



<https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i04.016>

FE–NI MODIFIKATSIYALANGAN Y-TIP FAU SEOLIT KATALIZATORI ISHTIROKIDA BIOMASSADAN AKTIV UGLEROD OLISHNING KIMYOVIY ASOSLARI VA KATALITIK MEXANIZMLARI

*NamDTU doktoranti Davlatova Odina Zokirjonovna,
O‘zRFA Umumiy va noorganik kimyo instituti
ilmiy hodimi, k.f.d. Raxmarkariyeva Firusa Gayratovna*

Annotatsiya. Ushbu maqolada qishloq xo‘jaligi chiqindilari, xususan paxta somoni, o‘simlik poyalari va boshqa lignosellyulozali biomassalardan Fe–Ni modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori ishtirokida aktiv uglerod olishning kimyoviy asoslari yoritiladi. Asosiy e‘tibor biomassa pirolizi, tar birikmalarining katalitik parchalanishi, deoksigenatsiya, aromatlashuv, karbon skeletining shakllanishi va keyingi kimyoviy faollashtirish bosqichlariga qaratildi. Y-tip FAU seolitning uch o‘lchamli g‘ovak arxitekturasini, Brønsted va Lewis kislotali markazlari hamda Fe–Ni komponentlarining redoks xossalari aktiv uglerodning g‘ovak tuzilmasi va sirt kimyosini boshqaruvchi muhim omillar sifatida tahlil qilindi.

Maqolada aktiv uglerod hosil bo‘lishi oddiy karbonizatsiya mahsuli sifatida emas, balki Fe–Ni/Y-tip seolit ishtirokida boshqariladigan katalitik-kimyoviy jarayon sifatida talqin qilindi. $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ va $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ tuzlaridan kelib chiqadigan Fe–Ni oksid markazlari biomassa parchalanishidan hosil bo‘ladigan kislorodli organik fragmentlarning deoksigenatsiyasi, tar molekulalarining parchalanishi, aromatik kondensatsiya va karbon skeletining barqarorlashuviga xizmat qiladi. FAU seolit esa adsorbsiya, diffuziya va kislota-katalitik cracking jarayonlarini boshqaradi. Natijada yuqori sirt maydoni, rivojlangan mikro-va mezog‘ovak tuzilma hamda adsorbsion faollikka ega aktiv uglerod olish uchun ilmiy asos shakllanadi.

Kalit so‘zlar: Y-tip seolit, FAU, Fe–Ni katalizator, biomassa, paxta somoni, piroliz, aktiv uglerod, tar parchalanishi, deoksigenatsiya, karbonizatsiya, g‘ovak tuzilma.

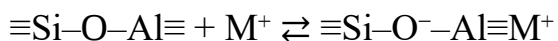
Kirish. Biomassa chiqindilarini qayta ishlash bugungi kunda energetika, ekologiya va materialshunoslik kesishmasida joylashgan eng dolzarb ilmiy yo‘nalishlardan biridir. Qishloq xo‘jaligi rivojlangan hududlarda paxta somoni, o‘simlik poyalari, yog‘och qoldiqlari, biogazdan keyingi organik qoldiqlar va boshqa lignosellyulozali chiqindilar katta miqdorda hosil bo‘ladi. Ushbu xomashyoni bevosita yoqish ko‘p hollarda past samarali bo‘lib, atmosfera ga CO_2 , CO, NO_x , SO_x , chang va kul komponentlari chiqishiga sabab bo‘ladi. Shu sababli biomassani nazoratli piroliz va katalitik konversiya orqali yuqori qo‘shimcha qiymatli mahsulotlarga aylantirish ilmiy va amaliy jihatdan muhimdir.

Biomassa pirolizi natijasida uch asosiy mahsulot hosil bo‘ladi: gazsimon fraksiya, suyuq piroliz bug‘lari yoki bioyoqilg‘i fraksiyasi hamda qattiq karbon qoldiq. Ko‘plab tadqiqotlarda piroliz gazi va bioyoqilg‘i sifatiga e‘tibor qaratiladi, biroq qattiq karbon qoldiqni yuqori sifatli aktiv uglerodga aylantirish masalasi ham juda muhim hisoblanadi. Aktiv uglerod yuqori sirt maydoni, rivojlangan mikro- va mezog‘ovak tuzilmasi, adsorbsion faolligi va kimyoviy barqarorligi tufayli suv tozalash, gazlarni adsorbsiya qilish, katalizator tashuvchilari, elektrokimyoviy energiya saqlash qurilmalari va superkondensatorlarda keng qo‘llaniladi.

Tadqiqotning texnologik konsepsiyasida biomassa chiqindilari $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ va $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ yordamida modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori bilan birgalikda reaktorga uzatiladi. Reaktorda biomasaning pirolizi natijasida gazsimon mahsulotlar va qattiq karbon hosil bo‘ladi. Gaz mahsulotlari qattiq oksidli yoqilg‘i elementi (SOFC) orqali elektr energiyasiga aylantirilishi, qattiq karbon esa aktiv uglerod va superkondensator elektrod materiali sifatida ishlatilishi mumkin. Demak, bu yondashuv biomasani faqat yoqilg‘i sifatida emas, balki bir vaqtning o‘zida energiya tashuvchi gaz va funksional uglerod materiali olish manbai sifatida baholaydi.

Mazkur maqolaning asosiy ilmiy g‘oyasi shundan iboratki, Fe–Ni modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori aktiv uglerod olish jarayonida faqat yordamchi qo‘shimcha emas, balki karbon materialning strukturaviy shakllanishini boshqaruvchi faol katalitik tizimdir. Seolitning g‘ovak tuzilmasi va kislotalik markazlari tar molekulalarining cracking, dehidratsiya va aromatiklashuv reaksiyalarini boshqarsa, Fe–Ni redoks markazlari deoksigenatsiya, vodorod ajralishi, reforming va karbon skeletining barqarorlashuvini ta‘minlaydi.

Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, seolitlar kristall alyuminosilikat materiallar bo‘lib, ularning karkasi SiO_4 va AlO_4 tetraedrlaridan tashkil topadi. Alyuminiy atomining karkasga kirishi natijasida manfiy zaryad hosil bo‘ladi va bu zaryad Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} yoki boshqa kationlar bilan kompensatsiyalanadi. Shu sababli seolitlar ion almashinish, molekulyar elak, kislotali kataliz va adsorbsiya xossalarini namoyon qiladi.



Y-tip FAU seolit katta g‘ovakli seolitlar guruhiga kiradi. FAU strukturasida yirik superkavitlar va uch o‘lchamli kanallar mavjud bo‘lib, ular biomasaning pirolizidan hosil bo‘ladigan furfural, fenol, levoglukozan, anizol, guaiakol va boshqa kislorodli organik molekulalarning seolit yuzasida adsorbsiyalanishi va katalitik qayta ishlanishi uchun qulay muhit yaratadi. Y-tip seolitning bu xususiyati uni biomasaning katalitik pirolizida, tar parchalanishida va funksional karbon material shakllanishida muhim platformaga aylantiradi.

Biomassa pirolizida asosiy muammolardan biri tar deb ataladigan og‘ir kislorodli organik birikmalar hosil bo‘lishidir. Tar tarkibida fenollar, furanoidlar, aldehydlar, ketonlar, organik kislotalar, poliaromatik uglevodorodlar va kislorodli aromatik birikmalar bo‘lishi mumkin. Ushbu birikmalar reaktor devorlarida cho‘kishi, gaz sifatini pasaytirishi va qattiq karbon qoldiqning sirt xossalarini yomonlashtirishi mumkin. Seolit katalizatorlari tar molekulalarini kislotali markazlarda parchalaydi va ularning yengil gazlar yoki tartibli aromatik karbon fragmentlariga aylanishiga yordam beradi.

Fe va Ni bilan modifikatsiya qilingan Y-tip seolit oddiy kislotali katalizator emas, balki kislotali-redoks bifunksional katalizator vazifasini bajaradi. Bunda seolit karkasidagi

Brønsted va Lewis kislotali markazlar cracking, dehidratsiya va izomerlanish reaksiyalarini tezlashtiradi; Fe–Ni markazlari esa deoksigenatsiya, reforming, vodorod ajralishi va karbon skeletining qayta tashkil topishida ishtirok etadi. Aynan shu ikki funktsiyaning birlashishi aktiv uglerodning sifatini oshiruvchi asosiy omil hisoblanadi.

Biomassa pirolizining asosiy kimyoviy bosqichlari

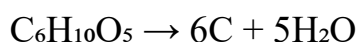
Biomassa asosan sellyuloza, gemitsellyuloza va lignindan iborat. Piroliz jarayonida ushbu komponentlar kislorodsiz yoki kislorod cheklangan muhitda termik parchalanadi. Sellyulozaning umumiy formulasi quyidagicha ifodalanadi:



Sellyuloza pirolizi umumlashtirilgan holda quyidagi tenglama bilan ifodalanishi mumkin:



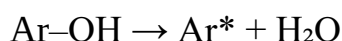
Bu yerda $C_xH_yO_z$ — suyuq va bug‘simon kislorodli organik mahsulotlar, C esa qattiq karbon qoldiqdir. Karbonizatsiya jarayonining soddalashtirilgan ko‘rinishi quyidagicha berilishi mumkin:



Amalda bu reaksiya bitta bosqichda sodir bo‘lmaydi. U dehidratsiya, depolimerlanish, fragmentatsiya, dekarboksillanish, dekarbonillanish va aromatik kondensatsiya kabi bir necha ketma-ket bosqichlardan iborat. Gemitsellyuloza nisbatan past haroratda parchalanib, CO_2 , CO, organik kislotalar va furanoid birikmalar hosil qiladi. Lignin esa aromatik tuzilishga ega bo‘lgani sababli fenolik birikmalar va aromatik karbon qoldiq hosil bo‘lishining asosiy manbalaridan biridir.



Fenolik birikmalarning keyingi kondensatsiyasi karbon skeletining shakllanishiga olib keladi:



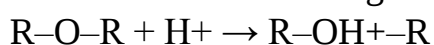
Bu jarayonlarda Ar^* faol aromatik fragmentni, C_{aromatik} esa aromatiklashgan karbon skeletini bildiradi. Katalizatorsiz sharoitda bu reaksiyalar nazoratsiz kechib, tar hosil bo‘lishi yoki tartibsiz karbon qoldiq to‘planishiga olib kelishi mumkin. Katalitik muhit esa ushbu jarayonlarni boshqarishga imkon beradi.

Y-tip FAU seolitning kimyoviy vazifasi

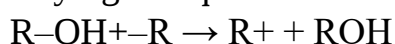
Y-tip FAU seolit aktiv uglerod olish jarayonida adsorbsion-katalitik muhit vazifasini bajaradi. Biomassa parchalanishidan hosil bo‘lgan kislorodli molekulalar seolit yuzasida ushlanadi va kislotali markazlarda qayta reaksiyaga kirishadi. Brønsted kislotali markaz umumiy holda quyidagicha ifodalanadi:



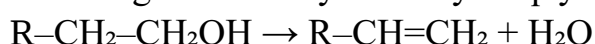
Bu markaz kislorodli organik molekulalarning protonlanishiga olib keladi:



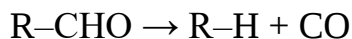
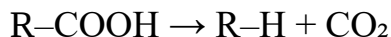
Keyingi bosqichda C–O bog‘i uzilib, kichikroq fragmentlar hosil bo‘ladi:



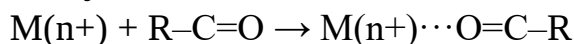
Seolitdagi dehidratsiya reaksiyasi quyidagi ko‘rinishda borishi mumkin:



Dekarboksillanish va dekarbonillanish reaksiyalari ham tar va kislorodli organik molekulalarning qayta ishlanishida muhimdir:



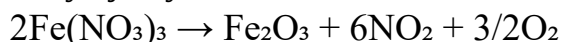
Lewis kislotali markazlar esa metall kationlari yoki koordinatsion to‘yinmagan alyuminiy markazlari bilan bog‘liq bo‘lib, karbonil, efir va fenolik guruhlar bilan koordinatsiyalanadi:



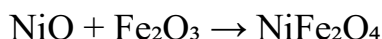
Bu koordinatsiya adsorbsiyalangan molekulalarning elektron zichligini o‘zgartiradi va ularning keyingi parchalanishini osonlashtiradi. Natijada og‘ir kislorodli tar molekulalari yengil gazlar, aromatik fragmentlar va qattiq karbon tuzilmalarga aylanishi mumkin.

Fe–Ni modifikatsiyasining kimyoviy roli

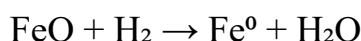
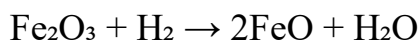
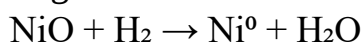
Fe va Ni bilan modifikatsiya qilingan seolitda bir nechta faol markazlar hosil bo‘lishi mumkin. Bular Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Ni^0 , $Fe-O-Ni$ va Fe/Ni oksid nanozarralaridir. Kalsinatsiya jarayonida metall nitratlar oksidlarga aylanadi:



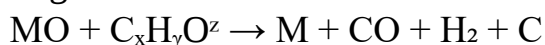
Fe va Ni oksidlari o‘zaro ta’sirlashib spinelga o‘xshash fazalar hosil qilishi mumkin:



Piroliz muhitida vodorod, uglevodorodlar va kislorodli organik bug‘lar mavjud bo‘lganligi sababli metall oksid markazlari qisman qaytarilishi mumkin:



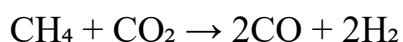
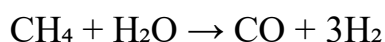
Organik kislorodli birikmalar ham metall oksidlarni qaytarishi mumkin:



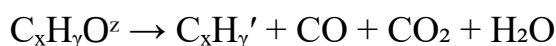
Ni markazlari dehidrogenatsiya va reforming reaksiyalarini tezlashtiradi. Masalan, uglevodorodlarning dehidrogenatsiyasi quyidagicha ifodalanadi:



Metan bug‘ reformingi va quruq reforming reaksiyalari ham Fe–Ni markazlarida sodir bo‘lishi mumkin:



Fe markazlari kislorodli fragmentlarni deoksigenatsiya qilish va karbon strukturasi barqarorlashtirishda ishtirok etadi:



Fe–Ni sinergiyasi natijasida tar molekulalari to‘liq nazoratsiz polimerlanmaydi, balki qisman parchalanadi, qisman aromatiklashadi va qattiq karbon skeletiga aylanadi. Bu keyingi faollashtirish bosqichida yuqori g‘ovakli aktiv uglerod hosil bo‘lishi uchun asos yaratadi.

Aktiv uglerod hosil bo‘lishining katalitik mexanizmi

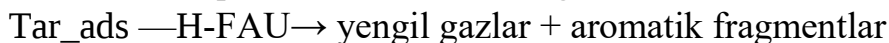
Fe–Ni/Y-tip FAU seolit katalizatori ishtirokida aktiv uglerod hosil bo‘lishi ketma-ket bir nechta kimyoviy bosqichlar orqali amalga oshadi. Birinchi bosqichda biomassa termik parchalanadi:



Ikkinchi bosqichda tar molekullari seolit yuzasida adsorbsiyalanadi:



Uchinchi bosqichda kislotali cracking sodir bo‘ladi:



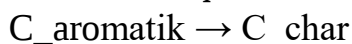
To‘rtinchi bosqichda Fe–Ni markazlarida deoksigenatsiya va reforming reaksiyalari boradi:



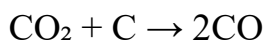
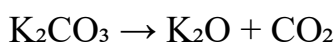
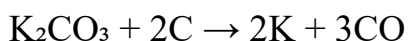
Beshinchi bosqichda aromatik kondensatsiya sodir bo‘ladi:



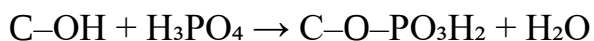
Oltinchi bosqichda karbon skeleti rivojlanadi:



Yettinchi bosqichda qattiq karbon kimyoviy faollashtirish orqali aktiv uglerodga aylantiriladi. Agar KOH bilan faollashtirish ishlatilsa, quyidagi reaksiyalar sodir bo‘lishi mumkin:



Ushbu reaksiyalar karbon matritsada mikrog‘ovaklar hosil qiladi. Agar H_3PO_4 bilan faollashtirish ishlatilsa, biomassa va karbon yuzasidagi gidroksil guruhlar bilan fosfat efirlari hosil bo‘lishi mumkin:



Fosfat guruhlarini karbon tuzilmaning termik barqarorligini oshiradi, karbonizatsiya vaqtida skeletning haddan tashqari zichlashib ketishiga to‘sqinlik qiladi va mezog‘ovaklarning rivojlanishiga yordam beradi.

Fe–Ni/Y-tip FAU katalizatorining aktiv uglerod sifatiga ta’siri

Fe–Ni modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori aktiv uglerodning g‘ovak tuzilmasi, sirt kimyosi va elektrokimyoviy xossalari ta’sir qiladi. Seolitning tartibli g‘ovak arxitekturasini piroliz bug‘larining diffuziyasini va ikkilamchi reaksiyalarini boshqaradi. Bu esa tartibsiz tar cho‘kmasi o‘rniga aromatlashgan va keyingi faollashtirishga mos karbon skeleti shakllanishiga yordam beradi.

Fe va Ni markazlari kislorodli organik fragmentlar bilan o‘zaro ta’sirlashib, karbon yuzasidagi funksional guruhlar nisbatini o‘zgartirishi mumkin. Karbonil, gidroksil, karboksil va fenolik guruhlar adsorbsiya jarayonlarida muhim rol o‘ynaydi. Masalan, suvdagi bo‘yoqlar, fenollar, og‘ir metall ionlari yoki CO_2 adsorbsiyasida sirt funksional guruhlar adsorbat bilan vodorod bog‘lanish, elektrostatik tortishish yoki koordinatsion ta’sirlashuv hosil qilishi mumkin.

Agar olingan aktiv uglerod superkondensator materiali sifatida qo‘llansa, uning g‘ovak hajmi, elektr o‘tkazuvchanligi, grafitlanish darajasi va sirt heteroatomlari muhim ahamiyatga ega bo‘ladi. Fe–Ni markazlari karbon skeletining qisman grafitlanishiga yordam berishi mumkin:



Qisman grafitlangan uglerod elektr o‘tkazuvchanlikni yaxshilaydi, mikrog‘ovaklar esa ionlarni saqlash uchun katta sirt maydoni beradi. Shu sababli Fe–Ni/Y-tip seolit ishtirokida olingan aktiv uglerod nafaqat adsorbent, balki elektrokimyoviy energiya saqlash materiali sifatida ham istiqbolli hisoblanadi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi

Mazkur tadqiqotda aktiv uglerod olish jarayoni an’anaviy piroliz mahsuloti sifatida emas, balki Fe–Ni bilan modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori ishtirokida amalga oshiriluvchi boshqariladigan kimyoviy-katalitik tizim sifatida talqin qilindi. Bunday yondashuv aktiv uglerodning hosil bo‘lish mexanizmlarini, xususan uning strukturaviy rivojlanishini chuqurroq ilmiy asosda tushuntirish imkonini beradi.

Birinchi ilmiy yangilik shundan iboratki, Fe–Ni/Y-tip FAU katalizatori biomassa pirolizida hosil bo‘ladigan tar birikmalarining parchalanishi, deoksigenatsiya reaksiyalari hamda karbon skeletining aromatlashuv jarayonlarini boshqaruvchi kompleks katalitik tizim sifatida asoslandi.

Ikkinchi ilmiy yangilik Y-tip FAU seolitning uch o‘lchamli g‘ovak arxitekturasini piroliz bug‘larining selektiv adsorbsiyasini ta’minlashi va uning kislotali markazlari orqali amalga oshuvchi kraking reaksiyalari natijasida qattiq karbon mahsulotining strukturaviy sifatini yaxshilashi bilan izohlanadi.

Uchinchi ilmiy yangilik Fe va Ni faol markazlarining deoksigenatsiya, redoks almashinuvi, karbon nukleatsiyasi hamda qisman grafitlanish jarayonlaridagi roli kimyoviy reaksiyalar va mexanizmlar asosida tizimli ravishda asoslab berilganidadir.

To‘rtinchi ilmiy yangilik biomassa konversiyasi jarayonida gazsimon va qattiq mahsulotlarni integratsiyalashgan holda boshqarish konsepsiyasining ishlab chiqilganligidir. Ushbu yondashuvda piroliz natijasida hosil bo‘lgan gaz mahsulotlari energiya olish uchun, qattiq karbon esa yuqori samarali aktiv uglerod hamda elektroximik qurilmalar, xususan superkondensatorlar uchun funksional material sifatida foydalanishga yo‘naltiriladi.

Xulosa

Fe–Ni modifikatsiyalangan Y-tip FAU seolit katalizatori ishtirokida biomassadan aktiv uglerod olish jarayoni yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Ushbu yondashuv biomassani oddiy yoqilg‘i sifatida emas, balki funksional uglerod materiali va energiya tashuvchi gaz manbai sifatida qayta ishlash imkonini beradi.

Y-tip FAU seolitning g‘ovak arxitekturasini, kislotali markazlari va adsorbsion xossalari piroliz bug‘larining cracking, dehidratsiya, dekarboksillanish va aromatlashuv reaksiyalarini boshqaradi. Fe–Ni markazlari esa deoksigenatsiya, redoks almashinuvi, gaz hosil bo‘lishi va karbon skeletining rivojlanishida muhim rol o‘ynaydi.

Kimyoviy nuqtai nazardan jarayon quyidagi ketma-ketlikda kechadi: biomassa termik parchalanadi, tar va kislorodli organik fragmentlar hosil bo‘ladi, ular FAU seolit kislotali markazlarida crackingga uchraydi, Fe–Ni markazlarida deoksigenatsiyalanadi va natijada

_____ **Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar 2026-yil 4-son** _____ **A seriya**
aromatiklashgan karbon skeleti hosil bo‘ladi. Keyingi KOH yoki H₃PO₄ faollashtirish bosqichi ushbu karbon skeletida mikro- va mezog‘ovaklarning rivojlanishiga olib keladi.

Shunday qilib, Fe–Ni/Y-tip FAU seolit katalizatori biomassa pirolizida yuqori sifatli aktiv uglerod olish uchun istiqbolli katalitik platforma hisoblanadi. Mazkur konsepsiya dissertatsiya, ilmiy maqola va amaliy texnologik loyiha uchun mustahkam ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Qazi, U. Y., Javaid, R., Ikhlal, A., Khoja, A. H., & Saleem, F. (2022). A Comprehensive Review on Zeolite Chemistry for Catalytic Conversion of Biomass/Waste into Green Fuels. *Molecules*, 27, 8578.
2. Ennaert, T., van Aelst, J., Dijkmans, J., de Clercq, R., Schutyser, W., Dusselier, M., Verboekend, D., & Sels, B. F. (2016). Potential and challenges of zeolite chemistry in the catalytic conversion of biomass. *Chemical Society Reviews*, 45, 584–611.
3. Wu, X., Song, Y., Li, J., Yao, W., Yao, Y., Yang, X., Huang, Z., Wei, G., Rakhmatkarieva, F., & Davlatova, O. Regulate surface oxygen vacancies and oxygen migration in Fe-based carriers via tungstate-modified for oxidative dehydrogenation of ethane with low CO_x selectivity. Preprint.
4. Al-Naddaf, Q., Lawson, S., Rownaghi, A., & Rezaei, F. (2020). Analysis of Dynamic CO₂ Capture over 13X Zeolite Monoliths in the Presence of SO_x, NO_x and Humidity. Preprint.
5. Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier.
6. Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1966–2005.