintă valorile constantei de viteză de ordinul pseudo-întâi obținute în absența catalizatorului și, respectiv, în prezență de Fe-L27, M-L27 sau M-L27/HNO₃. Compozitele de Fe obținute prin metoda impregnării directe au performanțe superioare celor preparate prin metoda co-precipitării.

Tabel 2 Valorile constantei de viteză de ordinul pseudo-I

Catalizator	-	Fe-L27	M-L27	M-L27/HNO ₃
$10^3 \cdot k_1$	0,02	4,45	3,88	2,75
R^2	0,86	0,870	0,997	0,991

Obiectiv 3. Studiul potențialelor efecte sinergistice ale proceselor considerate

În vederea identificării unor potențiale efecte sinergistice ale sistemului foto-Feonto-peroxon au fost efectuate studii cinetice privind viteza procesului de degradare a ibuprofenului din soluții apoase prin: $h\nu$, O₃, H₂O₂, GAC, Fe-GAC, $h\nu$ /GAC, $h\nu$ /O₃, $h\nu$ /H₂O₂, $h\nu$ /Fe-GAC, O₃/GAC, O₃/Fe-GAC, H₂O₂/GAC, H₂O₂/Fe-GAC, H₂O₂/O₃, H₂O₂/O₃/GAC, H₂O₂/O₃/Fe-GAC. Fig. 14 și Tabel 2 exemplifică astfel de studii cinetice comparative. În Fig. 14 sunt comparate procesele de fotoliză, fotocataliză și, respectiv, cataliză foto-Fenton în prezența Fe-L27.

Un număr de studii cinetice comparative între procesele componente ale sistemului foto-Fenton-peroxon privind degradarea unor micropoluanti model au fost realizate pe o instalație de ozonare la scară pilot (Fig. 17) disponibilă în cadrul Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures d'Orléans, Franța în cadrul stagiului de cercetare prevăzut. Instalația pilot este compusă dintr-un reactor discontinuu termostatat prin criotermostatul (C) și agitat mecanic (M). Paleta de agitare a fost proiectată pentru a favoriza transferul de masă dintre cele trei faze (catalizator solid, soluția de tratat, ozon) și pentru a limita măcinarea GAC. Ozonul produs din oxigen pur cu un generator de ozon de tip BMT 803N (O₃ G) este introdus printr-o duză poroasă situată la partea inferioară a reactorului (D). Concentrațiile de intrare și de ieșire din reactor sunt determinate cu analizorul de ozon BMT 964 (O₃ A).

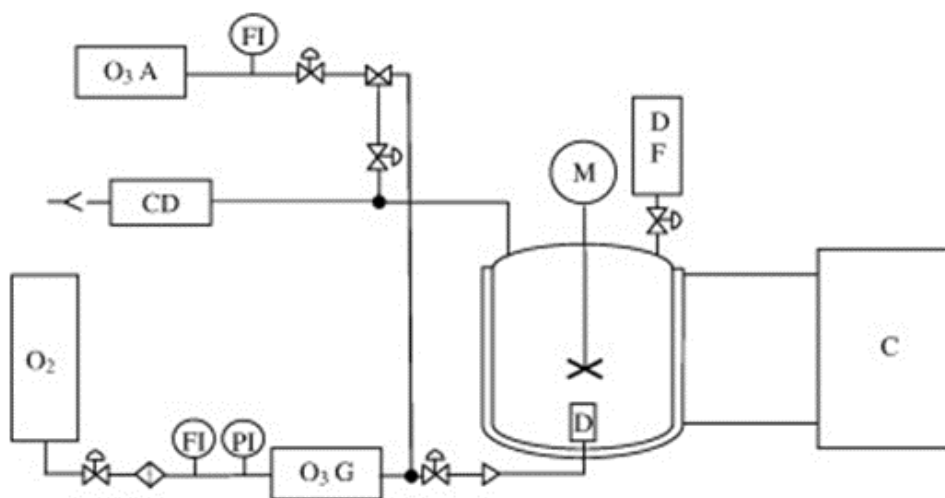


Fig. 17 Schema instalației experimentale de ozonare

S-a stabilit, de asemenea, o metodă de analiză a unui sistem binar de micropoluanti, Ibuprofen și Diclofenac, cu ajutorul metodei HPLC. În acest scop a

fost utilizat un sistem HPLC Kontron 325 prevăzut cu o coloană Hypersil C18 (250 mm x 4.6 mm, Thermo Scientific), detector UV (Spectra Physics 200) și pompă Thermo Scientific – Dionex U3000.

Studiul compușilor intermediari rezultați de la degradarea moleculelor de ibuprofen și diclofenac a fost realizat la Interfaces, Confinement, Matériaux et Nanostructures d'Orléans prin metoda HPLC (analizii au fost separați prin metoda gradient, faza mobilă: (A) 25 nM fosfat dihidrogenat de potasiu și (B) acetonitril, detector UV fixat la 220 nm) cuplat cu spectrometru de masa cu sursa de ionizare electrospray.

Fig. 18 și Fig. 19 prezintă cromatogramele obținute la analiza unei soluții de ibuprofen și diclofenac înainte și, respectiv, după 1h de degradare în prezența ozonului. Se observă că metoda de analiză permite determinarea celor doi compuși în amestec, picurile specifice fiind înregistrate la valori diferite ale timpului de retenție.

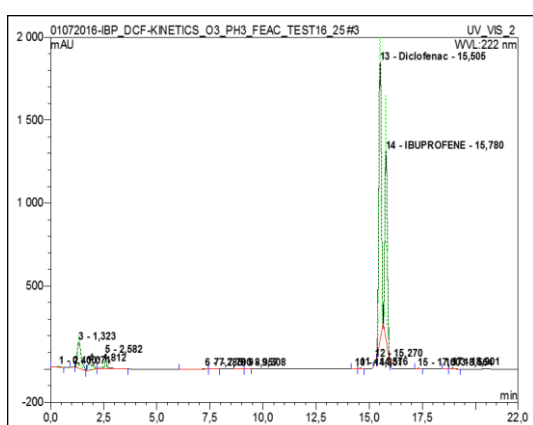


Fig. 18 Cromatograma soluției de ibuprofen și diclofenac înaintea procesului de ozonare.

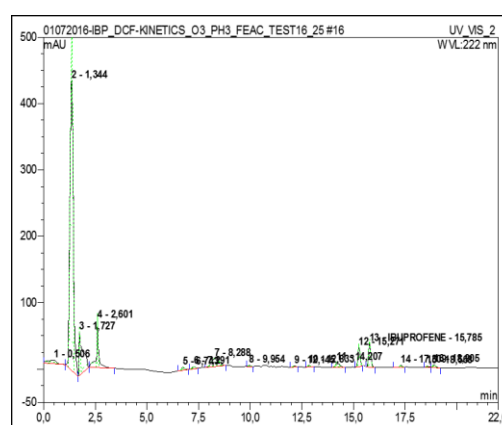


Fig. 19 Cromatograma soluției de ibuprofen și diclofenac la finalul procesului de ozonare.

Fig. 20 și Fig. 21 evidențiază precizia metodei de analiză HPLC a compușilor model studiați în soluție de amestec.

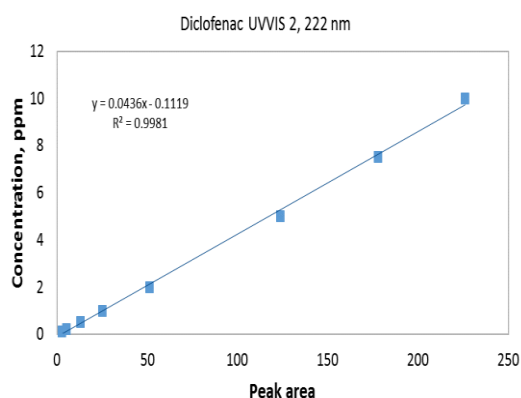


Fig. 20 Curbă de calibrare pentru determinarea moleculei de diclofenac din soluție de ibuprofen și diclofenac prin metoda HPLC.

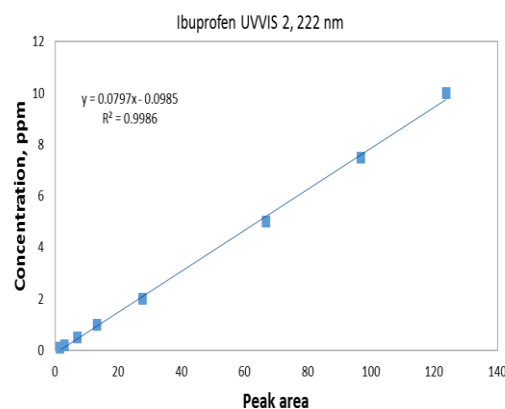


Fig. 21 Curbă de calibrare pentru determinarea moleculei de ibuprofen din soluție de ibuprofen și diclofenac prin metoda HPLC.

Obiectiv 4. Sinteza, caracterizarea și testarea unor aerogeluri Fenton
(Activitățile aferente acestui obiectiv sunt planificate în cadrul etapelor 2 și 3)

S-au efectuat studii experimentale preliminare în vederea preparării de oxid de grafen (GO) printr-o metodă Hummers modificată, și pentru obținerea de particule aerogel carbon și, respectiv, silice acoperite cu grafen dopat cu TiO_2 (TG). În cadrul acestei etape s-au obținut noi criogeluri polimerice pe bază de oxid de grafen, procedeul de preparare urmând a fi brevetat în cadrul etapei următoare. Această metodă permite obținerea de criogeluri cu porozitate și stabilitate fizico-chimică ridicate. Spectrul FTIR prezentat în Fig. 22 arată că vibrațiile specifice legăturilor $\text{C}=\text{C}$ - nu mai sunt prezente datorită procesului de polimerizare, cele mai intense picuri fiind datorate vibrațiilor de întindere ale reticulantului (N,N'-metilen bis-acrilamidă), și ale legăturilor carbonil din lanțul 2-hidroxietyl-metacrilatului. Imaginea SEM (Fig. 23) evidențiază configurația macroporoasă a suportului polimeric.

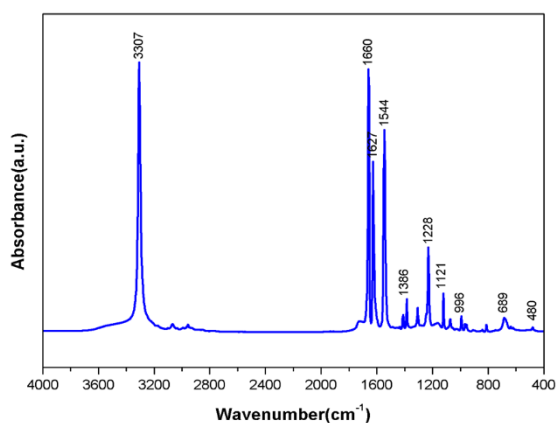


Fig. 22 Spectrul FT-IR al criogelului polimeric obținut.

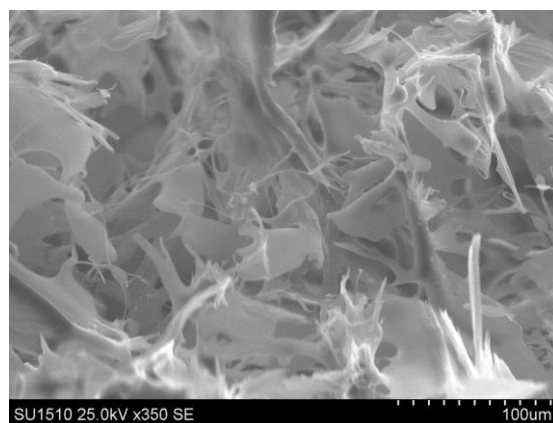


Fig. 23 Imagine SEM a criogelului preparat.

Concluzie: În cadrul prezentei etape au fost preparate și caracterizate compozitele vizate, testele fotocatalitice întreprinse permițând alegerea catalizatorilor cu proprietăți adecvate în vederea optimizării sistemului foto-Fenton-peroxon. Pornind de la noile aerogeluri obținute în cadrul acestei etape se vor dezvolta noi aerogeluri cu proprietăți Fenton și se vor efectua teste comparative cu aerogeluri clasice.

Bibliografie selectivă:

- Barroso-Bogeat, A., M. Alexandre-Franco, C. Fernández-González, V. Gómez-Serrano, Preparation of activated carbon-metal oxide hybrid catalysts: textural characterization, Fuel Processing Technology, 126, 2014, 95-103.
- Bayazit, Şahika Sena, Özge Kerkez, Hexavalent chromium adsorption on superparamagnetic multi-wall carbon nanotubes and activated carbon composites, Chemical Engineering Research and Design, 92(11) 2014, 2725-2733.
- Shah, Irfan, Rohana Adnan, Wan Saime Wan Ngah, Norita Mohamed, Iron impregnated carbon materials with improved physicochemical characteristics, Materials Science and Engineering B201, 2015, 1-12.